

Sophie Gröger, Marco Weißgerber (Hrsg.)

XIV. Internationales Oberflächenkolloquium

Sophie Gröger, Marco Weißgerber (Hrsg.)

XIV. Internationales Oberflächenkolloquium

XIV. International Colloquium on Surfaces

30.01.-01.02.2017

an der Technischen Universität Chemnitz

Tagungsband



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

**Universitätsverlag Chemnitz
2017**

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Titelgrafik: Sophie Gröger
Satz/Layout: Marco Weißgerber

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

Herstellung und Auslieferung

readbox unipress
Am Hawerkamp 31
48155 Münster

readbox unipress ist eine Marke der
readbox publishing GmbH
Ruhrallee 9
44139 Dortmund
<http://unipress.readbox.net>

ISBN 978-3-96100-006-7

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-215831>

INHALTSVERZEICHNIS

Funktion und Geometrie - Betrachtungen an der Oberfläche	1
Gröger, S.; Weißgerber, M.; Hofmann, R.	
Form removal aspects on the waviness parameters for steel in automotive applications: Fourier filtering vs. polynomial regression	11
Vermeulen, M.; Balabane, M.; Mallé, C.	
Einfluss des Fertigungsprozesses auf die Feingestalt und Funktionalität von Bauteiloberflächen und deren Bewertung	21
Schneider, J.; Schmidt, T.; Edelman, J.; Putz, M.	
Funktionale 3D-Oberflächencharakterisierung der Zylinderlaufbahn in der Automobilindustrie	31
Machleidt, T.; Lucht, C.; Schwannecke, H.-C.; Flores, G.; Besch, D.	
Geometrieanforderungen bei metallischen Bipolarplatten in PEM-Brennstoffzellen	41
Lötsch, K.; Jendras, P.; Härtel, S.; von Unwerth, T.	
Bezüge und Toleranzen – Spannungsfeld Norm und reale Anwendung	53
Bohn, M.; Hetsch, K.	
Wie vergleichbar ist die geometrische Tolerierung nach ISO und ASME?	61
Schönberg, B.	
Integrative Messtechnik - Neuentwicklungen in der automatisierten Rauheits- und Konturmesstechnik	69
Klöden, R.	
Schneller in der Oberflächenmesstechnik: Aperturkorrelation und Koordinatenmessgeräteintegration	79
Imkamp, D.; Drescher, V.	
3D-Oberflächensensor für den industriellen Einsatz mit sensornaher Verarbeitungskette auf FPGA-Basis	87
Schwannecke, H.-C.; Wenzel, K.; Machleidt, T.	
Moderne Oberflächenmessung: Gestalt und Gestaltabweichungen	93
Kedziora, H.-J.; Meyer, M.; Volk, R.	
Einflüsse der Oberflächenstruktur auf die Streuung von Rauheitskennwerten: Praxisrelevante Untersuchungen	105
Rief, S.; Seewig, J.; Hüser, D.	

Eignungsprüfung konfokaler Sensoren zur Rauheitsmessung Schwarzer, F.; Volk, R.	115
Warum brauchen wir in der Oberflächenmesstechnik eine Norm für Oberflächendefekte auf Kalibriernormalen? Rubert, P.	123
Weiterentwickelte Ansätze zur Charakterisierung von Kanten an Schneidwerkzeugen und Werkstücken Uhlmann, E.; Roßkamp, S.; Eulitz, A.	131
Komplexe Geometrien mit nur einem optischen Messsystem vermessen Bauer, C.; Hahne, S.	145
Kalibrierung kleiner Radien mittels Tastschnittgerät Thomsen-Schmidt, P.; Brand, U.	155
Automatische 3D-Auswertung der Schneidkantenqualität durch Fokus-Variation Danzl, R.; Helmlí, F.	165
Bestimmung der 2D-Geometrie von Silizium-Mikrotastern Langfahl-Klabes, J.; Doering, L.; Brand, U.	175
Herausforderungen des Einsatzes unterschiedlicher Messbezugssysteme in der Prozesskette Aluminium-Struktur-gussbauteilbearbeitung Von Kuepach, S.; Wagensoener, M.; Roeren, S.	185
Prozessstabilisierung, Effizienzsteigerung und Technologie-weiterentwicklung durch automatisierte Oberflächenfehler-erkennung im Rahmen der Gesamtprozesskette Aluminium-Strukturbauteile – Einführung eines Würfelmodells zur Einordnung von Erkenntnissen Wagensoener, M.; von Kuepach, S.; Roeren, S.	191

FUNKTION UND GEOMETRIE - BETRACHTUNGEN AN DER OBERFLÄCHE

Sophie Gröger, Marco Weißgerber, Robert Hofmann

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur
Fertigungsmesstechnik, sophie.groeger@mb.tu-chemnitz.de

Abstract: Die Funktion von Bauteilen wird im entscheidenden Maße von der Geometrie der Oberfläche beeinflusst. Diese wird durch eine Nenngestalt und Nennmaße sowie zulässige Abweichungen festgelegt. Im internationalen System der Geometrischen Produktspezifikation und Verifikation (GPS) werden Größenmaße, Abstände, Form, Lage und Oberflächenangaben zur Tolerierung unterschieden. Diese Trennung der Gestaltabweichungen ist in der bis heute gültigen Norm DIN 4760 aus dem Jahr 1982 den fertigungsbedingten Entstehungsursachen zugeordnet. Der Beitrag zeigt auf, worauf die heutigen geometrischen Tolerierungsgrundsätze beruhen und stellt Ansätze zur Einteilung von Funktionseigenschaften vor.

KEYWORDS: FUNKTIONALE GEOMETRISCHE SPEZIFIKATION,
FUNKTIONSEIGENSCHAFTEN, GEOMETRISCHE PRODUKTSPEZIFIKATION,
OBERFLÄCHE, GESTALTABWEICHUNGEN

1. MOTIVATION

1.1 Einleitung

Die Festlegung von Anforderungen mit dem Ziel, Kundenwünsche in Form einer definierten Funktion für ein Produkt zu erfüllen, steht vor jeder geometrischen Spezifikation. Mit der geometrischen Beschreibung in Verbindung mit Materialfestlegungen entsteht aus diesen Anforderungen eine Spezifikation, die durch Herstellprozesse und Montageprozesse in reale Produkte umgesetzt und durch die Verifikation nachgewiesen wird.

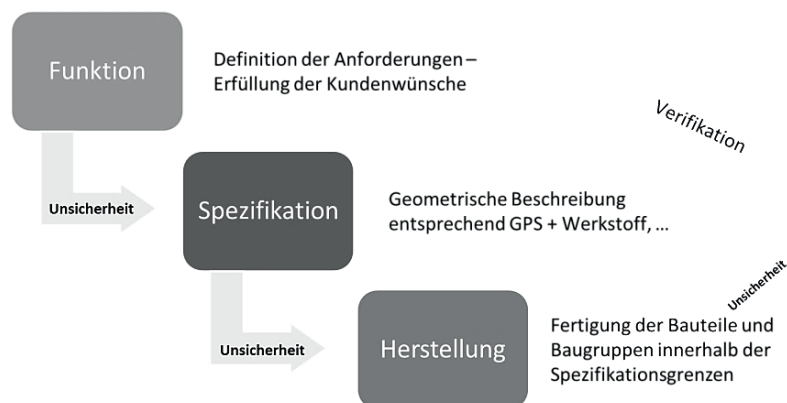


Abb. 1: Einordnung Funktion, Spezifikation und Herstellung

Abbildung 1 zeigt diese Entwicklungsebenen auf und stellt damit gleichzeitig dar, dass die Bedeutung der Spezifikation zur Abbildung der Funktionseigenschaften stark auf die Unsicherheit der weiteren Schritte wirkt [17450-2, 2013]. Jeder nicht beschriebenen Funktionseigenschaft fehlen die Verdeutlichung und damit die Berücksichtigung in den nachfolgenden Prozessschritten, was zu Mängeln bei der Funktionserfüllung führt.

Die Spezifikation geometrischer Eigenschaften zur Funktionsabbildung wird heute einerseits durch die lückenhafte Anwendung bestehender Werkzeuge und zum anderen durch unzureichende Spezifikationsmöglichkeiten beeinflusst. So führen nach mögliche Fehler in der Entwicklung und Konstruktion zu Produkten, die nicht montierbar sind, die die Leistungsdaten nicht erreichen oder deren Dauerfestigkeit nicht gewährleistet werden kann, durch z. B. Bauraumüberschreitungen oder falsche Anschlussmaße zwischen Bauteilen.

Mit dem Aufzeigen der bisherigen Spezifikationsmöglichkeiten im System der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) und der Ableitung von Anforderungen an funktionale Beschreibungen sollen Ansätze aufgezeigt werden, wie dieser grundlegende Schritt für zukünftige Produktentwicklungen verbessert werden kann.

1.2 Geometrie im System der Geometrischen Produktspezifikation und Verifikation

Die Funktion von Bauteilen als Teile von Baugruppen und Produkten wird im entscheidenden Maße von der Geometrie der Oberfläche beeinflusst. Die wirkliche Oberfläche ist in DIN EN ISO [14406, 2011] definiert als:

„... alle physikalisch existierenden Geometrieelemente, die das gesamte Werkstück vom umgebenden Medium trennen.“

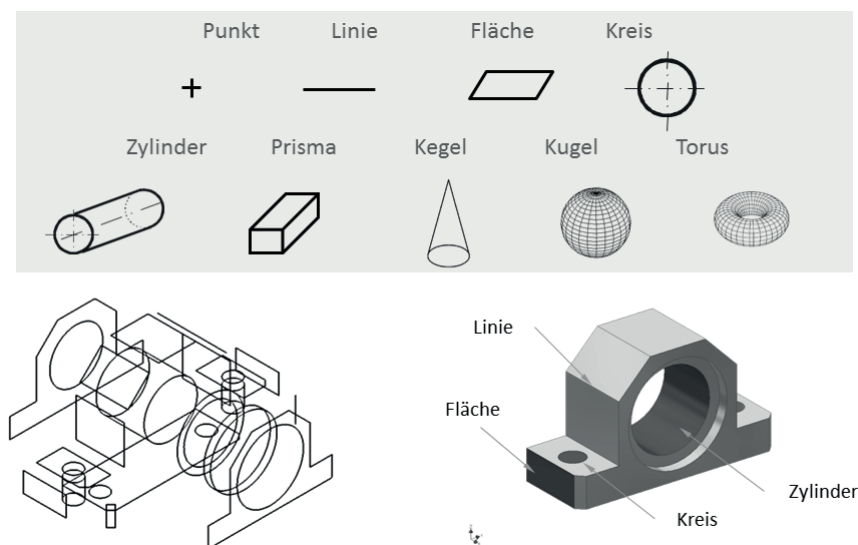


Abb. 2: Geometrieelemente als Basis der geometrischen Beschreibung

Im GPS-System sind die in Abbildung 2 unterschiedenen Geometrieelemente die Basis für die Beschreibung der Bauteile. Durch das Zusammensetzen dieser Geometrieelemente entstehen weitere geometrische Eigenschaften. Regeln zur Spezifikation sind auf diesem Konzept der Geometrieelemente und deren Beziehungen aufgebaut.

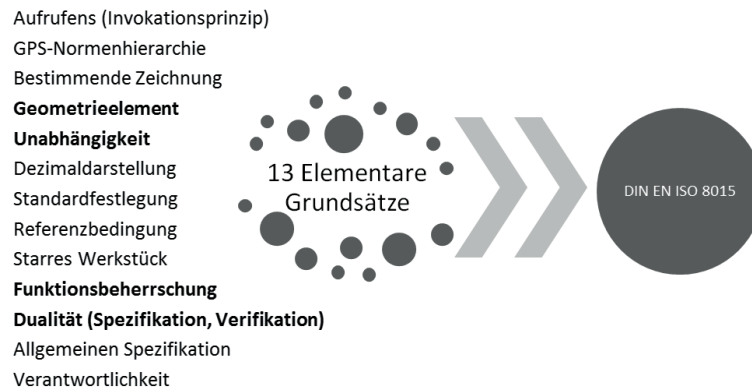


Abb. 3: Die 13 elementaren Grundsätze der DIN EN ISO [8015, 2011]

Als fundamentale GPS-Norm sind in der DIN EN ISO 8015 [8015, 2011] 13 Grundsätze formuliert (Abb. 3). Von besonderer Bedeutung für das GPS-System ist im Grundsatz der Unabhängigkeit festgelegt, dass standardmäßig jede GPS-Anforderung an ein Geometrieelement oder eine Beziehung zwischen Geometrieelementen unabhängig von anderen Anforderungen an dieses Geometrieelement oder an die Beziehung zwischen den Geometrieelementen erfüllt werden muss.

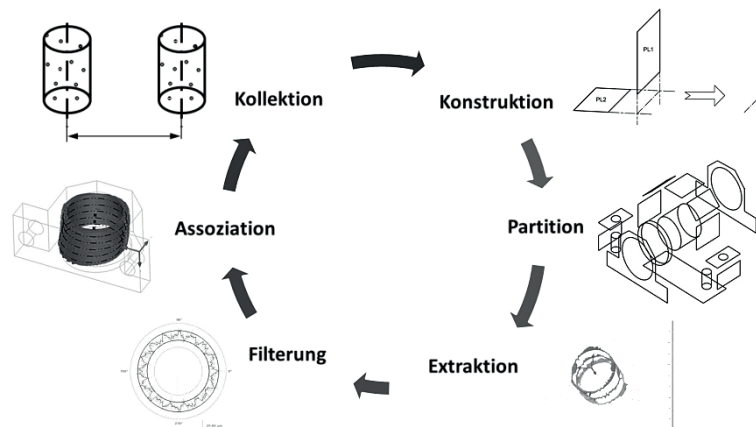


Abb. 4: Operationen für Spezifikation und Verifikation im GPS-System nach [17450-1, 2011]

Der Grundsatz der Dualität unterscheidet die Betrachtung Spezifikation und Verifikation. Operationen, wie sie in Abbildung 4 als Kreislauf gezeigt werden, sind sowohl für die Spezifikation als auch für die Verifikation zu wählen [17450-1, 2012]. Der Grundsatz der Funktionsbeherrschung greift den Unsicherheitsgedanken als Mangel an Korrelation zwischen den funktionellen Anforderungen und den Anforderungen aus den GPS-Spezifikationen auf und benennt diesen als eine Mehrdeutigkeit in der Beschreibung der Funktion.

2. SPEZIFIKATION GEOMETRISCHER EIGENSCHAFTEN

2.1 Einteilung der geometrischen Eigenschaften

In Deutschland gilt bis heute die Norm DIN 4760 aus dem Jahr 1982 zur Unterscheidung und als Ordnungssystem der geometrischen Eigenschaften, die in der Norm als Gestaltabweichungen bezeichnet werden. Prinzipiell ist jede reale Oberfläche eine Überlagerung dieser geometrischen Eigenschaften. Die aufgezeigte Trennung wird in dieser Norm den Entstehungsursachen zugeordnet, die auf Parametern des Herstellprozesses basieren, wie z. B. die Formabweichung als Führungsbahnabweichung der Werkzeugmaschine oder die Rauheit als Abbildung des Spanbildungsprozesses am Werkzeug.

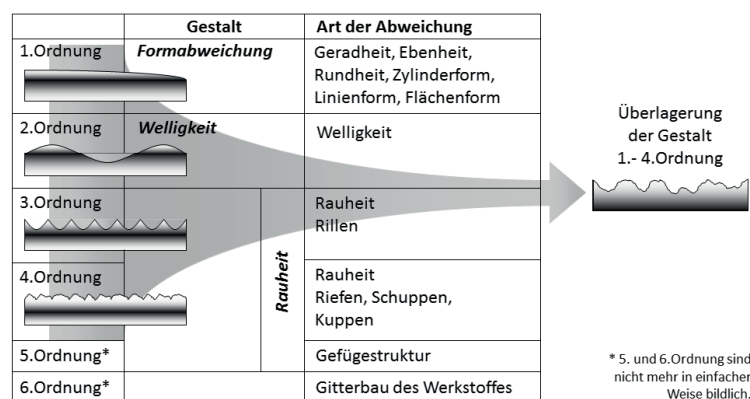


Abb. 5: Ordnungssystem der Gestaltabweichungen [4760, 1982]

Ausgehend von Geometrieelementen und deren Zusammenwirken können Abweichungen an einzelnen Geometrieelementen und zwischen Geometrieelementen entstehen, die durch Toleranzangaben begrenzt werden müssen. Eine Übersicht für diese Einteilung gibt die Abbildung 7.

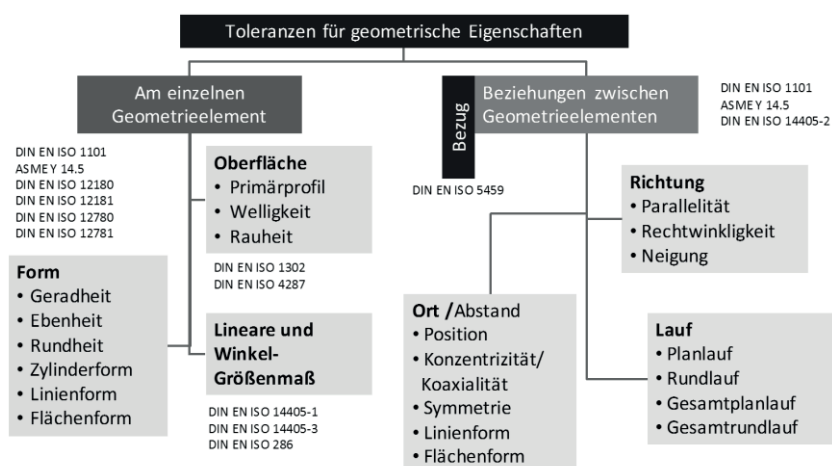


Abb. 6: Einteilung der Tolerierung

Oberflächeneigenschaften, Welligkeit und Form sind dem einzelnen Geometrieelement zugeordnet. Lineare und Winkel-Größenmaße sind ebenfalls

Eigenschaften des einzelnen Geometrieelementes. Für die Tolerierung von Richtungs-, Orts- und Laufabweichungen, als eine Beziehung zwischen Geometrieelementen, sind Bezüge zur Richtungs- und Ortsausrichtung anzugeben.

In [Jian, 2012] und [Stout, 2001] werden neue Ansätze zur Klassifizierung der Oberflächeneigenschaften präsentiert (Abb. 6), die stochastische Oberflächen und strukturierte Oberflächen deutlicher unterscheiden.

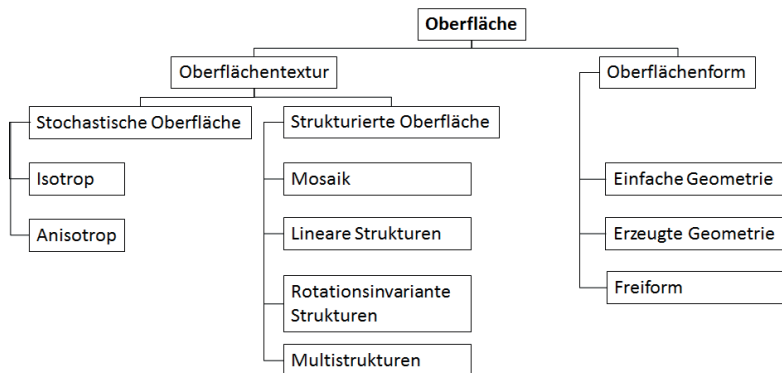


Abb. 7: Neue Struktur der Oberflächenklassifizierung [Jian, 2012]

Die in der Abbildung 6 aufgelisteten Normen sind nur ein Teil der zur Spezifikation möglichen Definitionen. Grundlegende Festlegungen unterscheiden sich für Größenmaße, Oberflächenangaben und Form-, Orts-, Richtungs- und Lauftoleranzen.

2.2 Spezifikation der geometrische Eigenschaften im GPS-System

Für Form-, Orts-, Richtungs- und Lauftoleranzen werden Toleranzzonen (Abb. 8) für den Bereich, in dem das Geometrieelement abweichen darf, festgelegt.

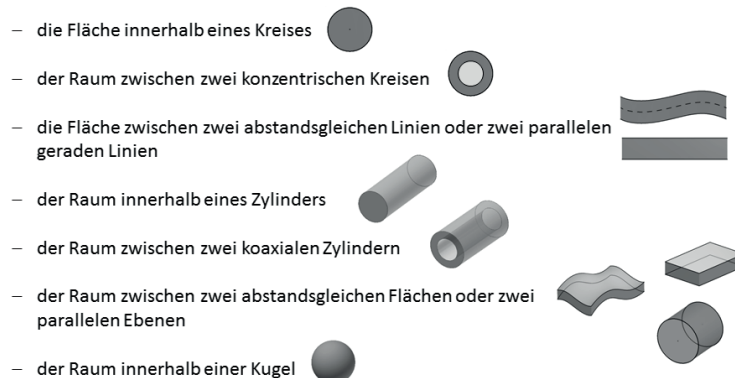


Abb. 8: Toleranzzonen nach DIN EN ISO 1101 [1101, 2014]

Alle Abweichungen innerhalb dieser Zone sind erlaubt. Formabweichungen, z. B. einer Ebene (Abb. 9), können innerhalb der Toleranzzone liegen, aber sehr verschieden ausgeprägt sein. Diese Unterschiede sind derzeit nicht über diese Toleranzzonenansätze beschreibbar.

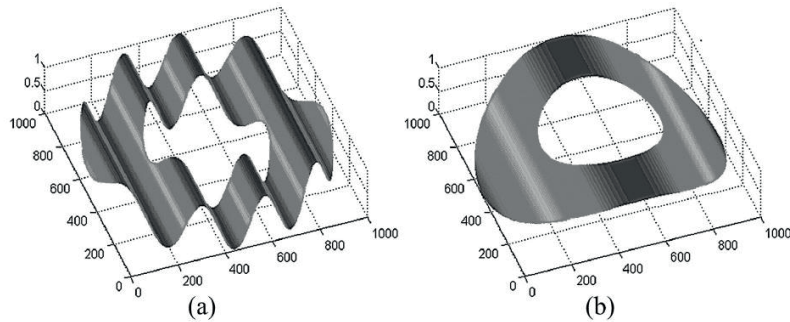


Abb. 9: Formabweichungen einer Fläche mit gleicher Ebenheitsabweichung [Wang, 2014]

Festlegungen zur Oberflächenbeschaffenheit werden in profil- und flächenhafte Kenngrößen unterschieden. Für die Rauheit werden Form- und Welligkeitsanteile durch Filterung abgetrennt. Dabei wird nach heutigem Stand der Normung ein linearer Profilfilter nach Gauß [16610-21, 2013] eingesetzt. Abbildung 10 zeigt neben der Rauheitsangabe die Trennung in Welligkeits- und Rauheitsprofil als Differenz des Primär- und Welligkeitsprofils.

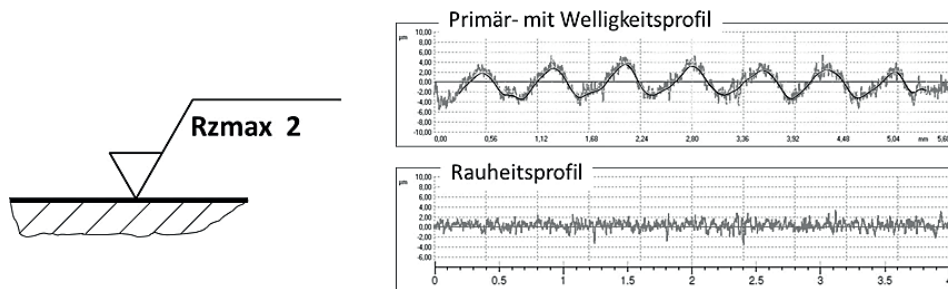


Abb. 10: Rauheitsangabe nach [1302, 2002] und Oberflächenprofile

Mit der Veröffentlichung der Norm DIN EN ISO 25178 Teil 2 im Jahr 2012 stehen zusätzlich flächenhafte Parameter zur Verfügung, die gleich den Profilkenngrößen auf einer Trennung der Oberflächenanteile basieren.

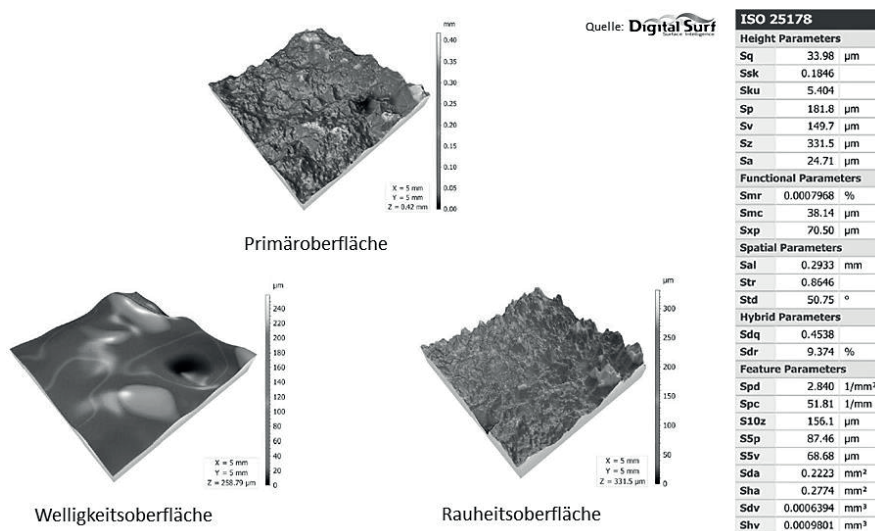


Abb. 11: 3D Oberflächencharakterisierung nach DIN EN ISO 25178 Teil 2 [25178, 2012].

Die darin beschriebenen Amplituden- und Materialverteilungsgrößen sowie Volumenkenngößen ermöglichen umfassende Spezifikationen und Oberflächencharakterisierungen, die heute nur bedingt in der Industrie zum Einsatz gebracht werden. Beispielhaft gibt Abbildung 11 die 3D-Oberflächeneigenschaften, abgeleitet aus einer 3D-Primär-, Welligkeits- und Rauheitsoberfläche, wieder.

Welche Anteile der Oberfläche wie detailliert betrachtet und definiert werden müssen ist abhängig von der Funktion der Oberfläche oder dem zu bewertenden Herstellungsverfahren. Mit Konzentration auf die Funktionseigenschaften sollen im folgenden Abschnitt Anforderungen an die Definition von Funktionseigenschaften abgeleitet werden.

3. FUNKTIONSEIGENSCHAFTEN

In Deutschland existiert die DIN 4764 zur Einordnung von Funktionsflächen. Dabei werden mechanisch nicht belastete Oberflächen, spannungsbeanspruchte Oberflächen ohne Relativbewegung und reibungsbeanspruchte Oberflächen mit Relativbewegung zur Gegenfläche unterschieden (Abb. 12). Empfehlungen zur geometrischen Auslegung dieser Flächen fehlen.

FUNKTIONSFLÄCHEN		
1. Mechanisch nicht bzw. gering belastete Oberflächen	2. Spannungsbeanspruchte Oberflächen meist ohne Relativbewegung	3. Reibungsbeanspruchte Oberflächen meist mit Relativbewegung zur Gegenfläche
1.1 Sichtfläche	2.1 Spannungsgrenzfläche	3.1 Gleitfläche
1.1.1 Blickfläche	2.2 Grifffläche	3.1.1 Trockengleitfläche
1.1.2 Kehrfläche	2.3 Fügefläche	3.1.2 Schmiergleitfläche
1.2 Schichtgrundfläche	2.3.1 Haftfläche	3.1.3 Schleiffläche
1.3 Prüfffläche	2.3.2 Anlagefläche/Auflagefläche	3.1.4 Schneidkörperfläche
1.4 Elektrische Kontaktfläche	2.3.3 Dichtfläche	3.1.5 Dichtfläche (bewegt)
	2.3.4 Richtfläche	3.2 Wälzfläche
	2.3.5 Spielpassfläche	3.3 Glättfläche
	2.3.6 Übermaßpassfläche	3.4 Strömungsfläche
	2.4 Verbindungsfläche	3.5 Bremsfläche, Kupplungsfläche
	2.5 Stoßfläche	

Abb. 12: Einteilung der Funktionsflächen nach DIN [4764, 1982]

Bruzzzone [Bruzz, 2008] unterscheidet darüber hinaus physikalische, technologische und biologische Funktionseigenschaften. Die Unterteilung dieser Funktionseigenschaften in Abbildung 13 ordnet z. B. Reflexionseigenschaften den physikalischen und Reibung oder Verschleiß den technologischen Eigenschaften von Oberflächen zu. Wie in der DIN 4764 werden auch in dieser Veröffentlichung Funktionen, die den Kontakt zwischen zwei Bauteilen bedingen, und Oberflächenphänomene ohne Kontakt, wie z. B. Reflexion, unterschieden.

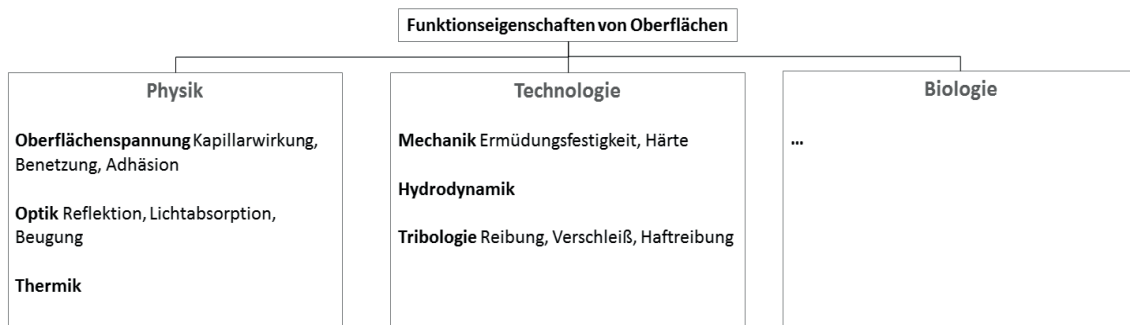


Abb. 13: Funktionseigenschaften von Oberflächen nach [Bruzz, 2008].

Eine reale, in Kontakt stehende Oberfläche setzt sich in vielen Fällen aus Anteilen der Rauheit, aber auch Welligkeit und Form zusammen. Die Position und Richtung des Geometrieelementes bewirkt zusätzlich, dass einzelne Anteile der Oberfläche stärker oder weniger stark in Kontakt treten. Beispielhaft soll dies an der Dichtfläche eines Zylinderkopfes eines Verbrennungsmotors betrachtet werden (Abb. 14).

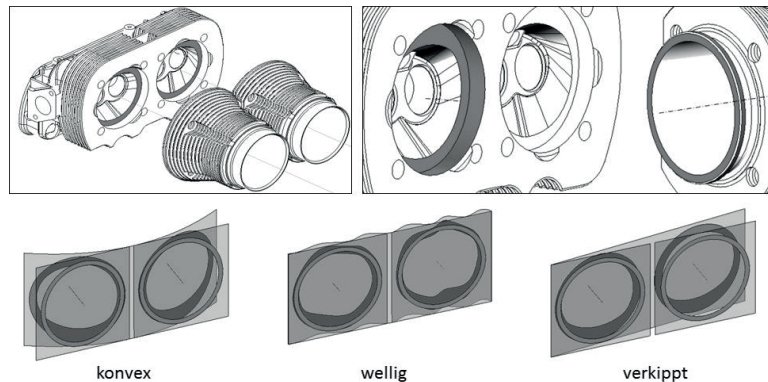


Abb. 14: Einflüsse auf die Abdichtfunktion an einem Zylinderkopf [Weiß, 2016].

Die Abweichungen der Oberfläche des Zylinderkopfes dürfen nicht größer sein, als durch die Anschraubkraft überwunden werden können. Es ist heute bereits möglich, die Kraft zu bestimmen, mit der eine elastische und auch plastische Deformation möglich ist, um die Dichtheit zu gewährleisten. Welligkeits-, Form und Richtungsabweichungen müssen dafür aber ganzheitlich in ihrem Zusammenwirken betrachtet werden.

Ein zweites Beispiel für die Betrachtung der Spezifizierung der Funktionseigenschaften soll der Funktionsfall Fügen oder Paaren sein. Hierfür bietet das GPS-System mit der Hüllbedingung [14405-1, 2011] eine funktionsnahe Spezifikationsmöglichkeit. In der Abbildung 15 sind die beiden Grenzen, die sich aus der Angabe der Toleranzen und dem E im Kreis ergeben, gegenübergestellt. Besonders das Hüllelement als formideales Gegenstück stellt sicher, dass das Gegenstück gefügt werden kann. Auch dabei werden die Anteile der Oberflächenrauheit, der Form und der Parallelität der Mantellinien ganzheitlich betrachtet. Kritisch kann dabei die nichtbetrachtete Verteilung des Materials sein. Verschleißverhalten und die Berechnung zur Übertragung von

Kräften, die auf diesem Konzept der reinen Maßbetrachtung basieren, sind somit nicht sicher.

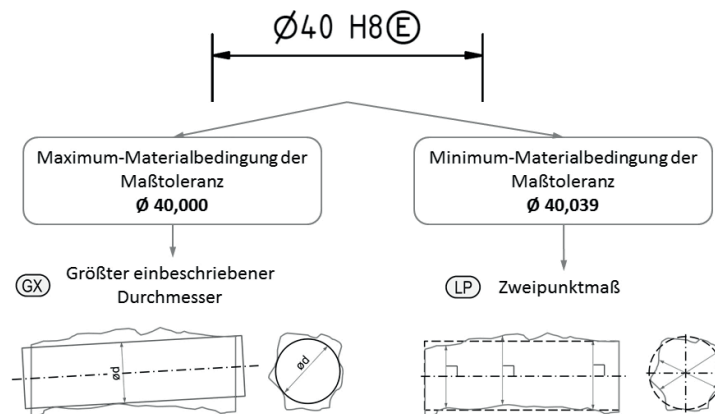


Abb. 15: Hüllbedingung für eine Bohrung entsprechend DIN EN ISO [17450-1, 2011]

Ziel der geometrischen Funktionsbeschreibung sollte abgeleitet aus diesen Darstellungen sein, dass das Zusammenwirken der geometrischen Eigenschaften den Funktionseigenschaften gegenübergestellt wird.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Heutige Vorgehensweisen zur geometrischen Spezifikation basierend auf dem internationalen GPS-System sind stark geprägt von der Beurteilung von Fertigungsverfahren. Die auf dem ganzheitlichen Wirken der geometrischen Eigenschaften beruhenden Funktionseigenschaften sind damit nur unzureichend abzubilden.

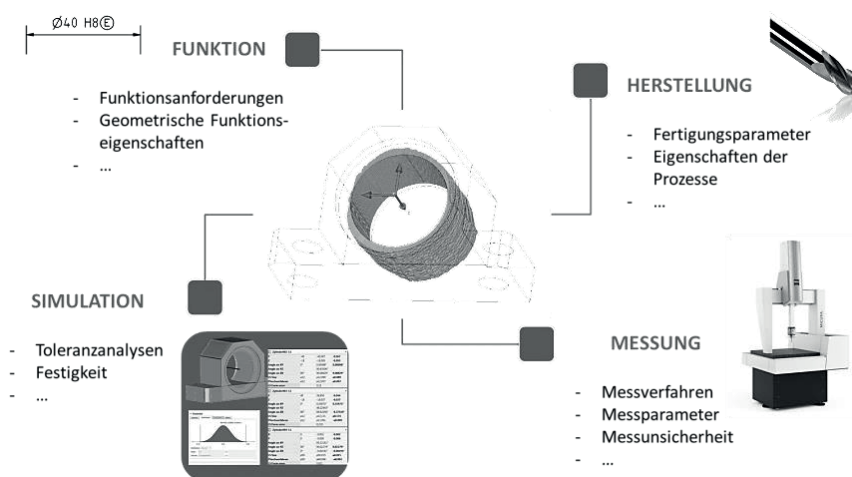


Abb. 16: Mehrdimensionale geometrische Betrachtungen

Es sind neue Ansätze nötig, um die funktions- und fertigungsbeschreibenden Eigenschaften klarer abzubilden. Dafür sind, wie in Abbildung 16 dargestellt, mehrere Dimensionen im Sinne der Zuordnung zu Funktion, Simulation, Herstellung und Verifikation der geometrischen Eigenschaften zu betrachten.

5. QUELLEN

- [1101, 2014] DIN EN ISO 1101:2014: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf.
- [1302, 2002] DIN EN ISO 1302:2002: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit.
- [4760, 1982] DIN 4760:1982: Gestaltabweichungen.
- [4764, 1982] DIN 4764:1982: Oberflächen an Teilen für Maschinenbau und Feinwerktechnik; Begriffe nach der Beanspruchung.
- [16610-21, 2013] DIN EN ISO 16610-21:2013: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter.
- [14405-1, 2011] DIN EN ISO 14405-1:2011: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 1: Längenmaße
- [14406, 2011] DIN EN ISO 14406:2011: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Erfassung.
- [17450-1, 2012] DIN EN ISO 17450-1:2012: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung.
- [17450-2, 2000] DIN EN ISO 17450-2:2013: Geometrische Produkt-spezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 2: Grundsätze, Spezifikationen, Operatoren, Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten.
- [25178, 2012] DIN EN ISO 25178-2:2012: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen.
- [Bruzz, 2008] Bruzzone, A. A. G.; Costa, H. L.; Lonardo, P. M.; Lucca, D. A.: Advances in engineered surfaces for functional performance. CIRP Annals-Manufacturing Technology 57 (2008), 750–769.
- [Evans, 1999] Evans, C. J.; Bryan, J. B.: “Structured”, “Textured” or “Engineered” Surfaces CIRP Annals-Manufacturing Technology, Volume 48, Issue 2, 1999, 541-556.
- [Jian, 2012] Jiang, X. J.; Whitehouse, D. J.: Technological shifts in surface metrology. CIRP Annals-Manufact. Techn. 61 (2012), 815–836.
- [Scott, 2001] Scott, P.; Blunt, L.: A contribution to the debate on surface classifications-random, systematic, unstructured, structured and engineered. Inter. J. of Mach. Tools & M. 41 (2001), 2039–2044.
- [Wang, 2014] Wang, M.; Xi, L.; Du S.: 3D surface form error evaluation using high definition metrology. Precis. Engin. 38 (2014), 230–236.
- [Weiß, 2016] Weißgerber, M.; Ebermann, M.; Gröger, S.; Leidich, E.: Requirements for Datum Systems in Computer Aided Tolerancing and the Verification Process. Procedia CIRP, Vol. 43, (2016), 238–243.

FORM REMOVAL ASPECTS ON THE WAVINESS PARAMETERS FOR STEEL SHEET IN AUTOMOTIVE APPLICATIONS: FOURIER FILTERING VERSUS POLYNOMIAL REGRESSION

Vermeulen Michel^{1,2}, Balabane Mikhael³, Malle Céline⁴

¹ Ghent University, Mechanical Construction and Production, michel.vermeulen@ugent.be

² OCAS / ArcelorMittal Global R&D Ghent, michel.vermeulen@arcelormittal.com

³ Université de Paris13, Dept. de Math., Inst. Galilee, balabane@math.univ-paris13.fr

⁴ ArcelorMittal Global R&D, Maizières les Metz, celine.malle@arcelormittal.com

Abstract: Premium car makers attach great importance to the visual appearance of the painted car skin as an indication of product quality. The “orange peel” phenomenon constitutes a major problem here. It is not only depending on the paint’s chemical composition and application method, but also on possible waviness components in the sheet substrate. Therefore one is searching hard for a valuable waviness parameter to quantify the substrate’s fitness for purpose. A technically emerging problem is how to remove the form from the measured signal, which is indeed not significant to the orange peel phenomenon. This paper will compare two commonly used approaches: i.e. Fourier filtering versus polynomial regression and will reveal and quantify some common aspects in terms of wavelengths.

ROUGHNESS, WAVINESS, FORM REMOVAL, FOURIER, LEGENDRE

1. INTRODUCTION: INDUSTRIAL RELEVANCE

Cars are sold in the showroom and emotion often comes before rational reasoning. The automotive industry dedicates numerous studies to analyse the consumer behaviour when purchasing a new car. The perceived quality of a car is judged within the first 10 minutes of the “encounter”. While the outer skin of the car constitutes a large area of “interface to the consumer”, the exterior paint plays a dominant role here, see Figure 1. [Gerhardt, 2013]

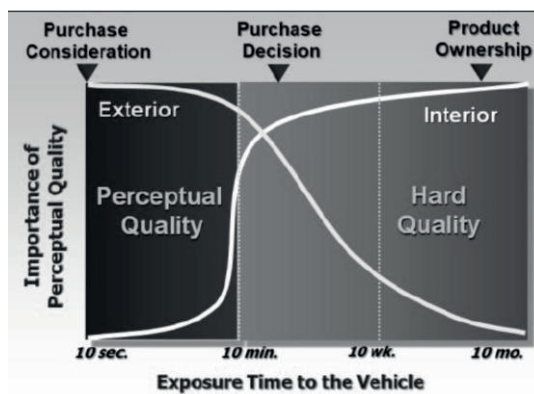


Fig. 1: Perception of Product Quality and the role of the Exterior Appearance [Gerhardt, 2013]

Carmakers set up special test rigs to assess the visual perception of painted panels and are trying to establish the relation between personal judgments and the quantitative measurements on the painted surface [Dauser, 2013]. In such a setup, a straight line source is reflected towards the panels, and the operator must decide on his preference, based on the distortion of the reflected line source, see Figure 2, left.



Fig. 2: Left: Reflection of straight line light on two panels with different quality [Dauser, 2013], Right: Discriminating short and long waves in a painted panel [Gerhardt, 2013]

But very soon, one is confronted with the problem of discriminating the scale of this distortion, see Figure 2, right. Moreover, there are still some debates on how to correlate the paint measurements with the visual perception, but one generally accepts that the longer waviness components are quite detrimental and cause the so called “orange peel” aspect, as being in the range of ~ 1 mm up to 10 or even 12 mm: [Gerhardt, 2013] and [Schneider, 2013].

Extensive research has been performed in the past and is still on-going on how the topography of the subsequent layers is evolving. It is obvious that the chemical paint composition and the paint process are dominating the formation of the top layer when painting a sheet panel. It is found that fine surface structures are easily levelled away due to surface tension effects during curing. Coarser structures however cannot be hidden completely or are even emphasized, especially on vertically painted panels. Research on this topic is twofold. First, one has the purely experimental work based on 3D-profiling as reported in e.g. [Meseure, 1996], Figure 3 and in [Deutscher, 2003] or on 2D-profiling, e.g. Figure 4 [Kurzynski, 2015]. It finally leads to fundamental modelling of the physical phenomena of wetting, gravity and rheology-effects, curing, etc., as is done in e.g. [Schneider, 2013].

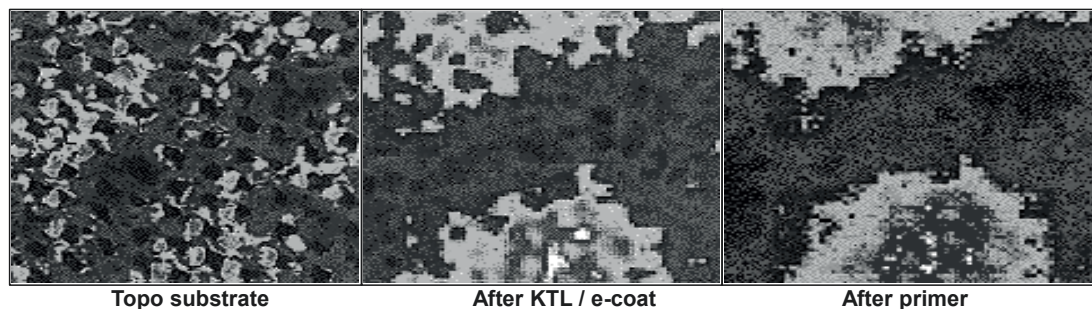


Fig. 3: Levelling effect of subsequent layers [Meseure, 1996]

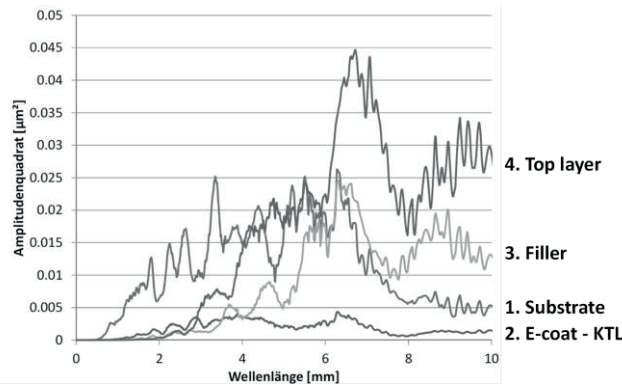


Fig. 4: Evolution of the power spectrum of subsequent layers during painting [Kurzynski, 2015]

During the last 5-10 years, environmental concerns have led to the use of water based paints, while weight and cost savings considerations brought up a reduction of layer thicknesses and even the omission of the primer layer. All these elements together tend to emphasize the importance of the substrate topography, see Figure 4 from [Kurzynski, 2015]. In this way steel producers are forced to guarantee on their products not only some strict roughness ranges (for both painting and stamping purposes, as per [EN10049, 2013]). These products also have to remain below a limit value of waviness in order to minimize the effect of the unpainted substrate topography on a potential “orange peel” appearance on the final painted car skin.

2. PROBLEM DEFINITION: TOWARDS A WAVINESS PARAMETER?

The paint process essentially is a 3D phenomenon, and profound (modelling) research should be validated by 3D measurements. As indicated before, the area to be measured must be quite large, due to the wavelength range to be covered and the fact that one needs 3 or preferably 5 times this length for an adequate spectral analysis. One rapidly arrives at square or rectangular areas of 30 to 50 mm size. Tactile 3D-profiling instruments are slow due to limitations in traversing speed. Faster optical instruments are becoming more affordable nowadays. They can acquire 3D areas in one single scan, but the area of a “single shot” is limited: indeed intending for a high resolution drastically reduces the field of view. Modern optical instruments do offer stitching possibilities. However, harmful waviness components have amplitudes in the order of 0.1 to 1 µm while the roughness range is up to 50 times larger. It is clear that one has to be very careful with stitching - either software or hardware stitching - in order to not introduce any “artificial waviness” that is physically not present in the real surface.

For measurements in daily and possibly shop floor conditions, one is still forced to rely on 2D measurements by profiling a set of (parallel) traces to reduce the variability of the resulting parameters. Even in 2D one has to be aware of the magnitude difference between waviness and roughness, i.e. only datum based traversing units can be used, both for tactile and optical point sensors.

Elaborating a waviness parameter, means treating the 2D measured profiles for removing the roughness and the form; see Figure 5. Indeed, as said before, roughness is virtually levelled away during the paint application and shouldn't affect the waviness parameter. Further, the general form of the sample is not a defect, and should be eliminated by means of a form removal procedure.

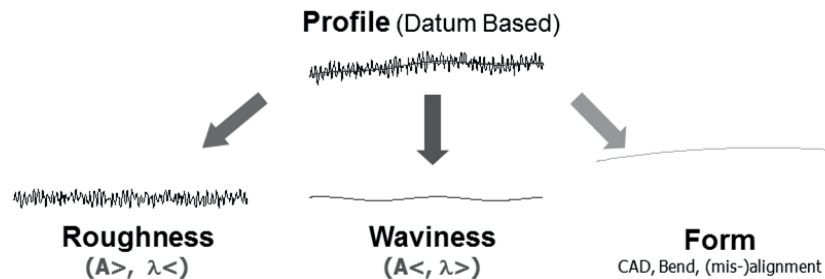


Fig. 5: Splitting the measured profile into roughness, waviness and form

Within the ISO TC213, current work on surface topography standardisation concentrates a lot on filtering and mainly on different variants of “splitting” roughness and waviness to be extracted from the raw measured data – both for profiles and surfaces. Little emphasis is given so far to the not less important problem of form removal, which is classified in general terms as a “F-operator”.

The analysis described hereafter originated within the VDEh-Arbeitskreis Rauheit during the elaboration of a guideline for the steel and automotive industry. Within this working group, first basic work was performed in a European Project CARSTEEL [Deutscher, 2009]. In this project a multitude of waviness parameters were compared as they were practised in former days. The CARSTEEL project resulted in a guideline [SEP1941, 2012] which includes the two remaining methods as they are used nowadays.

3. FORM REMOVAL

The SEP1941 describes the waviness parameters $Wsa(1-5)$ and $Wa0.8$ and two different methods for form removal are included, see Figure 6.

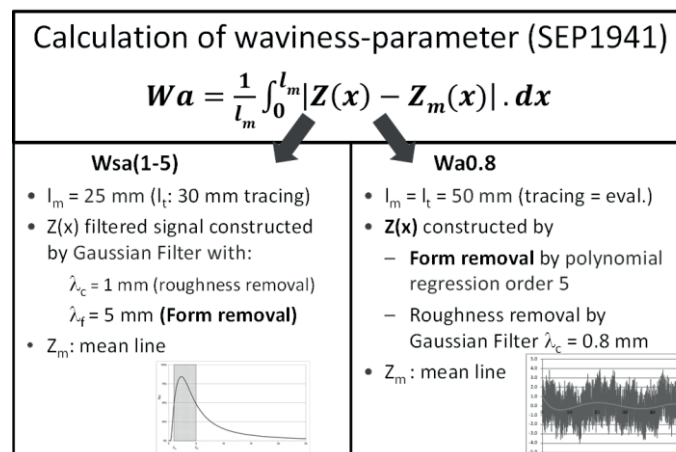


Fig. 6: Definition of Waviness Parameters $Wsa(1-5)$ and $Wa0.8$ [SEP1941, 2012]

In addition to a difference in measuring length, one main difference is the way how form removal is performed: either Fourier (Gaussian) filtering or polynomial regression. A recently finished Project WAVENORM [Kurzynski, 2015] intended to acquire practical experience with both methods. In the following, differences and similarities will be investigated in more detail.

3.1 Fourier decomposition and form removal by Gaussian filtering

Before tackling the two above mentioned approaches, it is necessary to recall some basics in signal decomposition. In principle there are several methods, e.g. Fourier, wavelets, etc. Wavelet decomposition is used throughout the world of audio and video for data compression, but will not be discussed here.

Fourier decomposition is probably the best known. It is most popular in noise and vibration problems and was originally developed for time signals. It is however also vastly applied to 2D-profiles and even to 3D-surfaces. Fourier (°1768-°1830) demonstrated that any function of length Lt can be written as a sum of sine functions of well-defined frequencies, each with an amplitude b_n and a phase φ_n . If applied to a digital format with N samples within Lt , one gets:

$$z = f(x) = b_0 + \sum_{n=1}^{N/2} b_n \cdot \sin(2\pi f_n \cdot x + \varphi_n), \text{ with } f_n = n \cdot \Delta f \text{ and } \Delta f = 1/Lt \quad (1)$$

In surface topography, one is merely interested to use wavelengths i.s.o. frequencies; each component's wavelength is then:

$$\lambda_n = 1/f_n = Lt/n \quad (2)$$

A plot with the amplitudes b_n versus frequencies contains equally spaced frequency components. However if plotted versus wavelengths the gap between adjacent points is variable; especially the longer wavelengths are spaced quite far apart. As an example, the theoretical profile of the CARSTEEL Waviness gauge is used to demonstrate this effect, see Figure 7. The profile consists of a random roughness taken from a real sample, which is cut-off at 2.5 mm and 3 sine signals with amplitudes A and wavelengths λ of respectively: (i) S1: $A = 0.7 \mu\text{m}$ & $\lambda = 4.52 \text{ mm}$, (ii) S2: $A = 1.2 \mu\text{m}$ & $\lambda = 3.31 \text{ mm}$ and (iii) S3: $A = 0.8 \mu\text{m}$ & $\lambda = 1.5 \text{ mm}$. In addition a parabolic bow of $30 \mu\text{m}$ is introduced, representing some bend as found in real samples.

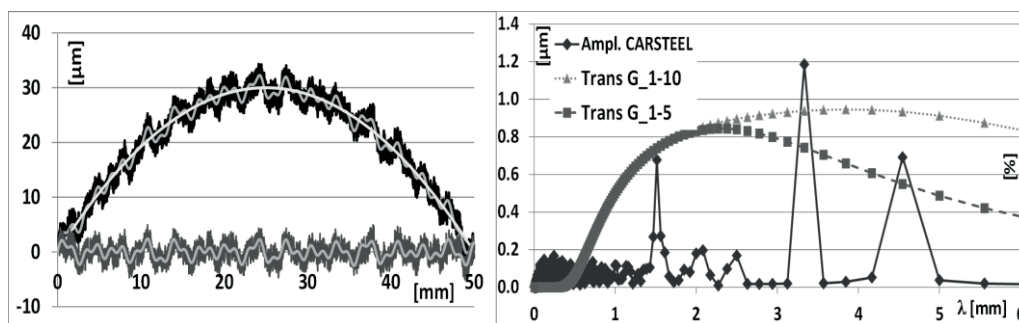


Fig. 7: Left: The theoretical CARSTEEL waviness Gauge profile; top curve includes a bow, Right: Amplitude versus wavelength with the transmission curves for Gaussian band filtering, according to SEP1941 but with two different cut-offs for the form removal

Remark that increasing the sampling rate or decreasing the spacing Δx between adjacent measured points (i.e. increase of N), doesn't affect this variable spacing phenomenon. The only way to improve the resolution in the longer wavelength range is to increase the measurement length L_t . A measure that is pretty hard to implement in practice, as this would result in even longer measuring times and also in higher instrument costs.

Filtering a signal can then be performed by reducing or zeroing selected spectral components. In the surface topography community one commonly uses the Gaussian filter characteristic, given by its transmission curve for either low pass, high pass [ISO 16610-21, 2011] or even band pass filter as e.g. in [SEP1941, 2012]. The transmission curves are well described analytically in both references. For a band pass filter with a roughness cut-off λ_c and a form cut-off λ_f , equation (3) is given below with B_0 and B_b being the amplitudes of respectively the original signal and of the band filtered components. The “cut-off wavelength” means the point where the transmission is exactly 50% and one uses the terms low and high from the wavelength point of view (and not in the frequency space).

$$B_b/B_0 = 2^{-(\lambda_c^2/\lambda^2)} \cdot \left[1 - 2^{-(\lambda_f^2/\lambda^2)} \right] \quad (3)$$

Note that reconstructing the filtered signal is readily possible, as only the amplitudes are reduced and the phase information remains unaffected. This eliminates phase distortion, as was found in the earliest and now out-dated analogue roughness devices.

3.2 Form removal by Polynomial regression

It's commonly known - although quite intuitive - that fitting a higher degree of polynomial will lead to a more “flexible” fit, which includes higher frequencies (or shorter wavelengths) to be subtracted from the raw data. However, in spite of being available in most software packages, little attention has been given until now to **quantify** these effects.

3.2.1. “Pseudo transmission curves” for polynomial regression

A first somehow naïve attempt is described hereafter by building “pseudo transmission curves”. The aim is to get a first idea of how a classic polynomial regression behaves and whether there is some cut-off effect, when looking as from the Fourier point of view. Although we know that polynomial regression is not comparable to a Gaussian filtering, one nevertheless can try to establish “experimentally” a transmission curve. This has been done with the help of the same approach as used in system identification problems, see thereto the scheme of Figure 8. The system is “fed” with sine-signals of variable wavelength but constant amplitude, e.g. 1 μm , similar to the “sweeping method” in system identification. Then either the Gaussian form filter is used or a polynomial regression is performed. The W_a -parameter is calculated solely based on the “filtered” profile, resulting in a set of W_a -values for various wavelengths. These are divided by the theoretical value $W_{a\text{theo}} = 2A/\pi$, being

independent of wavelength. From this, a “pseudo transmission curve” is built, see Figure 8, right.

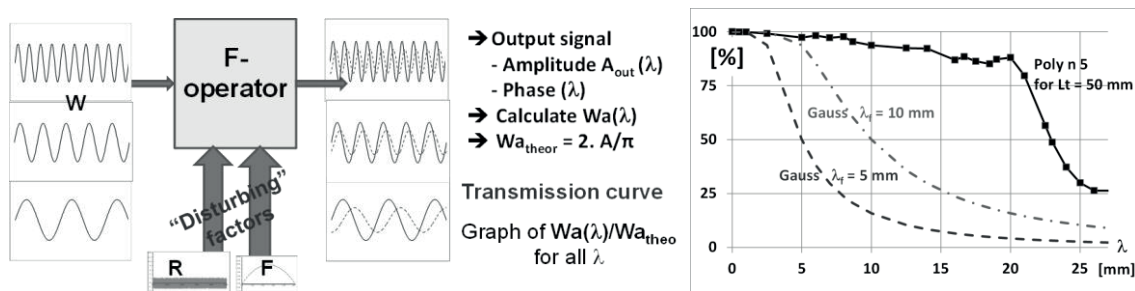


Fig. 8: Left: “Experimentally” building a transmission curve for polynomial regression, Right: Result for “Pseudo transmission curve” for polynomial regression order 5, compared with 2 Gaussian curves for $\lambda_f = 5$ and 10 mm

3.2.2. Legendre polynomials

The use of Legendre polynomials is rooted in the geometric structure of signal processing, enabling a projection to replace the usual classic polynomial fitting, and hence resulting in a substantial gain of computing time and facilitating a straightforward interpretation in terms of wavelengths. Legendre ($^{\circ}1752$ - $^{+}1833$) established a system of special polynomials, which are used in various scientific areas, e.g. quantum mechanics. They are commonly expressed in their normalised form, i.e. in the interval $[-1, +1]$ for both x and $P_n(x)$. The equations for the first 5 polynomials, with their graphical representations are given in Figure 9. When analysing the normalised Legendre polynomials, one can easily identify “waves” with a wavelength, which is solely depending on the order n , i.e. $2/(n-1)$.

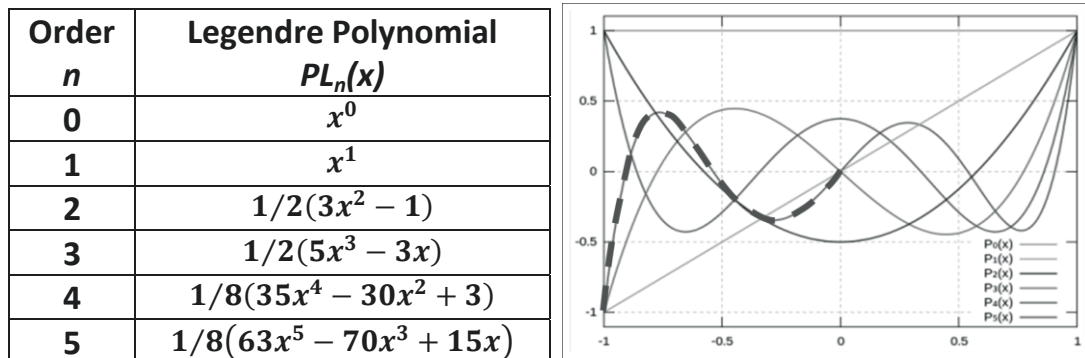


Fig. 9: Left: Legendre polynomials (order $n = 0 - 5$), Right: graphical representation, with indicating one “wave” for PL_5

3.2.3. Classic polynomial regression versus Legendre polynomial regression

It is interesting to look at the similarity between classic and Legendre polynomials (PL_n): see equations resp. (4) and (5).

$$Z(x) = a_n x^n + \dots + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x^1 + a_0 \quad (4)$$

$$Z(x) = A_n \cdot PL_n(x^*) + \dots + A_3 \cdot PL_3(x^*) + A_2 \cdot PL_2(x^*) + A_1 \cdot PL_1(x^*) + A_0 \quad (5)$$

Thereeto, a rescaling is necessary for the Legendre polynomials from the interval $[-1, +1]$ to the measured profile with interval $[0, Lt]$, using equation (6).

$$x^* = (2x - Lt)/Lt \quad (6)$$

This rescaling leads to adjust the cut-off wavelength for a measured profile into:

$$\lambda_{PL_n} = 2/(n - 1) \cdot Lt \quad \text{with } n > 1 \quad (7)$$

Introducing the full expressions of the Legendre polynomials in (5) and equalling the coefficients of the same power in both equations (4) and (5) yield the equations (8). For simplicity, only order 4 is written explicitly, but the general form is valid.

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1/2 & 0 & 3/8 \\ 0 & 1 & 0 & -3/2 & 0 \\ 0 & 0 & -3/2 & 0 & -30/8 \\ 0 & 0 & 0 & 5/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 34/8 \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{Bmatrix} \quad (8a)$$

Or in general:

$$\{a_n\} = [M_n] * \{A_n\} \quad (8b)$$

Note that the Matrix M_n is only depending on the coefficients of the *normalised* Legendre polynomials. This means that with the help of a simple and unique transformation matrix (one for each order), one can swap from “classic” polynomials to the Legendre polynomials and vice-versa.

As seen above, one can allocate wavelengths to the Legendre polynomials, so the unique transformation enables to extend this feature to the classic polynomials. Each fit to another profile will yield other coefficients $a_0 \dots a_n$ and $A_0 \dots A_n$, but the transformation matrix M_n remains unchanged, as it contains only the coefficients of the normalised Legendre polynomials. This means that the cut-off wavelength remains unaffected and **is only depending on the order of the polynomial fit AND the measuring length Lt** . This is shown in Figure 10.

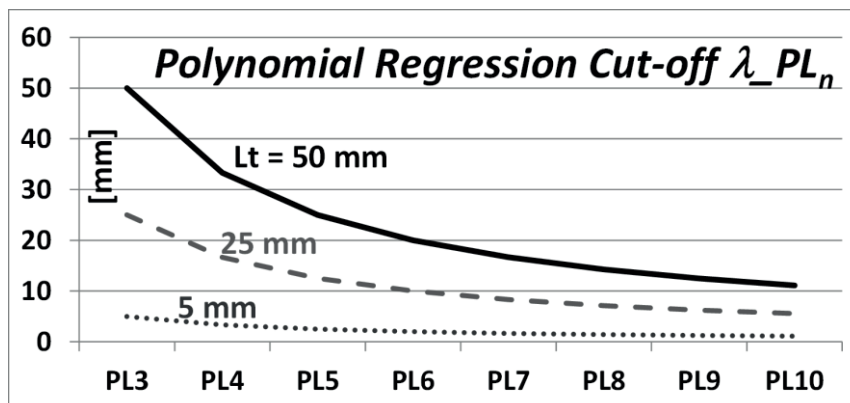


Fig. 10: Cut-off wavelength depending on the order of the fitted polynomial and the measuring length Lt , for different Lt values 50, 25 and 5 mm

For any profile of $L_t = 50$ mm, a P5 polynomial (i.e. order 5) gives a cut-off value of ~ 25 mm. This is remarkably in agreement with the naïve approach of “pseudo transmissions curves” as shown in Figure 8. The curves for $L_t = 25$ mm and especially for 5 mm indicate that one should be careful in applying polynomial form removal on too short profiles. But of course this remark is equally valid for Gaussian filtering, where the cut-off value also has to be chosen carefully with respect to the measuring length.

4. APPLICATION TO THE CARSTEEL WAVINESS GAUGE

The example given in section 3.1 is further used to quantitatively compare the polynomial regression with Gaussian filtering method for 2 different values of the form cut-off $\lambda_f = 5$ mm and 10 mm, see Figure 11, left. It is clear and expectable that a cut-off $\lambda_f = 5$ mm will heavily decrease the amplitude of the S3 component having a wavelength of 4.52 mm, being close to this cut-off value. This is of course a result of the shape of the Gaussian Filter. It is even more interesting to check the important influence of the 3 form removal methods on the final Wa-parameter itself: see Figure 11, right. One observes that the polynomial form removal is pretty close to the theoretical reference value, and even better than a Gaussian filtering with $\lambda_f = 10$ mm.

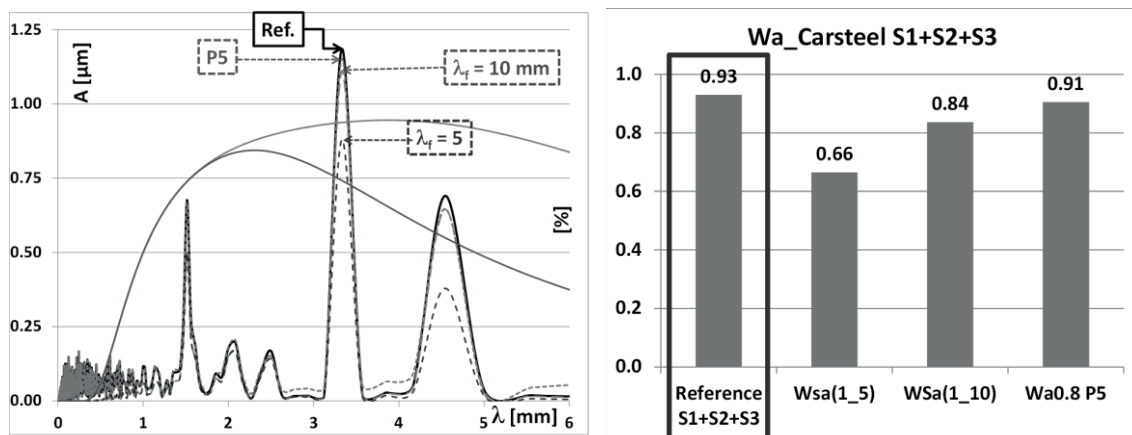


Fig. 11: Left: Reduction of the Fourier spectrum components for the CARSTEEL gauge profile, Right: Influence of the different approaches for form removal on the deviations from the theoretical Wa-parameter

5. CONCLUSION

The industrial importance of paint quality perception has been evoked, as well as most influencing factors. Due to environmental and economic reasons, the waviness on the unpainted sheet metal becomes increasingly important, hence the need for a reliable and quantifiable waviness parameter. Such a parameter should remain unaffected by the roughness and by any shape, whether it is a bend in a laboratory sample or the intended (e.g. CAD) shape of a real component.

It was clearly demonstrated how classic polynomial regression can be formulated in terms of wavelengths or frequencies, through the use of the concept of Legendre polynomials. In this way one can use polynomial fitting as a valuable tool for form removal.

This approach was applied to the industrially relevant example of a physical waviness gauge as it was developed in the European CARSTEEL project. It was demonstrated that deviations from the theoretical value of the waviness parameter on this gauge, are acceptable when using a 5th order polynomial regression. These deviations are smaller than when a Gaussian band filtering is used even with a form cut-off of 10 mm.

6. REFERENCES

- [Dauser, 2013] Dauser, T.: Appearance Perception and Preference. Conference paper: European BYK-Gardner User Meeting 2013.
- [Deutscher, 2003] Deutscher, O.: Untersuchung über die Ursachen von längerwelligen Strukturanteilen in Feinblechoberflächen und deren Einflüsse auf das Lackierergebnis. Forschungsbericht P 402 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., 2003.
- [Deutscher, 2009] Deutscher, O.; Paesold, D.; et al.: Characterizing the surface waviness of hot dip galvanized steel sheets for optical high-quality paintability (CARSTEEL). ISBN 978-92-79-11303-1, European Communities, 2009.
- [Gerhardt, 2013] Gerhardt, L.: Global Competitive Benchmarking. Conference paper: US BYK-Gardner User Meeting 2013.
- [Kurzynski, 2015] Kurzynski, J.: Erarbeitung einer Normvorlage zur einheitlichen Bewertung des Einflusses der Welligkeit in der Feinblechoberfläche auf die Ausbildung der Decklack-Verlaufstruktur (WAVENORM). VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, 2015.
- [Meseure, 1996] Meseure, K; Scheers, J., et al.: Paint appearance in relation to surface topography. 3rd Sibetex Seminar, OCAS, 1996.
- [Schneider, 2013] Schneider, M.: Causes for the Formation of Surface Structures on Paint Films. Conference paper: European BYK-Gardner User Meeting 2013.
- [EN10049, 2013] EN10049:2013: Measurement of roughness average Ra and peak count RPc on metallic flat products.
- [ISO16610-21, 2011] ISO 16610-21:2011: Geometrical product specifications, (GPS) – Filtration – Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters.
- [SEP 1941, 2012] Messung des Welligkeitskennweters Wsa(1-5) an kaltgewalzten Flacherzeugnisse. STAHL-EISEN Prüfblätter des Stahlinsitituts VDEh, 2012.

EINFLUSS DES FERTIGUNGSPROZESSES AUF DIE FEINGESTALT UND FUNKTIONALITÄT VON BAUTEILOBERFLÄCHEN UND DEREN BEWERTUNG

Jörg Schneider, Torsten Schmidt, Jan Edelmann, Matthias Putz

Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Abteilung Systemtechnik für Funktionsoberflächen und Mikrofertigung, joerg.schneider@iwu.fraunhofer.de

Abstract: Technische Bauteile zeichnen sich hinsichtlich ihrer Anforderungen an Maß-, Form- und Lagegenauigkeit, aber auch bezüglich der Ansprüche an die Oberflächenausprägung aus. Insbesondere die Bauteilfeingestalt mit ihrer Oberflächentopographie und -morphologie kann maßgeblichen Einfluss auf die erforderliche Prozesskette, die Produktionskosten bis hin zur Funktionalität des Endprodukts besitzen. Dabei spiegelt sich oftmals die komplette Fertigungshistorie in der Topographie und Randschicht wieder. Die finale Endbearbeitung, als letzter Schritt der Prozesskette nimmt jedoch eine besondere Stellung ein. Die funktionale Gestaltung von Oberflächen erfordert ein hohes Prozessverständnis, die richtige Bewertungsmethodik und die ständige Anpassung an aktuelle Anforderungen. Im vorliegenden Beitrag werden Möglichkeiten zur Modifizierung und Endbearbeitung von Oberflächen für Anwendungen im Bereich Tribologie aufgezeigt. In diesem Zusammenhang wird auf die Bedeutung der Oberflächenmesstechnik als Schnittstelle von Simulation, Fertigung und Funktionsbewertung eingegangen.

KEYWORDS: FUNKTIONSOBERFLÄCHEN, ENDBEARBEITUNG, TRIBOLOGIE, RANSCHICHT, OBERFLÄCHENMESSTECHNIK

1. EINFÜHRUNG

Maßgeblichen Einfluss auf die Funktionalität eines Bauteils haben dessen Oberfläche und oberflächennahe Randschicht, da dies der Wechselwirkungsbereich zur Umwelt ist. In der Fachliteratur wird dabei von Surface Integrity gesprochen [Jawahir, 2011]. Beispielhaft seien hier tribologisch beanspruchte Oberflächen, Dicht- und Fügeflächen sowie optisch-, thermodynamisch-, haptisch- oder biologisch-funktionale Oberflächen genannt. Jede finale Oberfläche stellt das Ergebnis eines komplexen Fertigungsprozesses dar. Vor diesem Hintergrund stehen anwendungsbezogene Entwicklungen gezielter Endbearbeitungs- und Strukturierungsverfahren sowie deren Einbindung in die Prozesskette im Fokus der Arbeiten vieler Unternehmen. Die Kombination von Fertigungsprozessen kann dabei Oberflächenspannungszustände und -texturen erzeugen, die zur Generierung funktionaler Oberflächen mit angepassten Bauteileigenschaften führen.

Ein Beispiel dafür ist die gezielte Gestaltung von Schneidengeometrien mit der im Zerspanprozess von Powertrainkomponenten eine Verringerung der Korngröße in der Oberflächenrandschicht erreicht werden kann. So eingestellte Oberflächeneigenschaften tragen dazu bei, Reibung und Verschleiß dauerhaft

zu reduzieren. Neben der Randzonenbeeinflussung kann die Oberflächentopographie dieser Antriebskomponenten mit hochpräziser Laserablation oder einem neu entwickelten Strukturrollierverfahren [Schub, 2012] effektiv angepasst werden. Die funktionsbeanspruchten Bauteiloberflächen erhalten dadurch ein definiert eingestelltes, bei Bedarf auch örtlich begrenztes, Ölrückhaltevolumen.

Neben der anforderungsgerechten Auslegung und der reproduzierbaren Fertigung ist die messtechnische Bewertung von Funktionsoberflächen und deren Wirkungsweise ein entscheidender Faktor für das Erreichen der gewünschten Zielstellungen für angepasste Bauteileigenschaften.

2. PRÄVENTIVES FORMBOHREN ZUR MINIMIERUNG VON ZYLINDER-FORMABWEICHUNGEN IM BETRIEB

Bei Verbrennungsmotoren haben Zylinderformabweichungen entscheidenden Einfluss auf das tribologische System Kolben, Kolbenring und Zylinderlaufbahn. 70 - 80 Prozent des ungewollten Ölverbrauches werden an der Kolbengruppe verursacht. Der Reibungsanteil der Kolbengruppe kann bis zu 50 Prozent der gesamten Motorreibung betragen.

Unter Umwelt- und Wirkungsgradgesichtspunkten ist die Minimierung der Zylinderformabweichungen der Bohrungen des Zylinderkurbelgehäuses im Betriebszustand des Verbrennungsmotors ein wesentliches Entwicklungsziel. Die Abweichungen von der idealen Zylinderform entstehen durch statischen Verzug, z. B. durch Montage des Zylinderkopfes, durch quasistatischen Verzug infolge von Temperaturdifferenzen sowie unterschiedlichen Wärmeausdehnungen und dynamischen Verzug sowohl aufgrund von Gaskräften als auch durch den Kolben auf die Zylinderlauffläche übertragene Kräfte [Treppe, 2011].

In Abb. 1 werden maximale Formabweichungen von der ideal zylindrischen Form in der Größenordnung von ca. 50 µm sichtbar. Die größten Abweichungen treten dabei in der oberen Bohrungshälfte kurz unterhalb der Zylinderkopfdichtfläche auf.

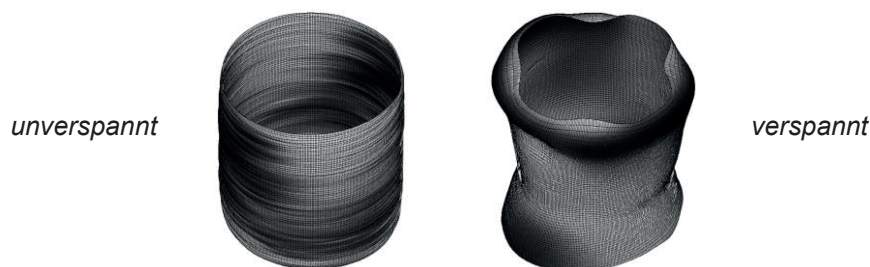


Abb. 1: Montagebedingte Formabweichungen am Zylinderrohr

Im verspannten Zylinderrohr ist die kleeblattförmige Verformung (4. Ordnung) der Zylinderlauffläche mit überlagertem Ovalverzug (2. Ordnung) im oberen Bohrungsbereich (Abb. 1, rechts) deutlich zu erkennen.

Speziell die Verformungen 4. Ordnung, wie sie üblicherweise aufgrund der Krafteinleitung durch die vier Zylinderkopfschrauben auftreten, bereiten Probleme bezüglich der Abdichtung durch die Kolbenringe.

Quasistatische und dynamische Zylinderverzüge können zurzeit weder konstruktiv noch fertigungstechnisch vollständig verhindert oder ausgeglichen werden; statische Verzüge nur mit dem unwirtschaftlichen Einsatz von Honbrillen. Die fertigungstechnische Herausforderung besteht in der effektiven Feinbearbeitung der Zylinderlauffläche, welche eine ausreichend flexible und präventive Unrundbearbeitung ermöglicht.

Für die Erzeugung von dreidimensionalen unrunden Bohrungen in Endbearbeitungsqualität für Zylinderkurbelgehäuse wurde eine adaptive Spindelhalterung für ein Bearbeitungszentrum entwickelt. Die Spindelhalterung verfügt über zwei rotatorische Freiheitsgrade, welche durch ein Festkörpergelenk realisiert werden. Dieses liegt im Kraftfluss von acht Piezoaktoren in differenzieller Anordnung, die die Lagerung bzw. gezielte hochdynamische Verkipfung der Spindel und schlussendlich des Werkzeuges herbeiführen (Abb. 2).

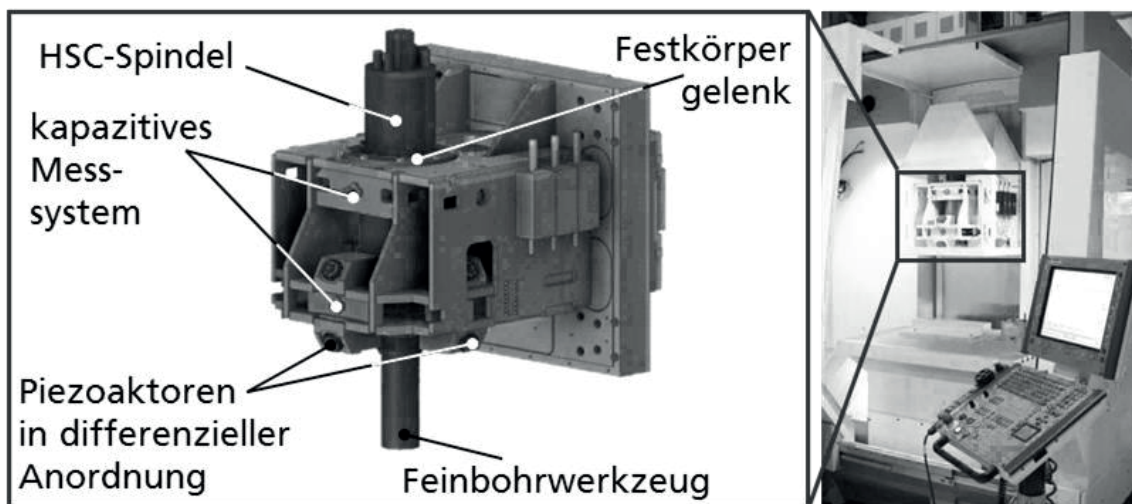


Abb. 2: Modell der adaptiven Spindelhalterung und Integration in Bearbeitungszentrum

Die technologischen Untersuchungen zum Formbohren von Zylinderlaufflächen im Durchmesserbereich von 81 mm und einer Bohrungslänge von 150 mm wurden u. a. an untereutektischen Aluminiumlegierungen (AlSi9Cu3) vorgenommen. Im Rahmen der Verfahrensentwicklung zum Formbohren wurden Drehzahlen bis zu 6.000 U/min und Auslenkamplituden zwischen 0 und 90 μm erfolgreich erprobt. Die Herausforderungen bestanden insbesondere in der Beherrschung der auslenkungsbedingten unterschiedlichen Schneideneingriffsverhältnisse, den optimalen Ansteuerungsstrategien zur Auslenkung der Spindeleinheit sowie der mehrkriteriellen Optimierung von drehzahlabhängiger Auslenkungsfrequenz und Schnittgeschwindigkeit bei Einsatz von PKD-Schneidstoffen. Zunächst wurden unrunde Bohrungen gefertigt, deren Form über die Bohrungstiefe konstant verläuft (d. h. die unrunde

Kreisform aller Z-Ebenen ist deckungsgleich). Darauf aufbauend erfolgten Ansteuerungen zur Erzeugung unterschiedlicher Freiformen (Abb. 3).



Abb. 3: Demonstration der Fertigung der Zylinderverzüge der 1. bis 4. Ordnung (links); Messergebnisse unterschiedlicher Zylinderformen (Mitte und rechts)

Die hohe Reproduzierbarkeit der Auslenkbewegungen hinsichtlich Lage, Form und Amplitude innerhalb einer Bohrung spiegelt sich beispielsweise in der Geradheit und Parallelität der Mantelflächen innerhalb eines Toleranzbandes von deutlich unter $5\text{ }\mu\text{m}$ wider. Auch die Oberflächenrauheiten konnten unter Einhaltung der Bearbeitungszeitvorgaben von 30 Sekunden und der prozessbedingten unterschiedlichen Schneideneingriffsverhältnisse auf bis zu $R_z\text{ }1,7\text{ }\mu\text{m}$ optimiert werden (Abb. 4).

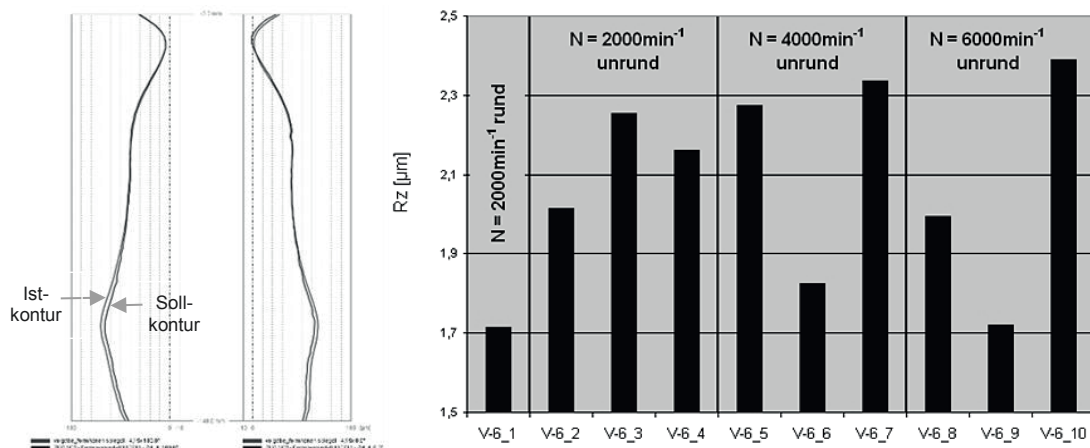


Abb. 4: Vergleich von Soll- und Ist-Geometrie (links); Vergleich der Rauheit bei unterschiedlichen Drehzahlen und Ansteuerstrategien (rechts)

Bei der Fertigung von Zylinderlaufflächen von Verbrennungsmotoren stellt das Ausbohren bzw. Formbohren derzeit noch ein Semi-Finish-Verfahren dar und die Endbearbeitung erfolgt üblicherweise mit einem Honprozess. Gegenwärtig werden jedoch weitere technologische Untersuchungen an relevanten Konstruktionswerkstoffen durchgeführt, um das Formbohren auch als Endbearbeitungsverfahren für Laufflächen an Kompressoren mit ähnlichen Bauteilanforderungen zu etablieren. Hierzu ist es erforderlich, auch den spanenden Prozess mit bestimmter Schneide hinsichtlich der hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität zu qualifizieren. Dass dies gelingen kann, zeigen vergleichende Auswertungen der Rauheitsprofile und der Materialanteilskurve von gehonten und gebohrten Zylinderlaufflächen (Abb. 5).

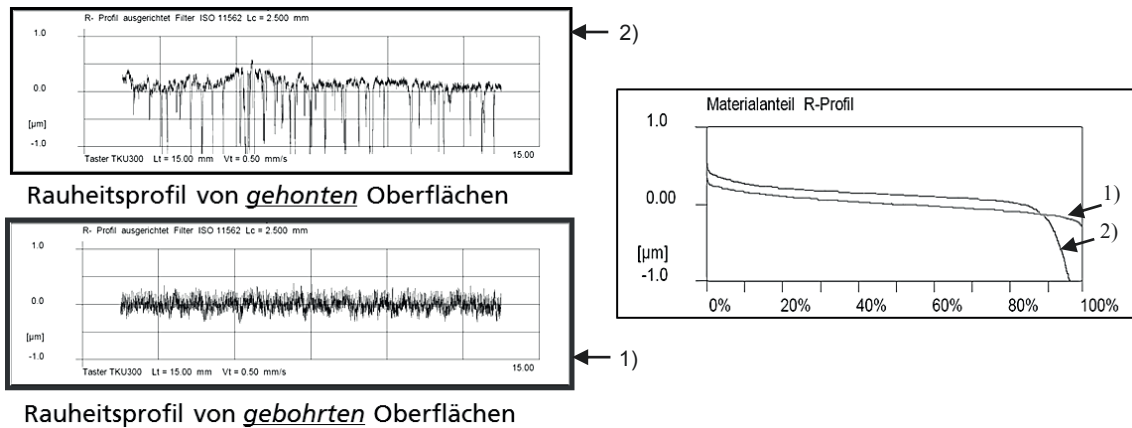


Abb. 5: Rauheitsprofil und Materialanteil gehonter und gebohrter Oberflächen im Vergleich

Zur messtechnischen Bewertung erzeugter, tribologischer Oberflächen werden in der Praxis zunehmend die Kennwerte der Abbott-Kurve verwendet. Mittels dieser Kennwerte können Zusammenhänge zwischen Fertigungsverfahren, Fertigungsparametern, Oberflächentopographie und tribometrischen Kennwerten abgeleitet sowie entsprechende Optimierungsmaßnahmen initiiert werden. Weitere funktionsbezogene Oberflächenkennwerte, wie beispielsweise für die Haptik oder das Benetzungsverhalten, wären vorteilhaft.

Der zunehmende Einsatz optischer Oberflächenmessverfahren in Verbindung mit der Herausgabe der neuen DIN EN ISO 25178 ermöglicht sowohl der industriellen Fertigung als auch der Wissenschaft und Forschung eine flächenhafte und somit anwendungsnähere Bewertung der Oberflächentopographie.

3. MIKROSTRUKTURIERTE OBERFLÄCHEN FÜR TRIBOLOGISCHE EFFEKTE

Geschmierte Reibpaarungen sind im Maschinen- und Automobilbau in unterschiedlichen Materialpaarungen im Einsatz. Je nach Betriebsbedingungen kann ein mikrostrukturierter Reibpartner zu einer Verschiebung der Stribeck-Kurve und somit zur Verringerung der Lagerreibung führen. Die Strukturen wirken dabei als Schmierstoffreservoir und unterstützen die Bildung eines Schmierfilms. Durch den zusätzlichen Druckaufbau erfolgt eine schnellere Trennung der Kontaktflächen der beiden Gleitpartner [Schub, 2010].

Tribometrische Untersuchungen von mikrostrukturierten Bauteilen sind Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten und Publikationen und werden teilweise kontrovers hinsichtlich des zu strukturierenden Reibpartners diskutiert [Tejima, 1999; Wakuda 2003]. Vor diesem Hintergrund wurden in den nachfolgenden Arbeiten die Unterschiede zwischen Oberflächenstrukturierung auf harten bzw. weichen Reibpartner ermittelt. Hierzu wurden Ring-Scheibe-Untersuchungen auf einem rotatorischen Tribometer vorgenommen. Als Vergleichsbasis dienten unstrukturierte Proben.

Die Mikrostrukturen wurden dabei wechselseitig in den harten (in der Anwendung die Welle) und weichen Reibpartner (in der Anwendung die Lagerschale) jeweils mit einem Flächenanteil von 10 % und 20 % unter Verwendung eines Pikosekundenlaser eingebracht. Für die tribologischen Modelluntersuchungen wurden der Vergütungsstahl 42CrMo4 (399 HV 1/10) und die Zinnbronze CuSn8 (170 HV 1/10) eingesetzt.

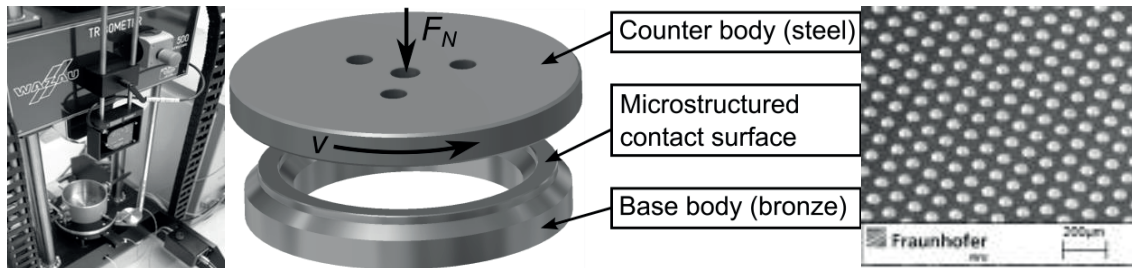


Abb. 6: Links: rotatorisches Tribometer; Mitte: Ring-Scheibe-Versuch; rechts: strukturierte Oberfläche

Die tribologischen Modelluntersuchungen erfolgten mit 85°C temperierten Motoröl als umlaufende Badschmierung. Mit 480 N Normalkraft wurden Flächenpressungen von 0,95 MPa erreicht. Alle Versuche starteten zunächst mit einer Einlaufphase von 60,5 Minuten und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,7 m/s. Zur Ermittlung der Kennwerte der Stribeck-Kurve wurde mit einer Gleitgeschwindigkeit von 1 m/s begonnen und diese dann schrittweise auf 0,1 m/s abgesenkt. Die Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen wurden hinsichtlich des Reibkoeffizienten, der Materialanteilskurve (Abbott-Kurve) und des Verschleiß-verhaltens ausgewertet. Die Gegenüberstellung der Reibkoeffizienten in Abhängigkeit des Einflusses der Gleitgeschwindigkeit ist in Abbildung 7 dargestellt.

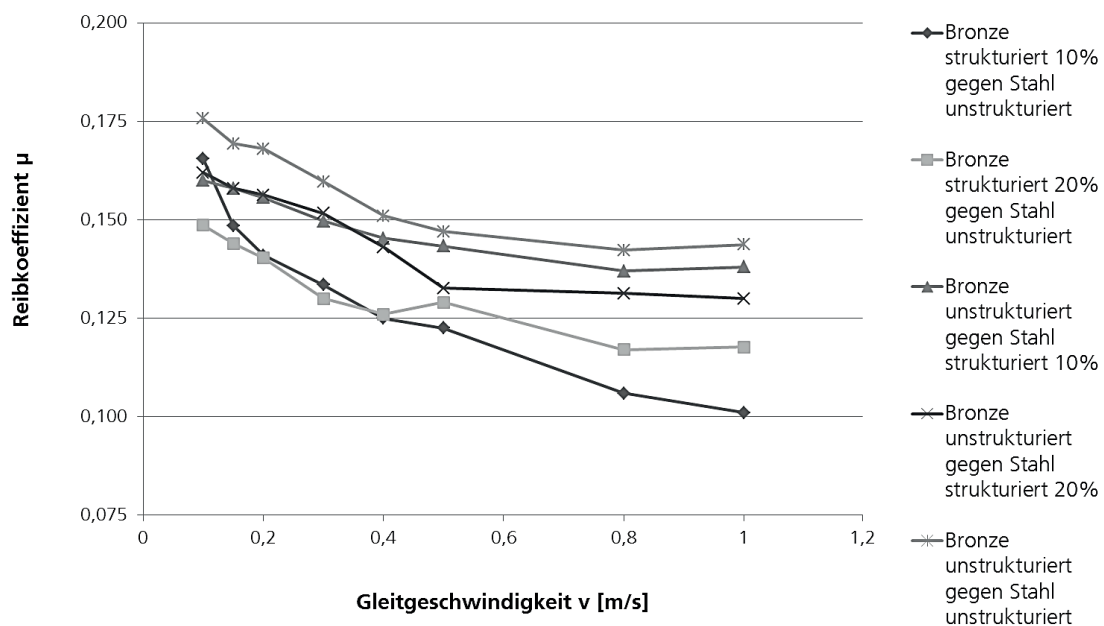


Abb. 7: Geschwindigkeitsabhängige Reibwertentwicklung strukturierter Probekörper

Die Ausbildung eines tragfähigen Schmierfilms, der einen Kontakt zwischen den Mikrorauheiten unterbindet, führt mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit generell zu einer Absenkung der Reibkoeffizienten. Die Versuche zeigen, dass durch gezielte Mikrostrukturierung die Reduzierung des Reibkoeffizienten im Vergleich zur unstrukturierten Referenz beeinflusst werden kann. Dabei ermöglichen strukturierte Oberflächen, hier insbesondere der Bronze-Proben mit einem Flächenanteil von 10%, verbesserte Reibkennwerte.

Für eine Bewertung des Gesamtsystems ist neben der Betrachtung der Reibwertentwicklung ebenfalls eine Analyse des Verschleißes sowie der Veränderung der Oberflächentopografie erforderlich. Da der Verschleiß vorrangig an den Bronzeproben auftritt, wurde dieser taktil auf einer Koordinatenmessmaschine Zeiss Prismo 7 S-ACC erfasst. Bei allen Versuchen kamen Strukturen mit einer Tiefe von 10 μm zum Einsatz. Die strukturierten Bronzeprobekörper zeigten nach dem Einsatz auf den Wirkflächen nur noch teilweise sichtbare Kavitäten auf. Im Gegensatz dazu liegen die Verschleißwerte der unstrukturierten Bronzeproben, welche gegen eine strukturierte Stahlproben gelaufen sind, im Mittel unter 4 μm . Bei den taktil vermessenen Verschleißwerten ist außerdem ersichtlich, dass unabhängig vom strukturierten Material bei 20 % Bedeckungsgrad weniger Verschleiß auftritt als 10 %. Die Oberflächenrauheit wurde mit einem 3D-Laserscanning-Mikroskop Keyence VK-9700 bestimmt. Der Vergleich der Rauheitswerte der Ausgangsoberflächen zeigt dabei eine Entwicklung der Oberflächentopografie generell zu rauerer Kennwerten (Abb. 8).

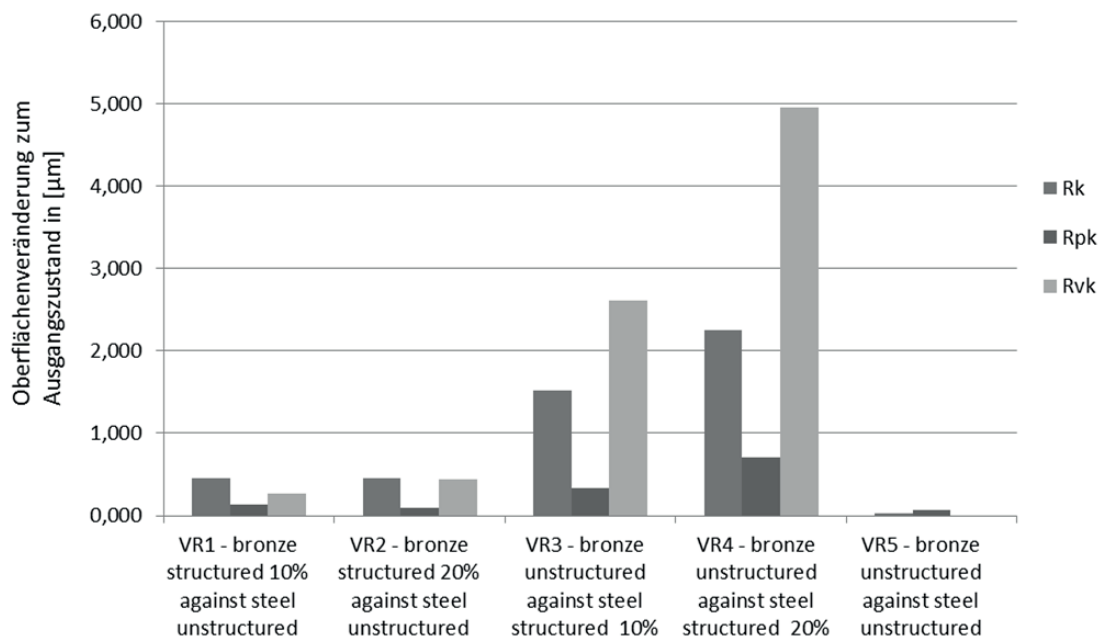


Abb. 8: Entwicklung der Oberflächenveränderung der Bronze-Probekörper

Auffallend hoch ist die resultierende Oberflächenaufrauung bei den unstrukturierten Bronze-Proben, die gegen einen strukturierten Stahlprobekörper liefen. Eine mögliche Ursache kann die Ansammlung von Verschleiß-

partikeln in den Kavitäten der Stahlprobekörper sein. Jedoch wirkt sich dies nur unwesentlich auf den Verschleiß aus.

Durch das teilweise Zusetzen von Kavitäten bilden sich Materialanhäufungen, die bei geringen Gleitgeschwindigkeiten und dem daraus folgenden geringen Schmierspalt zu Furchungverschleiß auf dem Bronzepartner führen können.

Im Hinblick auf die Gesamtbeurteilung des Tribosystems 42CrMo4/CuSn8 wird eine hartstrukturierte Paarung mit einem texturierten Flächenanteil von 20 % favorisiert. Hier ist das Verhältnis von Reibwert und Verschleiß am ausgewogensten und deutlich vorteilhafter gegenüber Paarungen bei denen keiner der beiden Reibpartner eine Mikrostruktur aufweist.

4. RESÜMEE

Die Festlegung der Anforderungen an Bauteiloberflächen hat oftmals weitreichende Konsequenzen auf die erforderliche Prozesskette, die Produktionskosten, bis hin zum späteren Erfolg des Endprodukts. Finale Bauteiloberflächen können dabei die komplette Entstehungsgeschichte, die sie während ihrer Fertigung durchlaufen, widerspiegeln. Die abschließende Finish-Bearbeitung ist dabei jedoch von maßgeblicher Bedeutung und soll den gewünschten Oberflächenzustand sicherstellen.

Im vorliegenden Beitrag wurden Möglichkeiten zur fertigungsintegrierten Vorwegnahme betriebsbedingter Bauteildeformationen sowie der Oberflächenausprägung von anspruchsvollen Powertrainkomponenten für Anwendungen im Bereich Tribologie gezeigt.

Die präventive Deformationskompensation mittels spanender Bearbeitung wird zukünftig von wachsender Bedeutung sein, um den Anspruch hoher Ressourcen- und Energieeffizienz noch besser gerecht zu werden. Mit der konstruktiven und technologischen Entwicklung einer gezielten Unrundbearbeitung von Zylinderbohrungen in Verbrennungsmotoren kann somit der Verbrauch an Kraftstoffen und Schmiermitteln weiter reduziert werden. Die Ergebnisse der Technologieversuche zeigen, dass das Formbohren sowohl in Bezug auf die erzielbaren Freiformflächen als auch der erreichten Oberflächengüte das Potenzial besitzt, den Verfahrensschritt Unrundbearbeitung mittels Honen teilweise oder komplett durch die Bearbeitung mit einem einschneidigen Werkzeug zu substituieren.

Das Reib- und Verschleißverhalten von ölgeschmierten Gleitpaarungen kann durch gezielte Mikrotexturen positiv beeinflusst werden. Die Untersuchungen befassten sich dabei insbesondere mit der Fragestellung, inwieweit der harte oder der weiche Reibpartner für die Strukturierung zu bevorzugen ist. In der Gesamtbeurteilung von Reibkoeffizienten und Verschleiß sind hartstrukturierte Paarungen mit einem texturierten Flächenanteil von 20 % zu favorisieren.

5. QUELLEN

- [Friedel, 2015] Friedel, P.: Tribologische Wirkung von - wechselseitig in harte und weiche Reibpartner - eingebrachte Mikrostrukturen. Technische Universität Bergakademie Freiberg/ Fakultät Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Diplomarbeit, 2015.
- [Jawahir, 2011] I.S. Jawahir et. al.: Surface integrity in material removal processes: Recent advances. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 60, Issue 2, 2011, S. 603–626.
- [Schub, 2010] Schubert, A.; Neugebauer, R.; Sylla, D.; Avila, M.; Hackert, M.: Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik: Wissenschaftliche Grundlagen zur energetischen Bewertung im Maschinenbau – Analysen und Prognosen. Tagungsband 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD, 24. und 25. Juni 2010, Chemnitz. Verlag Wissenschaftliche Skripten, Zwickau, 2010, S. 461-482.
- [Schub, 2012] Schubert, A.; Steinert, P.; Schmidt, T.; Hackert-Oschätzchen, M.: Manufacturing of tribologically optimized surfaces for powertrain applications. Aoyama, Tojiro: Emerging Technology in Precision Engineering XIV, November 8-10, 2012, Awaji. Zürich: Trans Tech Publ., 2012, pp 799-804. (Key Engineering Materials 523-524).
- [Treppe, 2011] Treppe, F.; Hochmuth, C.; Schneider, R.; Junker, T.; Schneider, J.; Stoll, A.: Steigerung der Ressourceneffizienz durch hybride Prozesse. Tagungsbeitrag zum Kongress „Sustainable Production“ auf der EMO, Hannover, 20.09. 2011.
- [Tejima, 1999] Y. Tejima, A. Ishiyama, A. Ura. The influence of rounded pores diameter and depth at sliding faces on the coefficient of friction under oil lubrication. Japanese Journal of Tribology 44 (1999), S. 531-545.
- [Wakuda, 2003] M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki, Y. Yasuda: Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. Wear 254 (2003), S. 356-363.

FUNKTIONALE 3D-OBERFLÄCHEN-CHARAKTERISIERUNG DER ZYLINDERLAUFBAHN IN DER AUTOMOBILINDUSTRIE

**Torsten Machleidt¹, Carsten Lucht¹, Hans-Christian Schwannecke¹,
Gerhard Flores², Dieter Besch²**

¹ GBS mbH, F&E/Geschäftsführung, torsten.machleidt@gbs-ilmenau.de

² Gehring Technologies GmbH, Leiter Technologie und Patente, Gerhard.Flores@gehring.de

Abstract: Um verringerte Abgase und Kraftstoff- und Ölverbräuche zu verwirklichen, muss das tribologische Verhalten der Kontaktflächen zwischen Zylinderlaufbahn und Kolbenringen ständig optimiert werden. Durch das Verwenden thermischer Spritzschichten in Zylinderlaufbahnen von Verbrennungsmotoren können energieeffiziente Motoren mit geringer Reibung, reduzierter Baulänge und geringerem Gewicht hergestellt werden. Die Laser-Bearbeitung von funktionalen Oberflächen der Verbrennungsmotoren (Zylinderlaufbahn, Pleulauge) bilden eine wichtige Neuerung bei der Oberflächengestaltung. Diese neue Technologie erfordert aber eine 3D-Prüftechnik, welche es ermöglicht, Flächen- und Volumenparameter zu ermitteln. Innerhalb des Papers wird auf die smartWLI-Technologie, als Prüftechnik für die Komponenten der Verbrennungsmotoren, näher eingegangen. Dabei gilt es nicht nur 3D-Oberflächendaten zu erzeugen sondern auch Parameter für die Bewertung der Oberflächen bereitzustellen.

KEYWORDS: ZYLINDERLAUFBAHN, KONSTRUKTUREN, LASERSTRUKTURIERUNG, 3D-OBERFLÄCHENMESSUNG, SMARTWLI-TECHNOLOGIE, OBERFLÄCHENPARAMETER

1. MOTIVATION

Umwelt und Klimaschutz erfordern die Einführung neuer Technologien zur Reduzierung der Abgase und des Kraftstoff- und Ölverbrauches bei Verbrennungsmotoren. Zu diesem Zweck werden immer neue Verfahren zur Modifikation der funktionalen Oberfläche im Verbrennungsmotor entwickelt.

1.1 Verwendung thermischer Spritzschichten im Motorenbau

Motorblöcke aus Leichtmetallguss mit beschichteten Zylinderlaufbahnen werden immer häufiger im modernen Motorenbau verwendet. Als Ergebnis entstehen Verbrennungsmotoren, welche kompakter sowie leichter sind und damit weniger Schadstoffemissionen verursachen.

Die Herstellung von thermisch gespritzten Zylinderbohrungen erfolgt in einer komplexen Prozesskette [Flores, 2010-1]. Von der Vorbehandlung des Substrates bis zu Endbearbeitung der Zylinderlaufbahn werden neu entwickelte oder adaptierte Prozesse eingesetzt. Das Aufräumen vor dem Beschichten erfolgt z. B. durch Varianten des Feinbohrens und Rollieren, bei denen Profilhinterschnitte und Mikrorauheiten angearbeitet werden.

Dadurch erhält die nachfolgend aufgebrachte thermische Spritzschicht eine hohe Haftfestigkeit an der Zylinderwandung. Nach dem Beschichten wird die Bohrung durch Honen in mehreren Operationen bearbeitet. Die fertig gehonte Bohrungsoberfläche weist ein Rauheitsprofil mit einer sehr feinen tragenden Topographie auf, welche durch die angeschnittenen Poren der Spritzschicht überlagert sind. Dadurch werden gute Gleiteigenschaften und gleichzeitig gute Ölhalteigenschaften erreicht.

Die Herausforderung für die 3D-Messtechnik besteht in der Bestimmung des Ölrückhaltevolumens der angeschnittenen Poren. Auch die Verteilung der Poren spielt eine Rolle für die Funktionsweise der Zylinderlaufbahn.

1.2 Innovative Honverfahren

Der Honprozess, als spanabhebendes Verfahren, erzeugt finale Funktionsoberflächen von Bohrungen. Dabei bekommt neben der Maß- und Formgenauigkeit besonders die topographische Gestaltung des Rauheitsprofils eine zunehmende Bedeutung. Dies kann eine möglichst glatte Oberfläche sein, aber auch eine raue Topographie mit definierter Schmierölbevorratung. Auch die Struktur der sich kreuzenden Bearbeitungsriefen hat eine entscheidende tribologische Bedeutung.

Die Funktion einer fertiggehonten Oberfläche besteht immer im Haften oder Gleiten, Dichten und Führen. Insofern ergeben sich die Anwendungsgebiete des Honens. Kolbenlaufbahnen von Verbrennungsmotoren, als einzelne Zylinderlaufbuchse oder im Kurbelgehäuse aus Gusseisen, Aluminium- oder Eisenlegierungen mit unterschiedlichsten Gefügestrukturen, sind die typischen Werkstücke im Honprozess.

Der Honprozess wird hinsichtlich neuer Qualitätskriterien ständig weiter entwickelt. Dadurch sind zahlreiche Verfahrensvarianten wie z. B. Formhonen, Plateauhonen, Laserhonen oder Spiralgleithonen entstanden [Flores, 2010-2].

All diese Weiterentwicklungen müssen mittels moderner 3D-Messtechnik begleitet werden. Es müssen Rauheitswerte und Volumenparameter abgeleitet und mit den tribologischen Eigenschaften der Funktionsfläche in Beziehung gebracht werden.

1.3 Laserstrukturieren von Pleuelaugen

Oberflächen mit hoher Haftreibungsfunktionalität lassen sich wirtschaftlich und in engen Toleranzen mit geeigneter Lasertechnologie reproduzierbar herstellen. Dies führt zur modifizierten konstruktiven Ausführung von kraftübertragenden Verbindungen und zur Substitution einzelner Bauelemente. Darüber hinaus entstehen innovative Prozessketten, in denen neue Laserstrukturierungsmaschinen ihren festen Platz finden [Flores, 2016].

Durch das Hublager, der Verbindung zwischen Pleuelstange und Kurbelwelle, wird die Hubbewegung des Kolbens in eine Drehbewegung der Kurbelwelle umgesetzt. Zwischen der Außenseite der Lagerschale und der Pleuelbohrung soll jedoch keine Bewegung stattfinden. Hier ist eine ausreichend hohe Haftreibung gefordert, welche die Reibkräfte innerhalb des Gleitlagers aufnimmt.

Für die Strukturierung werden Festkörperlaser mit Scanneroptik und Galvospiegeln verwendet. Die beiden Strahlquellen sind oberhalb des großen Auges und seitlich der Pleuelbohrung, gegenüberliegend geneigt, angeordnet.

Für die Entwicklung geeigneter Laserstrukturierung ist ein 3D-Messmittel erforderlich. Zentraler Punkt ist dabei die Bestimmung der Strukturbreite, Strukturtiefe und die Ausprägung der erhabenen Schmelzgrate an den Randbereichen der Strukturierung. Weiterhin entstehen durch Kreuzung der Laserabtragung (Gitterstruktur) Vertiefungen an den Kreuzungspunkten, deren Ausmaß dimensional begutachtet werden muss.

2. DIE SMARTWLI-TECHNOLOGIE ZUR 3D-OBERFLÄCHENMESSUNG

2.1 Grundlagen der Weißlichtinterferometrie

Die Interferometrie nutzt die Tatsache aus, dass sich zeitlich und räumlich kohärente Lichtwellen überlagern können. Praktisch werden z. B. Michelson-, Mirau- oder Linnik-Anordnungen zur Weißlichtinterferometrie verwendet. Abb. 1 zeigt den Messaufbau für ein Michelson-Interferometer. In der Regel wird Licht von einer Quelle mit der mittleren Wellenlänge λ zu einem Strahlteiler geführt und in zwei Wege aufgespaltet. Ein Strahl trifft auf den Referenzspiegel, der andere auf das zu untersuchende Objekt. Die beiden Lichtstrahlen werden jeweils reflektiert und treffen sich auf dem Weg zur Kamera. Dabei interferiert das Licht, wenn die Laufzeitdifferenz der unterschiedlichen Wege kleiner als die Kohärenzlänge¹ der Lichtquelle (für Weißlicht wenige Mikrometer) ist. Bei gleicher Weglänge zwischen Objektarm und Referenzarm gibt es keine Laufzeitdifferenz und damit maximalen Interferenzkontrast.

¹ Die Kohärenzlänge ist der maximale Weglängenunterschied zweier überlagerter Lichtstrahlen aus derselben Quelle, bei dem noch ein deutliches Interferenzmuster entsteht.

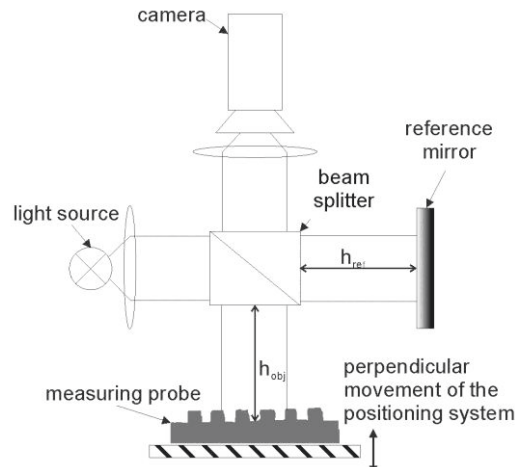


Abb. 1: Setup zur Weißlichtinterferometrie [Kapusi, 2007]

Der Interferenzkontrast verringert sich mit größer werdender Wegdifferenz. Schiebt man das Objekt mit einer Schrittweite dz durch die Referenzebene und zeichnet dabei jeweils ein Interferenzbild auf, bekommt man einen Bildstapel, aus dem sich für jeden Pixel der Intensitätsverlauf ablesen lässt. Dieser Verlauf heißt Korrelogramm (Abb. 2).

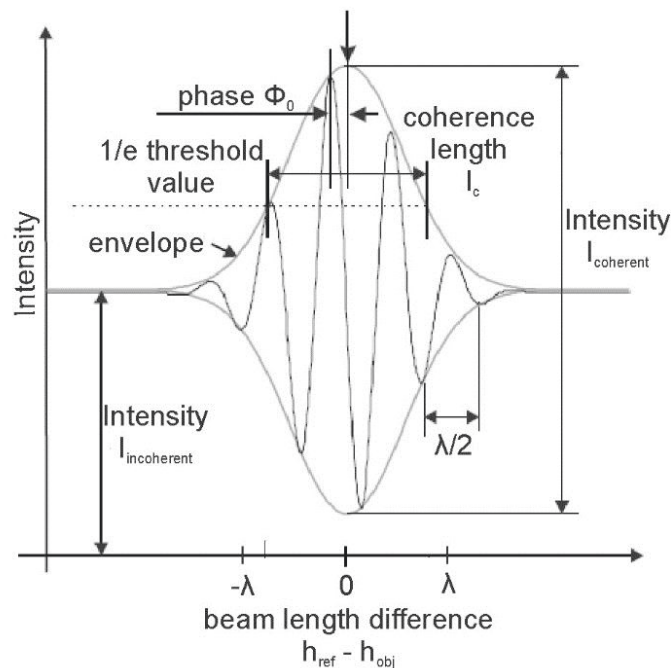


Abb. 2: Typisches Korrelogramm für ein Pixel [Seifert, 2005]

Allgemein wird das Signal eines Korrelogramms vereinfacht als eine auf ein Trägersignal aufmodulierte Hüllfunktion beschrieben:

$$K(z) = H(z) \cdot \cos(\varphi(z) + \varphi_0) \quad (1)$$

$K(z)$ ist dabei die gemessene Intensität an der Stelle z . Die Hüllfunktion $H(z)$ ist durch das Spektrum der Lichtquelle bestimmt (Fouriertransformierte des Spektrums). In der Regel kann von einer Gaußverteilung ausgegangen werden.

2.2 Besonderheiten der smartWLI-Technologie

Die smartWLI-Technologie basiert auf der bereits beschriebenen Weißlichtinterferometrie und zeichnet sich durch einen sehr kompakten modularen Aufbau aus. Die entwickelten Verfahren zur Auswertung der Interferenzen sind sehr robust und ermöglichen es, aufgrund der eingesetzten 16 Bit Kameratechnologie und der Sensoren mit hohem Dynamikbereich, auch Proben mit hohem Aspekt-Verhältnis zu messen. Durch die Kombination einer Beleuchtungsquelle mit einem angepassten Spektrum und einem parameterfreien Matched-Filter [Seifert, 2005] ist es der GBS gelungen eine Unterabtastung zu entwickeln, welche keinen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der 3D-Messergebnisse hat. Diese neu entwickelte Technologie des Unterabtastens wird von der GBS als speedyTec bezeichnet.

Der eigentliche Messprozess wurde wesentlich vereinfacht. So kann die Messung durch nur einen Klick ausgeführt werden. Das Einstellen der Scanparameter entfällt und wird durch einen intelligenten Prescan ersetzt. Dieses Feature der smartWLI-Technologie ist besonders für das Stitching größerer Felder ein wesentlicher Vorteil.

Die Analyse der 3D-Messdaten erfolgt mit dem quasi Industriestandard für die optische 3D-Messtechnik „MountainsMap“ bzw. der Auswertesoftware MVI zur Honstrukturerkennung der Daimler AG. Die reproduzierbare Auswertung und Analyse der 3D-Strukturen aus dem Bereich der Automobilindustrie erforderte eine Erweiterung der Standardsoftware MountainsMap. Die GBS hat zu diesem Zweck eigene AddOn-Module für diese Software entwickelt und direkt integriert. So können nun zum Beispiel auch sehr komfortabel Grafiken zur Statistik (Anzahl, Fläche, Volumen) von Poren und Blechmantel direkt in MountainsMap bestimmt und in den Report integriert werden.

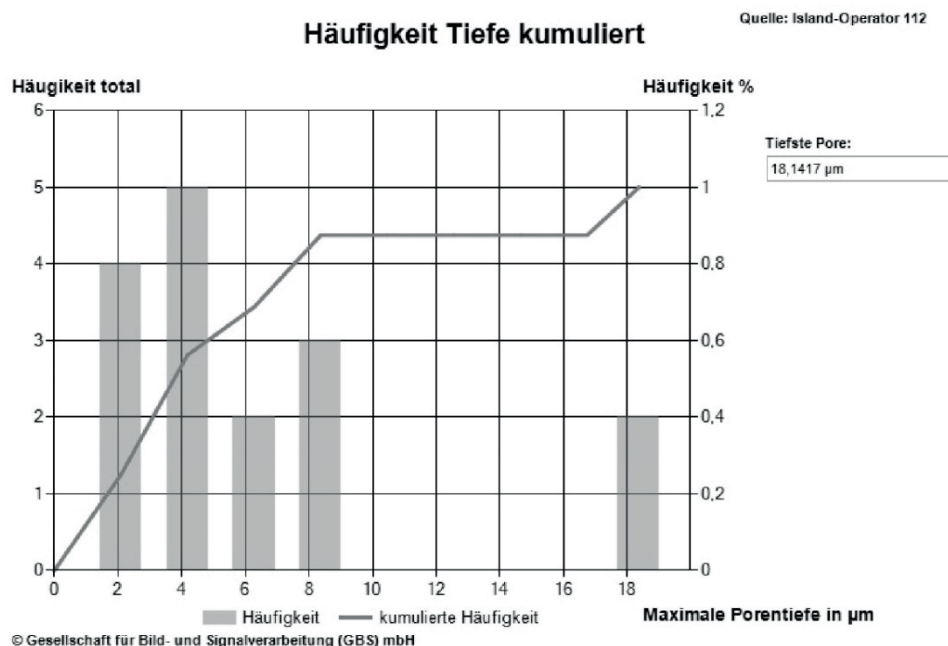


Abb. 3: Statistik-Grafik als AddOn für die Reporterstellung mit MountainsMap

2.3 Systemlösungen für 3D-Vermessung der funktionalen Oberflächen am Verbrennungsmotor

Im ersten Schritt ist es erforderlich die Oberfläche dreidimensional abzubilden. Die 3D-Messung innerhalb der Zylinderlaufbuchse erfordert das Eintauchen der 3D-Messtechnik in den Zylinder. Als Messgerät dient der „CylinderInspector 3D“, welcher sich durch seine Kompaktheit, Modularität und Wirtschaftlichkeit auszeichnet (Abb. 4). Die eingesetzte Technologie auf Basis der physikalisch rückführbaren Weißlichtinterferometrie verfügt darüber hinaus über alle Voraussetzungen für den industriellen Einsatz.



Abb. 4: CylinderInspector 3D zur direkten 3D-Messung der Zylinderlaufbahn

Mit dem CylinderInspector 3D können Bohrungen mit einem minimalen Durchmesser von 70 mm dreidimensional vermessen werden.

Für kleinere Bohrungen (z. B.) Pleuelauge bietet die GBS ein spezielles LD-Interferometer (LD-Long Distance) an. Hierbei ist ein großer Arbeitsabstand des Objektivs erforderlich. Nur dieser ermöglicht es, Messtiefen von zum Beispiel 30mm zu erreichen.

3. ANWENDUNG DER 3D-OBERFLÄCHENMESSTECHNIK

3.1 Zylinderlaufbahn mit Lunkern und Honstruktur

Mittels des CylinderInspector 3D können die 3D-Daten der Oberfläche der Zylinderlaufbahn gewonnen werden. Einen wesentlichen Aspekt bildet der Übergang von den gewonnenen 3D-Daten zu einer funktionalen Oberflächencharakterisierung. Bei modernen Zylinderlaufbahnen ist nicht nur

die Honstruktur entscheidend, sondern vielmehr auch bewusst eingebrachte Poren oder Laserstrukturen. Auch die Ausbildung sogenannter „Blechmantel“ muss charakterisiert werden.

3.1.1. Faxabdruck

Zur visuellen Beurteilung einer Zylinderlauffläche wird häufig die mikroskopische Aufnahme eines Faxabdruckes herangezogen. Das Verfahren ist aufwendig, da erst der Faxabdruck mittels Aceton-Folie durchgeführt werden muss und danach die Folie unter dem Mikroskop zu analysieren ist. Aus den Bildern heraus kann eine subjektive Bewertung der Honstruktur durchgeführt werden. D. h. es können der Honwinkel, die Riefenorientierung sowie weitere Parameter (Verquetschungen, Blechmantel) begutachtet werden.

Mit der neu entwickelten 3D-Messtechnik kann der Faxabdruck nachgebildet werden (Abb. 5). Er entsteht quasi als Nebenprodukt der Messung. Anders als beim Faxabdruck lassen sich per Software aber auch quantitative Messdaten erzeugen.

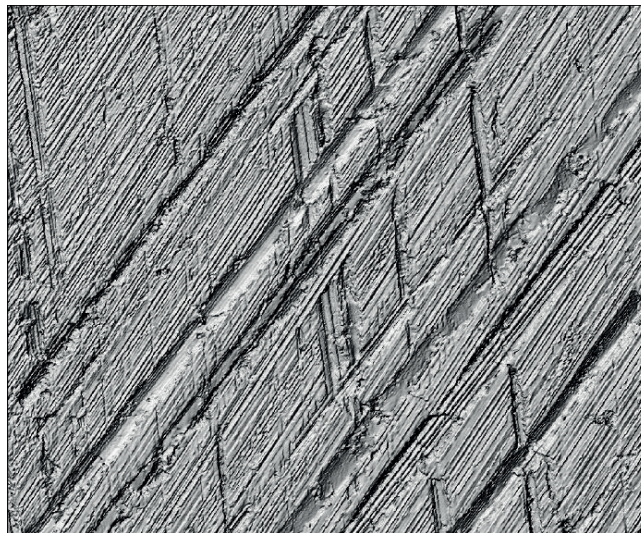


Abb. 5: Simuliertes „Faxabbild“ direkt aufgenommen mit dem CylinderInspector 3D

3.1.1. Bestimmung des Honwinkels

Die Bestimmung des Honwinkels kann interaktiv oder automatisiert durchgeführt werden (siehe Abb. 6).

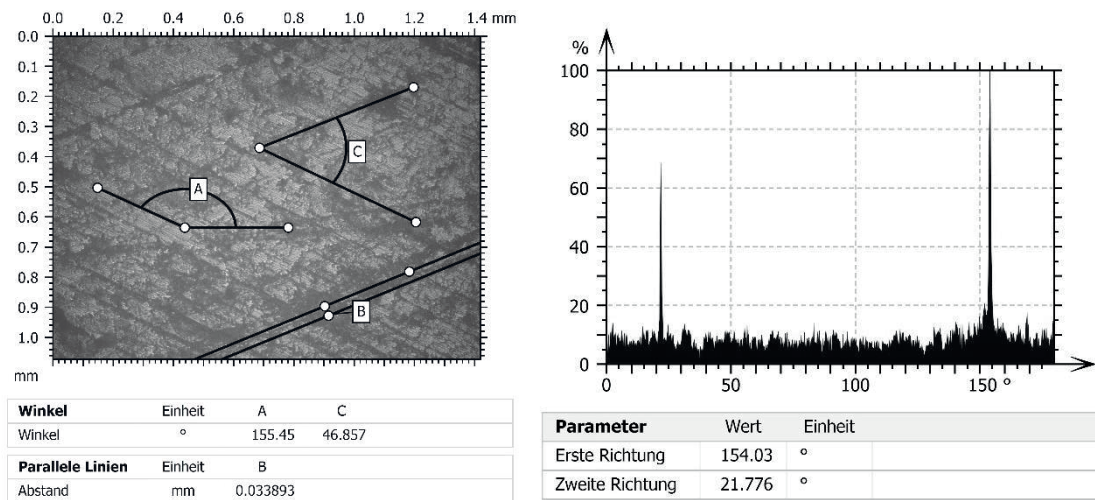


Abb. 6: Honwinkelbestimmung (links: interaktiv, rechts: automatisiert)

Für die automatische Honwinkelbestimmung werden die Messdaten mit Hilfe der Fourier Transformation analysiert, und aus dem Oberflächenspektrum die Winkel mit dem Maximalwert für die Texturausrichtung ausgegeben.

3.1.1. Bestimmung der Funktionsparameter

Abb. 7 zeigt eine 3D-Darstellung einer Zylinderlaufbahn. Auf Basis dieser Aufnahmen lassen sich umfangreiche geometrische Auswertungen (Längen, Winkel, Höhen & Tiefen, Volumen, etc.) durchführen. Darüber hinaus sind 2D-Rauheit und Welligkeit mittels Profilanalyse (nach ISO 16610, 13565, 12085), sowie die Bestimmung der 3D-Kenngrößen nach ISO 25178 (Rauheit, funktionale Kenngrößen: Tragflächenanteil und Volumen) durchführen.

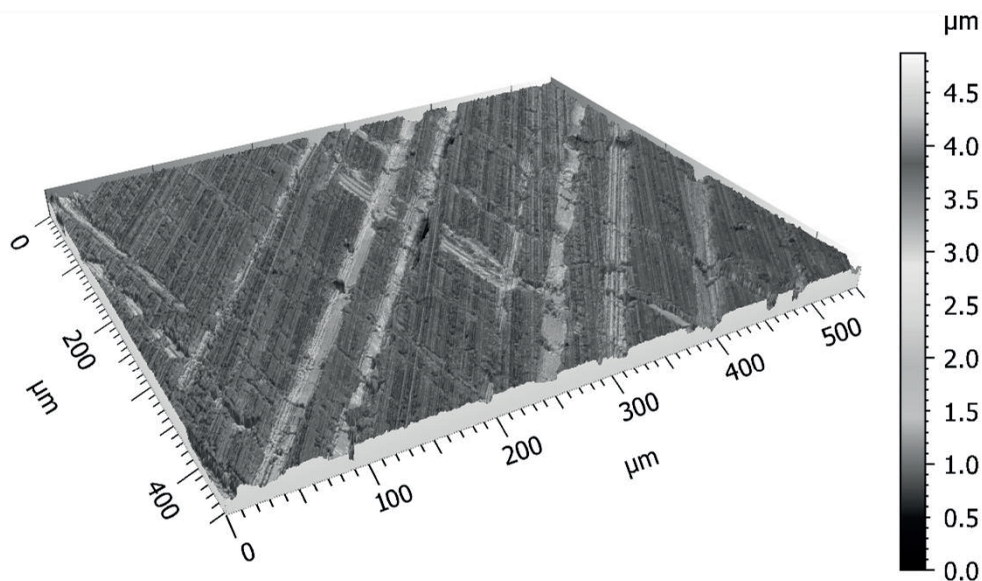


Abb. 7: 3D-Messergebnis einer Zylinderlaufbahn gemessen mit dem CylinderInspector 3D

Die Trennung der Honstruktur von den anderen Merkmalen (Blechmantel, Poren) bildet die größte Herausforderung bei der Analyse der 3D-Daten der Zylinderlaufbahn. Die Trennung erfolgt über ein Spektralfilter [Böttner, 2013]. Zuerst wird die Honstruktur über das Spektralfilter isoliert. Durch Subtraktion der Honstruktur von den Originaldaten entsteht ein Zwischenbild für die weitere Analyse.

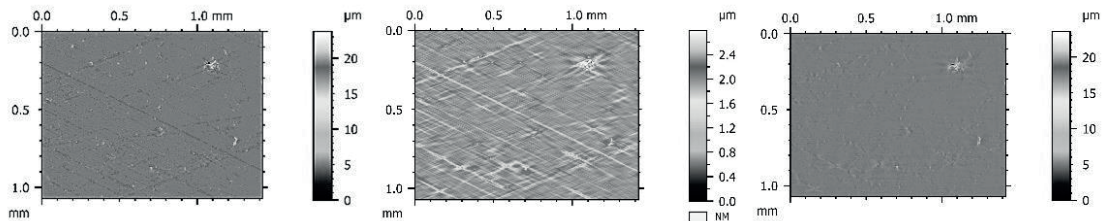


Abb. 8: Herausrechnen der Honstruktur über Spektralfilter (links: Originaldaten, Mitte: extrahierte Honstruktur, rechts: Messdaten mit eliminierter Honstruktur)

Aus den gewonnen 3D-Daten können durch einen Schwellwertoperator Blechmantel und Poren voneinander getrennt werden und eine Statistik, wie in Abb. 3 dargestellt, ausgegeben werden.

3.2 Laserstrukturierung

Immer häufiger wird die Laserstrukturierung zur Anpassung der Haftreibungseigenschaften von funktionalen Oberflächen eingesetzt. Zur Beurteilung der Laserstrukturen reicht in der Regel keine 2D-Aufnahme aus. Um die Tiefe der Laserstrukturierung und den Auswurf zu bestimmen, ist eine 3D-Messung unerlässlich (Abb. 9). Über einen Profilschnitt lassen sich über Parameter wie die maximale Tiefe und die Fläche der Laserstrukturierung bestimmen. Wesentlich ist auch die maximale Höhe und Fläche des Überwurfes, welcher in einer anschaulichen Grafik bestimmt werden kann (Abb. 10).

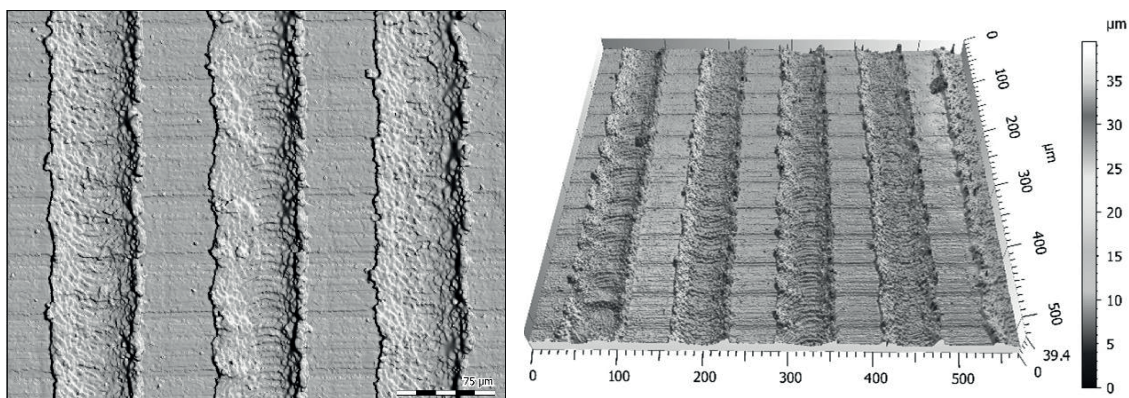


Abb. 9: 2D- / 3D-Messergebnis ermittelt mittels smartWLI-Technologie

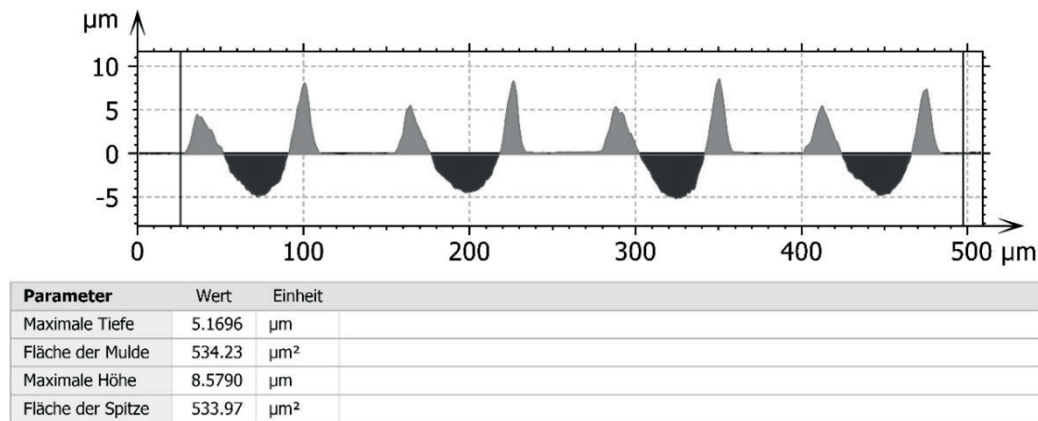


Abb. 10: Profilschnitt über 4 Laserstrukturen inklusive automatischer Parameterbestimmung

4. ZUSAMMENFASSUNG

Im Paper wurden die Herausforderungen bei der 3D-Oberflächencharakterisierung der Zylinderlaufbahn im Automobilbereich diskutiert. Anhand von praktischen Beispielen konnten die Möglichkeiten der smartWLI-Technologie zur Lösung der Aufgaben im Automobilbereich dargestellt werden. Es hat sich gezeigt, dass einerseits die 3D-Aufnahme als auch die Verarbeitung und Analyse der Messdaten eine wichtige Rolle für die praktische Nutzung der neuen Technologie der optischen Qualitätskontrolle spielen. Beispielhaft konnten die wesentlichen Analyseschritte zur Bewertung der Honstruktur aufgezeigt werden. Abschließend ist am Beispiel der Laserstrukturierung ein weiterer Anwendungsfall für die 3D-Oberflächenmessung aufgezeigt worden.

5. QUELLEN

- [Flores, 2010-1] Flores, G.; Schwenk, A.; Schnell, C.: Prozesskette zur Herstellung thermisch gespritzter Zylinderbohrungen. VDI-Berichte Nr. 2109, 2010.
- [Flores, 2010-1] Flores, G.: Innovative Honverfahren. VDI-Z 152 Nr. 10/11, 2010.
- [Flores, 2016] Flores, G., Wiens A.: Herstellung von Funktionsoberflächen mit hoher Haftreibung durch Laserstrukturieren. VDI-Z 152 Nr. 9/10, 2016.
- [Kapusi, 2007] Kapusi, D.; Machleidt, T.; Franke, K.-H.; Jahn, R.: White light interferometry in combination with a nanopositioning and nanomeasuring machine (NPMM). Proceedings of SPIE Vol. 6616, Munich 2007.
- [Seifert, 2005] Seifert, T.: Verfahren zur schnellen Signalaufnahme in der Weißlichtinterferometrie. Dissertation, Universität Erlangen, 2005.
- [Böttner, 2013] Böttner, Th., Hercke, T.: Strukturorientierte Auswertung von Honstrukturen. 5. VDI/VDE Fachtagung Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2013.

GEOMETRIEANFORDERUNGEN BEI METALLISCHEN BIPOLARPLATTEN IN PEM-BRENNSTOFFZELLEN

**Karl Lötsch¹, Philipp Jendras², Dr.-Ing. Sebastian Härtel³,
Prof. Dr.-Ing. Thomas von Unwerth⁴**

¹ Technische Universität Chemnitz, Professur Alternative Fahrzeugantriebe,
karl.loetsch@mb.tu-chemnitz.de

² Technische Universität Chemnitz, Professur Alternative Fahrzeugantriebe,
philipp.jendras@mb.tu-chemnitz.de

³ Technische Universität Chemnitz, Professur Virtuelle Fertigungstechnik,
sebastian.haertel@mb.tu-chemnitz.de

⁴ Technische Universität Chemnitz, Professur Alternative Fahrzeugantriebe,
thomas.von-unwerth@mb.tu-chemnitz.de

Abstract: Automobilbauer, Gesetzgeber und erste Anwender setzen auf Elektrofahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzellen, um Emissionen zu reduzieren und Verbrennungsmotoren in Funktionalität und Komfort zu substituieren. Bipolarplatten bilden die mechanische Hauptstruktur des Brennstoffzellenstapels, welcher den mitgeführten Wasserstoff durch die Reaktion mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft in Strom, Wärme und Wasserdampf als Abgas umsetzt. Zu den Hauptfunktionen von umgeformten metallischen Bipolarplatten zählt das flächige elektrische Kontaktieren und Abstützen der biegeempfindlichen Zellmembranen. Zur sicheren Erfüllung dieser Funktionen und mangels großserientauglicher Qualitätsprüfverfahren werden hohe Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit der Bipolarplatte gestellt. Um den Fertigungsaufwand zu senken, gilt es, die Anforderungen zu reduzieren. Dazu werden die Gestaltabweichungen und deren Einfluss auf die Funktionalität der Bipolarplatte analysiert.

KEYWORDS: BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUG, PEM-BRENNSTOFFZELLE,
BIPOLARPLATTE, GEOMETRIEANFORDERUNGEN

1. EINLEITUNG

Die für den Fahrzeugantrieb eingesetzten Niedertemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (NT-PEM-BZ) setzen den in Tanks mitgeführten Wasserstoff durch die Reaktion mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft in Strom, Wärme und Wasserdampf als Abgas um. Eine einzelne Zelle besteht im einfachsten Fall aus einer protonenleitenden Membran mit Elektroden (MEA), porösen Gasdiffusionsschichten (GDL) und angrenzenden Bipolarplatten (BIP). Mehrere einzelne Zellen werden in einer Reihenschaltung zu einem Stack gestapelt, Abbildung 1. Bipolarplatten erfüllen im Brennstoffzellenstapel die Funktionen:

- elektrische Kontaktierung benachbarter Zellen (bipolare Anode und Kathode)
- Zuführung und Verteilung der Reaktionsgase, Abführung der Produkte über Kanalstruktur im Flussfeld (Abbildung 1)
- Wärmeleitung, -abfuhr und -zufuhr über innenliegende Kühlkanäle

- Trennung der Reaktionsgase zweier benachbarter Zellen
- mechanische Stabilität des Gesamtstacks, Abstützung von GDL und MEA

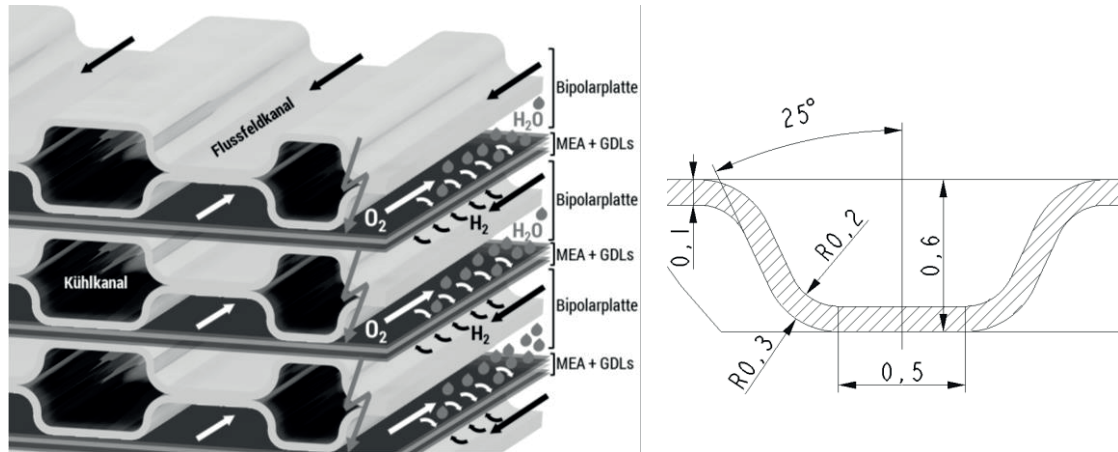


Abb. 1: Querschnitt eines Brennstoffzellenstapels (links) – eines umgeformten Kanals (rechts)

Bipolarplatten können aus zwei umgeformten und miteinander gefügten Hälften bestehen, woraus sich typischerweise die doppelte Anzahl zu fertigender Einzelbleche je Brennstoffzellenstapel ergibt. Bei einer Stapelgröße von z. B. 370 Zellen¹ sind über 738 einzelne Blechhalbplatten je Fahrzeug herzustellen. Dafür sind kostengünstige Materialien und Herstellverfahren für Bipolarplatten erforderlich, welche den Eigenschaftsanforderungen gerecht werden: hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, sehr hohe Korrosionsbeständigkeit, mechanische Festigkeit, gasdicht gegenüber Wasserstoff und geringes Gewicht.

Die aus den unterschiedlichen Anforderungen resultierenden Zielkonflikte werden bislang mit teuren Ausgangsmaterialien vermieden. Zum Einsatz kommen Blechhalbzeuge mit einer Dicke $t_{Blech} = 0,1 \text{ mm}$ aus Edelstahl mit ein- oder mehrlagigen Beschichtungen aus edlen/halbedlen Metallen, kohlenstoffbasierten oder keramischen Schichten. Diese werden mittels physikalischer bzw. chemischer Gasphasenabscheidung (PVD bzw. CVD) oder galvanisch beschichtet. Das Beschichten einzelner umgeformter und gefügter Bipolarplatten ist sehr prozesssicher, aber bei großen Stückzahlen gegenüber dem kontinuierlichen Beschichten des Halbzeugs teurer. Die Professur Alternative Fahrzeugantriebe und die Professur Virtuelle Fertigungstechnik der Technischen Universität Chemnitz untersuchen großserientaugliche Fertigungsverfahren für Bipolarplatten aus vorbeschichteten Halbzeugen, welche die Funktion der Oberfläche nicht beeinträchtigen.

In diesem Paper wird der Einfluss der material- und fertigungsbedingten Oberflächenbeschaffenheit auf die Funktionseigenschaften betrachtet, um Prozessparameter (Rauheit von Halbzeug und Werkzeug) definieren zu können.

¹ Brennstoffzellenstapel des Fahrzeugs Toyota Mirai: 370 Zellen, Systemleistung $P_{Sys} = 110 \text{ kW}$

2. FUNKTIONSEIGENSCHAFTEN METALLISCHER BIPOLARPLATTEN

Die wesentlichen Funktionseigenschaften der Oberfläche metallischer Bipolarplatten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Diese sind in maßgebend für Leistung, Lebensdauer und Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Branchenweit orientiert man sich dazu an den Zielen des US-amerikanischen Department of Energy (DOE).

Funktionseigenschaft	Zielwert bis 2020
elektrischer Kontaktwiderstand	10 mΩcm ² , bei 140 MPa Anpressdruck
Korrosionswiderstand (Korrosionsstromdichte)	< 1 μA/cm ² (AST)
Widerstand gegen H ₂ -Permeation (Permeationskoeffizient)	< 1,3 e ⁻¹⁴ Std cm ³ /(s cm ² Pa) bei 80 °C, 3 atm 100 % RH
Benetzungs- / Absorptionswinkel	Stegbereich: < 90° (hydrophil) Kanalgrund: > 90° (hydrophob)

Tab. 1: Geforderte Funktionseigenschaften der Oberfläche von Bipolarplatten [DOE, 2016]

Neben den genannten Zielwerten sollte die Oberfläche einen geringen Strömungswiderstand und geringen Ionenaustrag aufweisen. Diese sind jedoch nicht mit Zielwerten quantifizierbar. Die genannten Funktionseigenschaften sind von den folgenden Parametern abhängig:

- den Werkstoffen des Blechhalbzeugs und der Beschichtung,
- den Wechselwirkungen mit den anderen Zellkomponenten sowie
- der Beschaffenheit der Oberfläche.

Die Wechselwirkungen können von Formabweichungen und Welligkeit beeinflusst werden. Die Beschaffenheit der Oberfläche ist von Gestaltabweichungen 3. bis 5. Ordnung (Rauheit) abhängig, welche im Weiteren betrachtet werden.

3. EINFLÜSSE VON GESTALTABWEICHUNGEN DER OBERFLÄCHE

3.1 Einfluss auf den Kontaktwiderstand

Die Rauheit der Bipolarplatten hat einen messbaren Einfluss auf den Kontaktwiderstand zur GDL. In Abbildung 2 sind die entsprechenden Messergebnisse von [TAWFIK, 2012] und [KIM, 2012] dargestellt. Die Oberflächen mit höherem Mittenrauwert weisen bei den beiden untersuchten Edelstählen einen geringeren Kontaktwiderstand auf als polierte Oberflächen. Dieser Zusammenhang scheint zunächst im Widerspruch mit den Relationen zwischen Rauheit und der Größe der Kohlenstofffasern zu stehen, wenn man die in Abbildung 3 gezeigten Darstellungen verschiedener Oberflächen mit einer Kohlenstofffaser der GDL betrachtet. Glatte Oberflächen haben mit den relativ großen Fasern deutlich mehr Kontaktstellen und in Summe eine größere Kontaktfläche.

[TAWFIK, 2012] erklärt den geringeren Kontaktwiderstand bei raueren Oberflächen anhand der in Abbildung 3 gezeigten Darstellungen (a) und (b). Die wenigen Kontaktstellen der Rauheitsspitzen resultieren in einer kleinen Kontaktfläche, auf der bei gleicher Anpresskraft höhere Pressungen erreicht werden, als bei glatten Oberflächen mit vielen Kontaktstellen. Leicht raue Oberflächen senken demnach den Innenwiderstand von Brennstoffzellen gegenüber glatten Oberflächen und begünstigen somit einen hohen Wirkungsgrad.

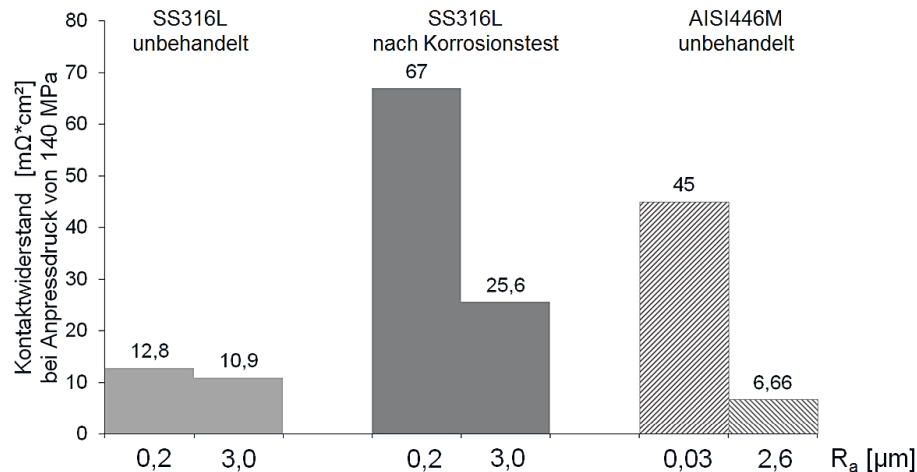


Abb. 2: Kontaktwiderstandsmessungen von SS316L (austenitischer Edelstahl) [TAWFIK, 2012] und AISI446M (ferritischer Edelstahl) [KIM, 2012] mit jeweils unterschiedlicher Rauheit

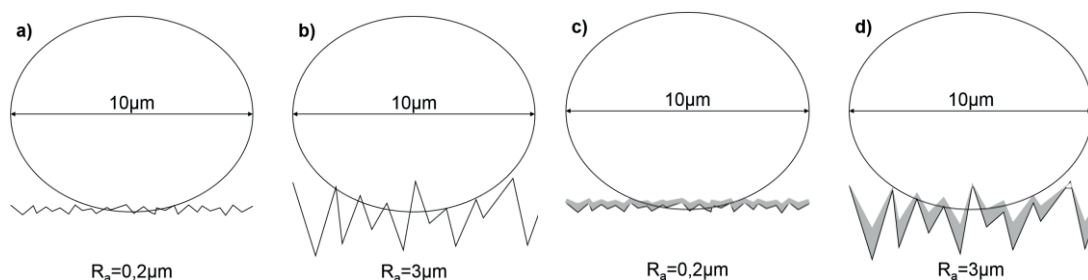


Abb. 3: Darstellung einer Kohlenstofffaser auf (a) einer glatten und (b) rauen Oberfläche sowie mit einer grau dargestellten Passivierungsschicht (c) und (d)

3.2 Einfluss auf die Korrosionseigenschaften

Es konnte ebenso ein Einfluss der Rauheit auf die Korrosionseigenschaften von austenitischem Edelstahl bei [TAWFIK, 2012] gemessen werden. Der Kontaktwiderstand einer Oberfläche mit einem Mittenrauwert $R_a = 0,2\mu\text{m}$ und einer Oberfläche mit $R_a = 3\mu\text{m}$ wurden zunächst wie in Kapitel 3.1 beschrieben gemessen. Nach einem anschließenden Korrosionstest (2,5 h 0,6 V pH3 + 0,1 ppm HF bei 80°C) wurde die Messung wiederholt und zeigt erwartungsgemäß bei beiden Proben einen Anstieg des Kontaktwiderstands, (siehe Abbildung 2). Auf beiden Oberflächen hat sich infolge der korrosiven Behandlung eine passivierende Oxidschicht gebildet, die den elektrischen Widerstand erhöht. Dennoch weist unter den beiden Proben die raue Oberfläche einen geringeren Kontaktwiderstand auf, was auf bessere Korrosionseigenschaften schließen lässt. Eine parallel dazu gemessene potentiodynamische Kurve zeigt je-

doch für die raue Probe eine höhere Korrosionsstromdichte an, welche ein Indiz dafür ist, dass diese stärker korrodiert ist. Dies erklärt [TAWFIK, 2012] anhand der größeren Angriffsfläche der rauen Oberfläche und einer stärkeren, aber ungleichmäßigen Passivschichtbildung. Die tiefen Täler füllen sich mit einer Passivschicht, die Rauheitsspitzen bleiben frei und bewirken zur GDL einen geringeren Kontaktwiderstand (Abbildung 3). Da die Passivschicht vor Korrosion schützend wirken kann, neigen raue Oberflächen zu stärkerer Korrosion infolge von Degradationseffekten. Dagegen bildet sich auf der glatten Oberfläche eine dünne, aber sehr gleichmäßige Passivschicht. Sie wirkt gegenüber den Kohlefasern der GDL stark isolierend, bildet dafür aber eine bessere Degradationsbarriere und schützt vor weiterer Korrosion (siehe Abbildung 2).

Neben der Flächenkorrosion ist die Loch- oder Spaltkorrosion bei Bipolarplatten problematisch. Sie tritt häufig bei Metallen auf, die durch einen Oxidfilm passiviert sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Oxidation durch elektrochemisches Potential auf die Fehlstellen im Material begrenzt. Wasserstoff hat aufgrund seiner kleinsten Atomgröße das höchste Diffusionsvermögen aller Elemente. Durch eine Abnahme der Wandstärke infolge der Korrosion steigt die Permeationsrate im Verlauf der Lebensdauer. Insbesondere Lochfraßkorrosion muss vermieden werden, da eine Ausdünnung des Bleches lokal zu erhöhten Permeationsraten führt und folglich Prozessgase in den Kühlkreislauf gelangen können. Studien zeigen, dass mit steigender Rauheit die Korrosionsrate steigt, das Potential für Lochfraßkorrosion jedoch zurück geht [TOLOEI, 2013].

3.3 Einflüsse auf die Strömungseigenschaften

Die Anforderungen an die Strömung im Flussfeld der Bipolarplatte sind sehr komplex. Hohe Reibungsverluste an den Wänden der Strömungskanäle führen zu einem erhöhten Druckverlust, der durch einen Verdichter mit parasitärer Leistungsaufnahme kompensiert werden muss. Dies senkt den Gesamtsystemwirkungsgrad, da diese Leistung ebenso von der Brennstoffzelle zur Verfügung gestellt werden muss. Bei turbulenten Strömungen spielen die Wandrauhigkeiten eine bedeutende Rolle. Die sehr dünn ausgebildete turbulente Grenzschicht δ wird vor allem bei größeren Reynolds-Zahlen Re durch in die Strömung hineinragende Rauheitsspitzen beeinflusst ($\delta \sim 1/\ln Re$). Dabei spielt nicht das absolute Maß der Rauheit eine Rolle, sondern das Verhältnis von charakteristischer Länge zur absoluten Rauheitshöhe k_s^*/D^* , wobei die Rauheitshöhe k_s^* ein gemittelter äquivalenter Wert ist. Diese Abhängigkeit hängt von der Strömung ab, die durch die Reynolds-Zahl charakterisiert wird. [HERWIG, 2015]

In Abbildung 4 ist mit Hilfe des Modells für eine ausgebildete Strömung der Zusammenhang zwischen Rauheit und Strömungswiderstand dargestellt. Bei einer Luftströmung von 1 l/min (80°C , 2 bar) beträgt die Reynolds-Zahl circa $Re = 3000$.

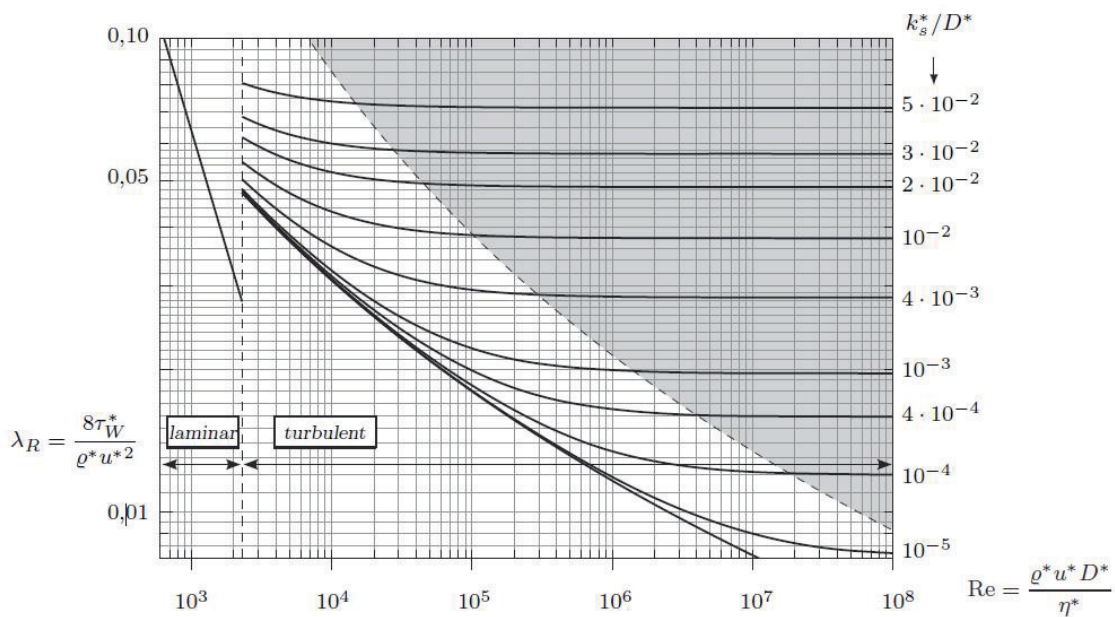


Abb. 4: Zusammenhang zwischen Strömungswiderstand und Reibung [HERWIG, 2015]

Hinsichtlich des Zellwirkungsgrades ist eine optimale Gasverteilung über der aktiven Fläche notwendig. Um diese zu erreichen, müssen die Reaktanten beim Durchströmen des Flussfeldes in die GDL und durch diese zur MEA, wo die Reaktion stattfindet, diffundieren. Zu diesem Zweck werden gezielt Turbulenzen erzeugt. Diese sorgen für einen erhöhten Strömungswiderstand, der aber ein bloßes Durchströmen der Gase minimiert, ohne dass sie in die GDL eintreten. Die Topologie der Oberfläche im Kanal ermöglicht eine Beeinflussung der Strömung in diesem Sinn. Dabei kann neben makroskopischen Strukturen auch die gezielte Beeinflussung der Rauheit angewendet werden. Der Turbulenzgrad Tu (siehe Gleichung 1), ein Maß für die mittlere dimensionslose Schwankungsgeschwindigkeit, gibt an wie groß Bewegungen senkrecht zur Strömungsbewegung sind und somit die Diffusion in die GDL begünstigen [HAUSSM, 2014].

$$Tu = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{k^*}{U_B^{*2}}} \quad \text{mit: } \begin{array}{l} U_B^* \dots \text{Bezugsgeschwindigkeit und} \\ k^* \dots \text{Rauheitswert} \end{array} \quad (1)$$

Auf der Kathodenseite entsteht das Reaktionsprodukt Wasser. Um zu verhindern, dass Wassertropfen die Kanäle verschließen und so die Reaktion zum Erliegen bringen, muss das kondensierte Reaktionsprodukt mit dem Luftstrom aus der Zelle abtransportiert werden. Dazu kann die Oberfläche der Bipolarplatte z. B. mit Hilfe der Rauheitsauswahl hinsichtlich Hydrophobizität (siehe Abbildung 5) gestaltet werden. Auf den Stegen am Kontakt zur GDL ist eine hydrophobe Oberfläche wünschenswert, damit sich dort keine flüssige Phase sammelt und die Gase ungehindert zur Membran diffundieren können. Im Kanalgrund wird eine hydrophile Oberfläche bevorzugt, damit sich ein Film anstatt von Tropfen bildet [HAUSSM, 2014].

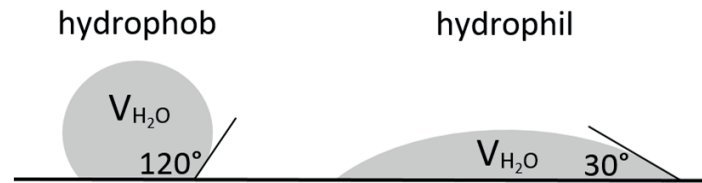


Abb. 5: Hydrophobes und hydrophiles Verhalten eines Tropfens

Der Kontaktwinkel θ hängt von den Grenzflächenspannungen flüssig/gas γ_{sg} , fest/flüssig γ_{sl} und fest/gas γ_{sg} ab (siehe Gleichung 2).

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{sg}} \quad (2)$$

Die Korrelation zwischen den Grenzflächenspannungen und dem Kontaktwinkel verdeutlicht die Abhängigkeit vom gewählten Material. Die Flüssigkeit ist aufgrund des Anwendungsfalls stets Wasser. Zwischen der Rauheit und dem Kontaktwinkel besteht folgender Zusammenhang: Bei einer hydrophilen Oberfläche wird der Kontaktwinkel mit zunehmender Rauheit kleiner. Die Oberfläche wird hydrophiler. Im Gegensatz dazu wird bei einer hydrophoben Oberfläche mit zunehmender Rauheit der Kontaktwinkel größer. Die Oberfläche wird hydrophober. Dieser Zusammenhang gilt unter der Annahme, dass die Tröpfchen größer sind als die Rauhtiefe und in diese eindringen [IMMINK, 2010].

4. FERTIGUNGSBEDINGTE BESCHAFFENHEIT DER OBERFLÄCHE

4.1 Beschaffenheit beschichteter metallischer Folien

Die metallischen Folien (Halbzeug) werden aus einem dickeren Grundmaterial durch Walzen hergestellt. Bei diesem Fertigungsverfahren bestimmen der Umformgrad und vor allem die Beschaffenheit der Walze die Rauheit des Halbzeugs, da sich die Rauheit der Walze in der Oberfläche des Folienmaterials abbildet. Dabei sind Mittenrauwerte zwischen $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ möglich. Je geringer dieser Wert, desto größer sind die Herstellkosten. Zur Sicherstellung der funktionalen Eigenschaften wird auf das Blechhalbzeug eine Dünnschicht aufgebracht. Diese ist mit 60 nm bis 200 nm im Vergleich der Rauheit sehr dünn, sodass die Oberflächentopografie maßgeblich durch die Gestalt des Substrats und nicht durch die Beschichtung beeinflusst wird.

4.2 Rauheitsentwicklung beim Tiefziehen metallischer Bipolarplatten

Die Entwicklung der Rauheit bei Tiefziehprozessen von metallischen Bipolarplatten steht im Spannungsfeld zwischen der Aufrauung der Oberflächen bei freier Dehnung sowie dem Einglätten der Oberflächentopographie durch Kontaktnormalspannungen zwischen Werkstück und Werkzeug. Um eine definierte Rauheit bei Bipolarplatten zu erreichen, müssen diese gegensätzlichen Effekte im Tiefziehprozess möglichst kontrolliert bzw. gezielt beeinflusst werden. In ersten eigenen Vorarbeiten wurden das Aufrauen der Oberflächen bei freier Dehnung sowie das Einglätten der Oberflächentopographie durch Kontaktnormalspannungen experimentell untersucht.

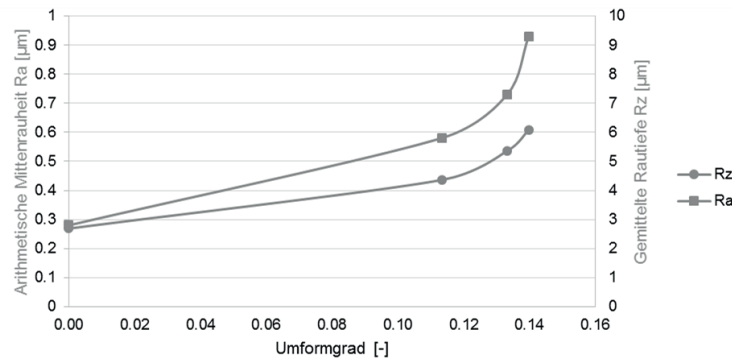


Abb. 6: Zunahme der Oberflächenrauheit von Aluminiumblechen (EN AW 5754) im Zugversuch

In einachsigen Zugversuchen konnte nachgewiesen werden, dass die durch Zugspannungen induzierte Oberflächenvergrößerung zur Zunahme der Rauheit führt und sich mit den Ergebnissen von [MÖSSLE, 1983] deckt. Am Beispiel von Aluminium (EN AW 5754) wurde sowohl ein Anstieg des Mitterrauheitswerts R_a als auch der gemittelten Rautiefe R_z mit zunehmenden Umformgrad ϕ festgestellt (siehe Abbildung 6). Das Tiefziehen von metallischen Bipolarplatten führt zu deutlich höheren Umformgraden als im Zugversuch (bis $\phi = 0,4$) durch den mehrachsigen Dehnungszustand. Aufgrund dessen ist in Bereichen, in denen kein beidseitiger Werkzeugkontakt stattfindet (z. B. Radiusbereiche der Kanäle, Abbildung 8) eine deutliche Zunahme der Rauheit zu erwarten. Durch die wirkenden Kontaktnormalspannungen sowie die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug im Tiefziehprozess können die entstandenen nativen Oberflächenspitzen jedoch teilweise eingeebnet werden. Um den Effekt der Einebnung zu quantifizieren, sind die gezogenen Proben mit einem Umformgrad von $\phi = 0,14$ zusätzlich mit Normalspannungen belastet worden. Aus dem Diagramm in Abbildung 7 geht deutlich hervor, dass durch die freie Dehnung mit zunehmender Kontaktnormalspannung die Aufrauung, verursacht, kompensiert werden kann.

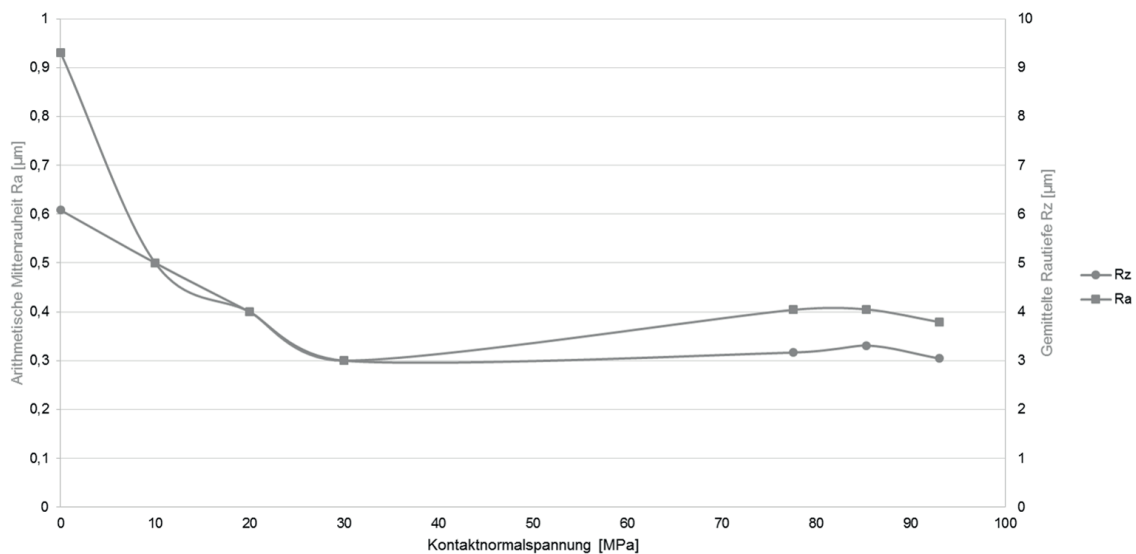


Abb. 7: Reduzierung der Oberflächenrauheit durch Kontaktnormalspannung

Eine Möglichkeit die Oberflächenrauheit zu reduzieren ist, zu Prozessende einen vollständigen Werkzeugschluss herbeizuführen und das Bauteil ganzflächig mit ausreichend hohen Kontaktnormalspannungen zu belasten. Dies ist jedoch nur bedingt möglich, da vor allem in den Radienbereichen der Kanäle eine Blechausdünnung auftritt, wie durch die FE-Simulation mit der Software *simufact.forming* in Abbildung 8 belegt werden kann. Aufgrund dieser Ausdünnung ist ein beidseitiger Werkzeugkontakt im unteren Totpunkt zur Erzeugung der notwendigen Kontaktnormalspannungen nicht möglich. Somit stellen sich Bereiche mit unterschiedlicher Rauheit am finalen Bauteil ein, die nicht a priori bestimmt werden können.

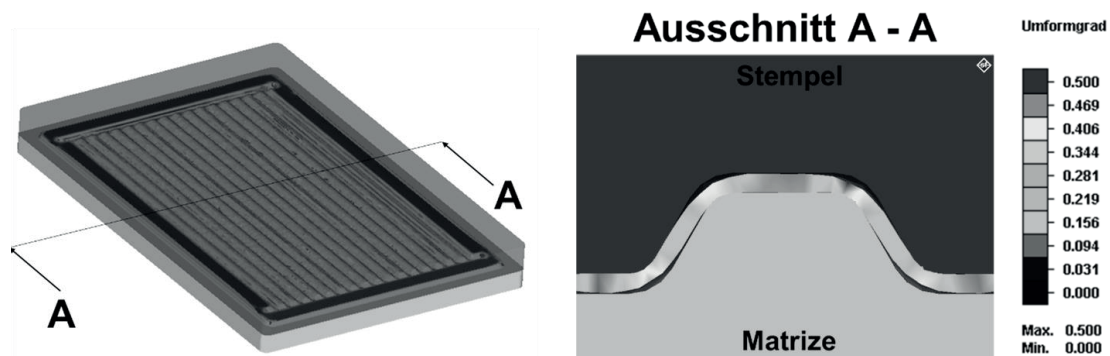


Abb. 8: numerisch ermittelte Blechausdünnung in den Radiusbereichen

Folglich sollten zukünftig die Mechanismen der Oberflächenaufrauung und Einglättung der Oberflächentopographien tiefgründig untersucht werden, um ein phänomenologisches Modell für die numerische Prozesssimulation auf Basis makromechanischer Prozessparameter der Form zu vermitteln:

$$Ra = f(\varphi, \sigma_N, v_{rel}) \quad (3)$$

Ein derartiges Modell ermöglicht die Vorausberechnung der sich einstellenden Rauheit nach dem Prozess und somit Rückschlüsse auf Prozessparameter, um die geforderte Rauheit gezielt einstellen zu können.

5. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Oberflächen mit einem Mittenrauwert bis $R_a \leq 3 \mu\text{m}$ weisen gegenüber polierten Oberflächen bis $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ einen geringeren Kontaktwiderstand sowie leicht verbesserte, Korrosions-, Turbulenz- und Hydrophobizitätseigenschaften auf. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sich Funktionseigenschaften infolge hoher Rauheit verschlechtern. Vor allem die Gefahr der Degradation, der Lochfraßkorrosion oder eine schlechtere Beschichtbarkeit gilt es zu untersuchen, um ein mögliches Optimum zu definieren. Um reale Betriebseigenschaften nachzuweisen, sind Langzeittests in Brennstoffzellen nötig.

Bei einer Messung an einem hydromechanisch umgeformten Blech konnte der Rauheitsanstieg infolge der Umformung einer Kanalstruktur nachgewiesen werden. Es wurden auf dem leicht umgeformten Steg ein Mittenrauwert $R_a = 0,14 \mu\text{m}$ ($R_z = 0,97 \mu\text{m}$) und auf dem stärker umgeformten Tiefziehradius

$R_a = 0,76 \mu\text{m}$ ($R_z = 4,43 \mu\text{m}$) gemessen. Beide Werte liegen deutlich unter $R_a = 3 \mu\text{m}$. Ein ähnlicher Anstieg der Rauheit ist auch bei den ausstehenden Untersuchungen an mechanisch umgeformten Bipolarplatten zu erwarten. Daher wird durch die Umformung keine unzulässige Gestaltabweichung der Rauheit erwartet und es könnten die Anforderungen an den Umformprozess und die Umformwerkzeuge reduziert werden. Darüber hinaus könnten infolge der geringen Rauheitszunahme bei der Halbzeugherstellung ein höherer Mittenrauwert $R_a \leq 0,6 \mu\text{m}$ akzeptiert werden. Die geringen Gestaltanforderungen wirken sich positiv auf die Halbzeug- und Fertigungskosten aus.

In diesem Paper wird zur Vergleichbarkeit mit den genannten Quellen den Mittenrauwert R_a betrachtet. Um den Einfluss der Oberfläche auf die Korrosionseffekte besser beurteilen zu können, wird eine genaue Untersuchung der Oberflächentopografie und deren Einfluss empfohlen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es konnte gezeigt werden, dass die Beschaffenheit der Oberfläche die Funktionseigenschaften metallischer Bipolarplatten beeinflusst. Im Bereich der Gestaltabweichungen 3. bis 5. Ordnung können sich höhere Mittenrauwerte begünstigend auf einige Eigenschaften auswirken. Die halbzeug- und fertigungsbedingten Rauheiten können demnach gezielt zum Verbessern der Funktionseigenschaften genutzt werden. Es kann ebenso auf erhöhte Rauheitsanforderungen an das Blechhalbzeug und die Umformwerkzeuge verzichtet werden, was geringere Produktkosten ermöglicht.

Neben der Rauheit können sich auch Gestaltabweichungen 1. und 2. Ordnung auf die Funktion der Bipolarplatte auswirken. Einflüsse von Form- und Lageabweichungen sind daher Untersuchungsgegenstand der weiteren Forschung.

7. DANKSAGUNG

Die Projektpartner bedanken sich beim Sächsischen Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr (SMWA), dem Europäischen Sozialfonds (ESF) und der Sächsischen Aufbaubank (SAB) in Dresden für die Betreuung und Förderung des Projektes HZwo:BIP – Bipolarplatten aus Sachsen im Rahmen der ESF-Technologieförderung InnoTeam.

8. QUELLEN

- [DOE, 2016] DOE Fuel Cell Technologies Office: Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan - 3.4 Fuel Cells. Hg. v. DOE Fuel Cell Technologies Office, 2016, S. 22.
- [KIM, 2012] Kim, K. M.; Kim, S. N.; Kim, J. H.; Lee, Y. Y.; Kim, K. Y.: Study on surface topography of 446M stainless steel as a bipolar plate on interfacial contact resistance of polymer electrolyte membrane fuel cell. Journal of Power Sources 220, 2012, S. 42–46.

- [MÖSSLE, 1983] Mössle, E.: Einfluß der Blechoberfläche beim Ziehen von Blechteilen aus Aluminiumlegierungen. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Stuttgart, 1983, ISBN 3-540-12837-9.
- [TAWFIK, 2012] Tawfik, H.; Hung, Y.; Mahajan, D.: Bipolar Plate Durability and Challenges. Matthew M. Mench, E. C. Kumbur und T. Nejat Veziroglu (Hg.): Polymer electrolyte fuel cell degradation, Oxford Academic Press, 2012, S. 249–291.
- [TOLOEI, 2013] Toloei, A. S.; Stoilov, V.; Northwood, D. O.: The effect of different surface topographies on the corrosion behaviour of nickel. C. A. Brebbia, A.A Mammoli, A. Klemm (Hg.): Materials Characterisation 2013, WIT PressSouthampton, 2013, S. 193–204.
- [IMMINK, 2010] Henning Immink: Superhydrophobe Oberflächen: Funktionserhaltung durch Regeneration. Dissertation. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2010.
- [HERWIG, 2015] Herwig, H.; Schmandt, B.: Strömungsmechanik. Physik - mathematische Modelle – thermodynamische Aspekte. 3. erg. Aufl. Springer Vieweg, Berlin, 2015.
- [HAUSSM, 2014] Haußmann, J.: Visualisierung und Optimierung von Wassertransportpfaden in Gasdiffusionslagen einer PEM-Brennstoffzelle. Dissertation. Universität Ulm, Ulm, 2014.

BEZÜGE UND TOLERANZEN – SPANNUNGSFELD NORM UND REALE ANWENDUNG

Martin Bohn¹, Klaus Hetsch²

¹ Bohn Hetsch Partnerschaft, martin.bohn@toleranzexperten.de

² Bohn Hetsch Partnerschaft, klaus.hetsch@toleranzexperten.de

Abstract: Es werden die Herausforderungen in der Praxis bei der Anwendung der Normen DIN EN ISO 5459 sowie DIN EN ISO 1101 aufgezeigt. Diese betreffen im Besonderen Bezüge und Bezugssysteme bei komplexen Bauteilen sowie die Toleranz Profil einer Linie. Der Norm wird die praktische, nicht normgerechte Anwendung gegenübergestellt. So wird ein notwendiges Weiterentwicklungsfeld für die Normen aufgezeigt.

KEYWORDS: BEZUG, BEZUGSSYSTEM, TOLERANZ

1. EINLEITUNG

In den DIN und ISO Normen zu Toleranzen und Bezugsstellen sind die Grundlagen teilweise beschrieben. In der realen Anwendung stoßen die Normen an Grenzen. Diese sind zum Teil auf fehlende Beschreibungen oder praxisgerechte Beispiele in der Norm zurückzuführen. Auch wird in der Praxis die Bedeutung der Symbole zum Teil anders interpretiert oder auf zu komplexe Symboliken verzichtet.

2. BEZÜGE UND BEZUGSSYSTEME

Bezüge und Bezugssysteme werden nach DIN EN ISO 5459 dazu verwendet, um Toleranzen darauf zu beziehen bzw. die Lage im Raum zu definieren. Im Folgenden wird auf einige Herausforderungen bei der Anwendung der DIN EN ISO 5459 eingegangen [5459, 2011].

2.1 Bezugssysteme an Regel- und Freiformgeometrien

In der DIN EN ISO 5459 ist sehr gut beschrieben, wie aus Regelgeometrien (Ebene, Linie, Zylinder, etc.) die Bezüge abgeleitet werden. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel.

Kennzeichnung des Bezugselements	Kennzeichnung des Bezugs im Toleranzrahmen	Bedeutung am Werkstück	Resultierender Bezug oder resultierendes Bezugssystem
Legende 1 erstes zugeordnetes (Geometrie) Element ohne Nebenbedingung 2 zweites zugeordnetes (Geometrie) Element mit Nebenbedingung der Rechtwinkligkeit bezüglich des ersten zugeordneten (Geometrie) Elements 3 drittes zugeordnetes (Geometrie) Element mit Nebenbedingung der Rechtwinkligkeit bezüglich des ersten zugeordneten (Geometrie) Elements (und Nebenbedingung der Parallelität bezüglich des zweiten zugeordneten (Geometrie) Elements) 4 Ebene, die das erste zugeordnete (Geometrie) Element ist 5 Schnittpunkt zwischen der Ebene und der Achse des zweiten zugeordneten (Geometrie) Elements 6 Gerade, die dem Schnitt zwischen der zugeordneten Ebene und der Ebene, welche die beiden Achsen enthält			
ANMERKUNG Für das Zuordnungsverfahren siehe Anhang A.			

Abb. 1: Ableitung des Bezugssystems bei Regelgeometrien [5459, 2011]

Wie bei einer Freiformgeometrie (im Norm-Sprachgebrauch: komplexe Fläche) aus der Fläche der Bezug abgeleitet wird, ist nicht intuitiv verständlich. Dies zeigt die folgende Abbildung.

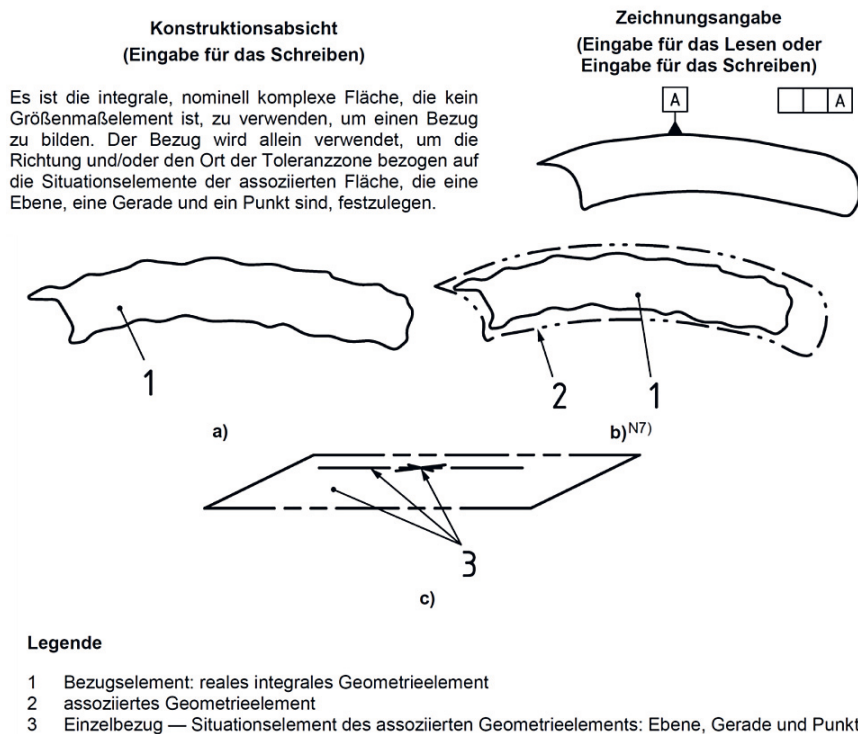


Abb. 2: Ableitung des Bezugssystems bei Freiformgeometrien [5459, 2011]

Für eine einfache Anwendung in der Praxis sind klarere und verständlichere Beschreibungen zwingend erforderlich. Ein Bezugselementsymbol auf einer Freiformgeometrie wird normgerecht praktisch kaum angewendet.

2.2 Bezug aus Bezugsstellen

Die Verwendung von Bezugsstellen bei Freiformgeometrien ist ebenfalls nicht eindeutig beschrieben. Die folgende Abbildung zeigt die Anwendung nach der DIN EN ISO 5459.

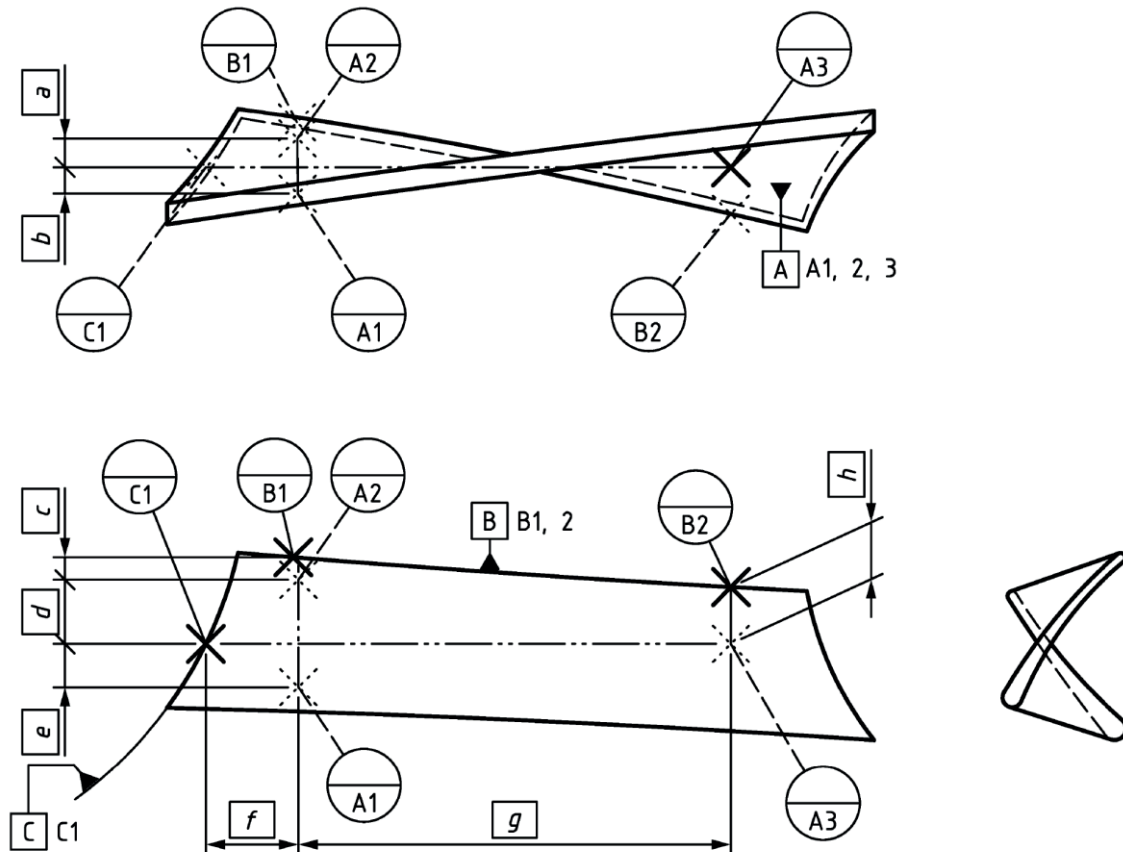


Abb. 3: Bezüge und Bezugsstellen bei Freiformgeometrien [5459, 2011]

In der Norm steht explizit nicht, wie die Ableitung vom Bezug zum Einzelbezug vorzunehmen ist. Daher ist Folgendes reine Spekulation. Nach Abbildung 2 müsste sich eine Ebene aus dem Bezug A, eine Linie und ein Punkt ergeben. Dies wäre in dem Beispiel nicht zielführend, da die Linie aus dem Bezug B und der Punkt aus dem Bezug C gebildet werden kann. Somit könnte der Bezug A eine Ebene durch die Bezugsstellen A1, A2 und A3 sein. Falls die Ebene durch die Bezugsstellen geht, ist der Normalenvektor der Fläche an den Bezugsstellen A1, A2 und A3 unterschiedlich und entspricht auch nicht dem Normalenvektor der Ebene.

Eine Möglichkeit mit den Bezugsstellen umzugehen, bietet das nicht genormte Referenz-Punkt-System. Dies zeigt die folgende Abbildung.

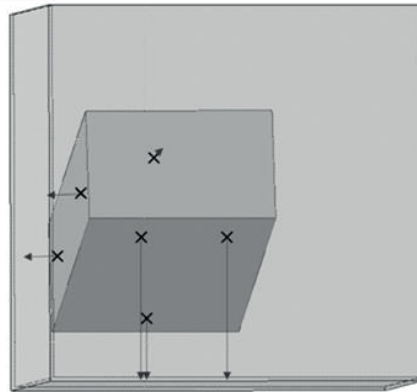


Abb. 4: Projektion der Bezugsstellen auf ein Koordinatensystem

Hier werden die Bezugsstellen auf die Ebenen eines Koordinatensystems projiziert. Der Grundgedanke ist, dass Bauteil auf einer Aufnahme aufliegt. Diese Vorgehensweise ist vor allem dann sinnvoll, wenn die Wirkrichtungen der Bezugsstellen parallel zu den Koordinatenachsen sind.

Die folgende Abbildung zeigt einen häufigen Fall aus der industriellen Praxis.

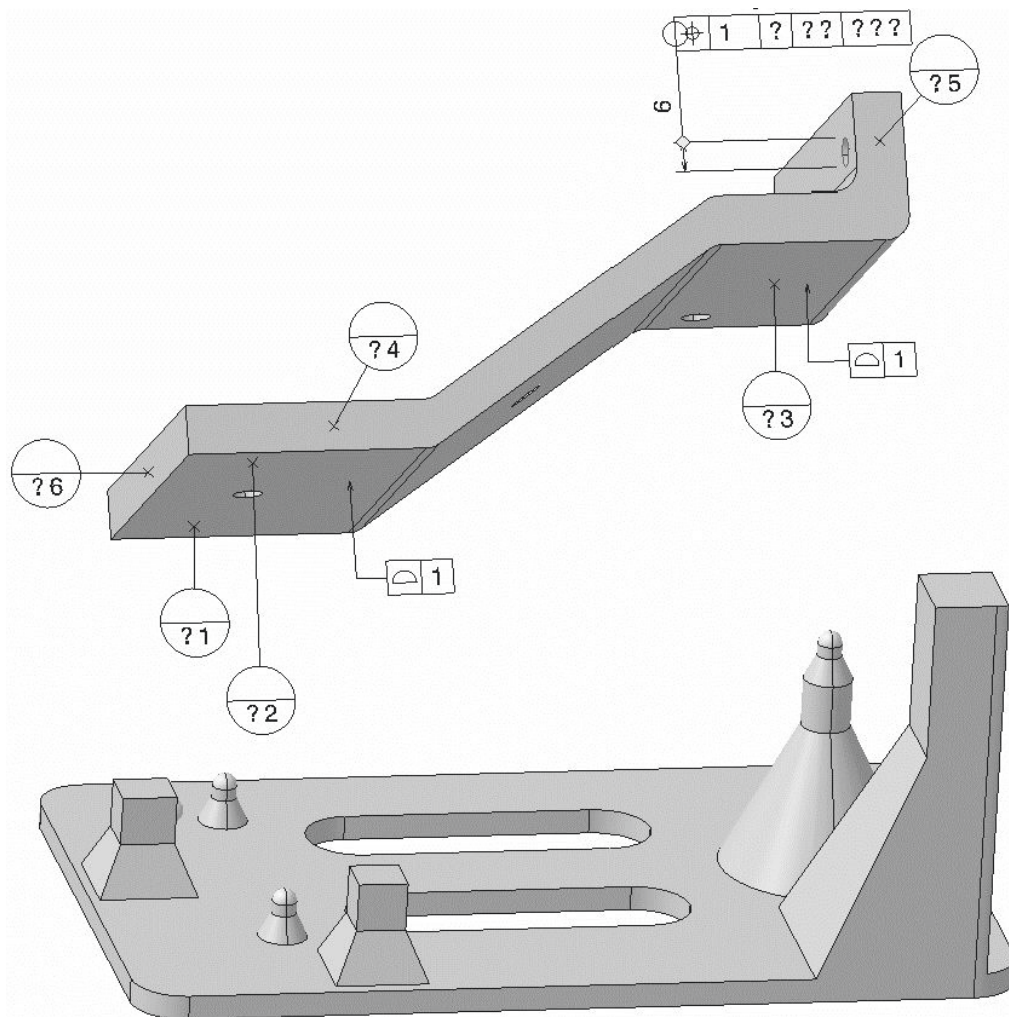


Abb. 5: Aufgabenstellung, Ausrichtung Primärebene

Das Bauteil soll an den Punkten 1-6 auf die Aufnahme gelegt werden. Zu diesen Punkten ist das Loch zu tolerieren. (Hinweis: In dieser und allen folgenden Darstellung wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Eintragung der TEDs verzichtet.)

Laut der Norm müssen Bezugsstellen, die einen einzelnen Bezug bilden auf einem Geometrieelement liegen. Somit ergibt sich folgendes Bezugssystem.

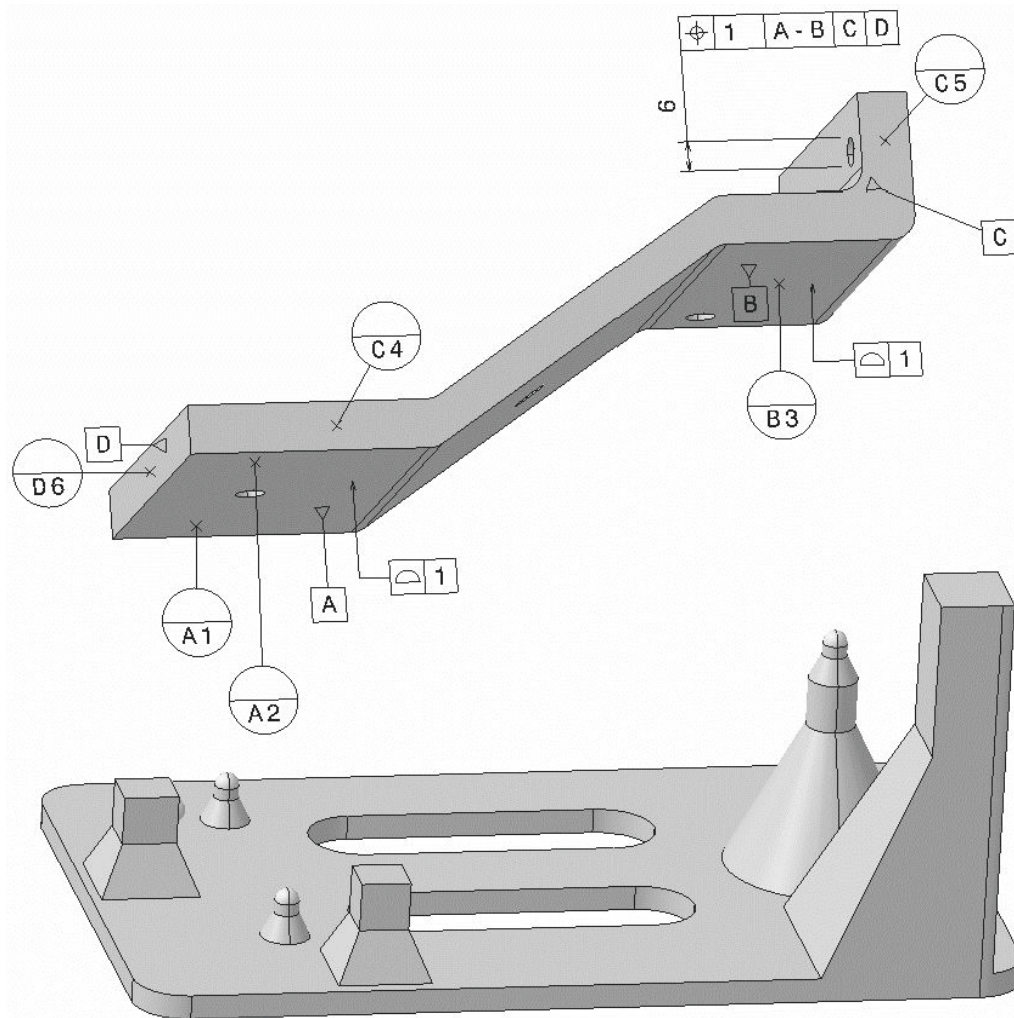


Abb. 6: Bezug nach ISO 5459, Ausrichtung Primärebene

Der primäre Bezug muss als gemeinsamer Bezug gebildet werden, da die Punkte 1, 2 und 3 nicht auf einer Fläche liegen. Der gemeinsame Bezug ist die mittlere Ebene zwischen den Bezügen A und B. Die Bezüge A und B sind Ebenen. Das Problem liegt in der Bestimmung dieser Ebenen, denn aus einem oder zwei Punkten kann alleine keine Ebene gebildet werden. Werden im Bezug A oder B weitere Punkte angetastet, unterliegen diese Punkte der Toleranz Profil einer Fläche. Dies führt zu einem Verkippen der Bezüge A und B und somit zu einer Verkipfung des gemeinsamen Bezugs. Dies hat Einfluss auf die Messung der Positionstoleranz. Der gemeinsame Bezug bedeutet nicht zwangsläufig eine Auflage an den Bezugsstellen 1-3 an der Aufnahme.

In der industriellen Praxis wird oft folgende Vorgehensweise gewählt.

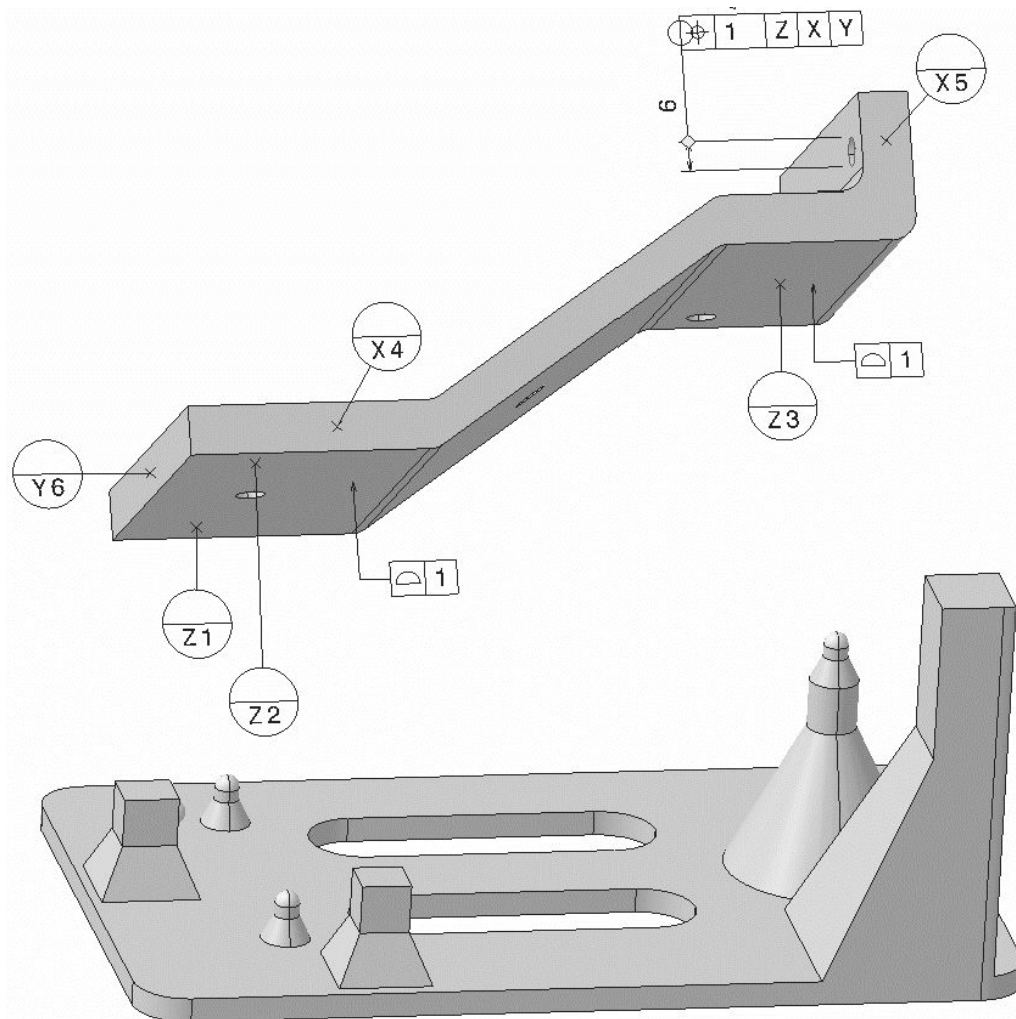


Abb. 7: Bezug aus industrieller Praxis, Ausrichtung Primärebene

Auf einer Zusammenfassung der Bezugsstellen zu Bezügen wird zwangsläufig verzichtet, da sich Z1, Z2 und Z3 nicht normgerecht in ihrer Funktion zusammenfassen lassen. Die Ausrichtung erfolgt nach dem nicht genormten RPS Prinzip (Referenz-Punkt-System).

3. TOLERANZEN

In der DIN EN ISO 1101 sind die Form- und Lagetoleranzen beschrieben. Analog den Bezügen stößt die Beschreibung in der Norm an Grenzen. Im Folgenden wird beispielhaft auf einige Herausforderungen bei der Anwendung der DIN EN ISO 1101 eingegangen [1101, 2013].

3.1 Profil einer Linie

In der DIN EN ISO 1101 Toleranz Profil einer Linie nur für die Abweichung in einem Schnitt definiert. Die folgende Abbildung zeigt die Anwendung.

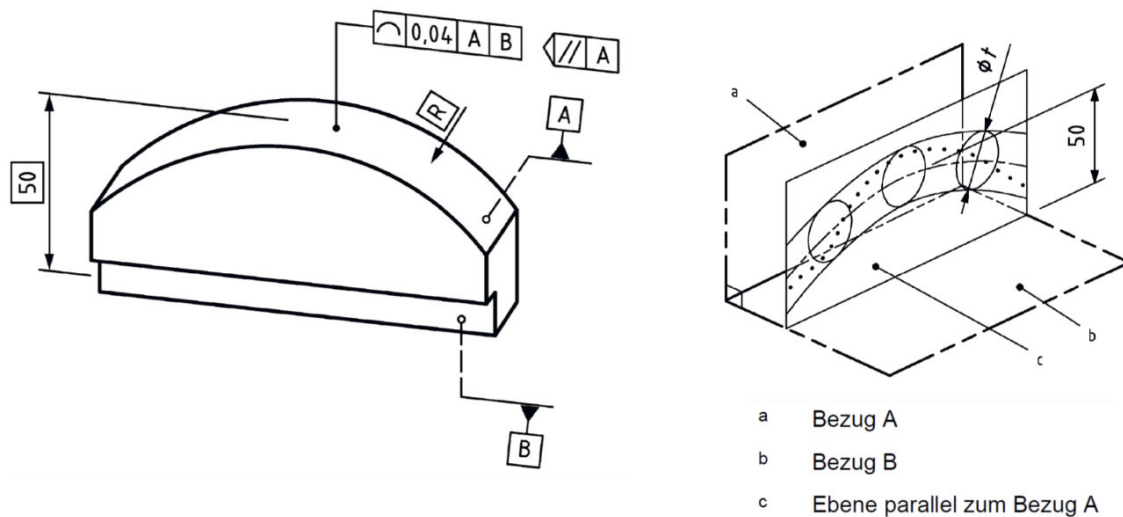


Abb. 8: Profil einer Linie nach DIN EN ISO 1101 [1101, 2013]

Dass Körperkanten oder sehr schmale Flächen ebenfalls Linien sein können, wird nicht berücksichtigt. Die folgende Abbildung zeigt eine industrielle Tolerierung eines Ausschnitts in einem dünnen Blech.

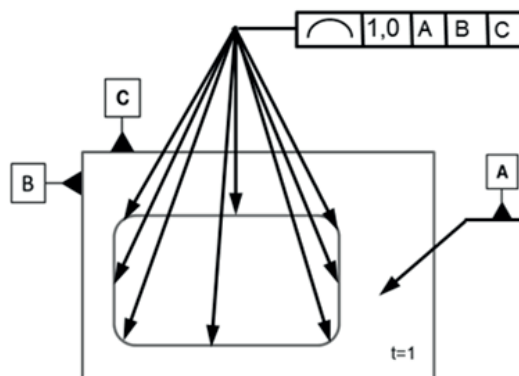


Abb. 9: Praxisbeispiel Profil einer Linie

Wenn die Wanddicke so klein wird, dass die Fläche nicht mehr mit der üblichen Messtechnik gemessen werden kann, wird die Fläche als Linie betrachtet und das Toleranzsymbol Profil einer Linie verwendet. Ein typischer Grenzwert zur Unterscheidung Fläche oder Linie wird anhand des Durchmessers der Tastkugel definiert. Ist die Fläche schmäler als 3x Tastkugeldurchmesser, wird sie als Linie betrachtet.

3.2 Rundum-Symbol

Zeichnungen wie in Abbildung 9 sind selten. Die einzelnen Toleranzpfeile werden in der Praxis mittels des Rundum-Symbols zusammengefasst. Dies zeigt die folgende Abbildung.

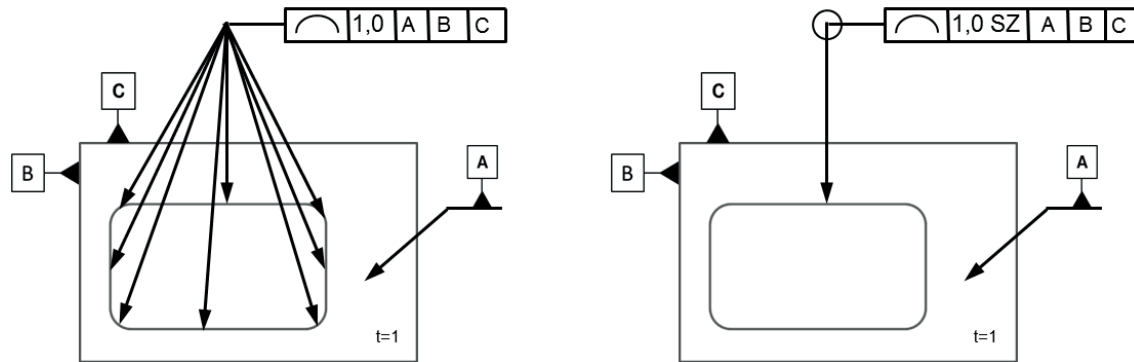


Abb. 10: Praxisbeispiel Rundum-Symbol bei Profil einer Linie

Diese Anwendung ist nach DIN EN ISO 1101 nicht definiert, denn das Rundum-Symbol bei Profil einer Linie ist nur im Schnitt definiert.

4. FAZIT

Anspruch der Norm ist es, den aktuellen Stand der Technik abzubilden. Dazu besteht der Handlungsbedarf, die Normen zu vereinfachen und an die Praxis anzunähern bzw. konkrete Lösungen für die Probleme aus der Praxis zu liefern.

5. QUELLEN

- [Bohn, 2016] Bohn, M; Hetsch, K.: Funktionsorientiertes Toleranzdesign. Carl Hanser Verlag, München, 2016.
- [1101, 2013] DIN EN ISO 1101:2013: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Beuth-Verlag, Berlin, 2014.
- [5459, 2011] DIN EN ISO 5459:2011: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme. Beuth-Verlag, Berlin, 2013.

WIE VERGLEICHBAR IST DIE GEOMETRISCHE TOLERIERUNG NACH ISO MIT DER ASME?

Beata Schönberg

Abstract: Die korrekte Interpretation von Form- und Lagetoleranzen nach ISO und ASME stellt auf Grund ihrer Komplexität jeden Anwender vor einer großen Herausforderung. Jede Interpretation [lat. Interpretation: „Auslegung, Übersetzung] durch den Anwender kann subjektive Anteile der Auslegung, Übersetzung und Erklärung enthalten, die zu einer gewissen Interpretationsunschärfe führen können und diese wiederum zu unterschiedlichen Messergebnissen oder zu weniger optimal funktionierenden Bauteilen. Der vorliegende Beitrag veranschaulicht diesen Sachverhalt sowie daraus Resultierende Konsequenzen anhand ausgewählter Beispiele und zieht abschließend Bilanz zur aktuellen Situation aus Anwendersicht.

KEYWORDS: ISO, ASME, TOLERIERUNG, GPS, GD&T

1. EINFÜHRUNG

Die internationale Normung stellt mit dem ISO-GPS Normensystem ein umfassendes Werkzeug zur funktionsgerechten Bauteil-Tolerierung zur Verfügung. Die Abkürzung GPS steht für Geometrische Produktspezifikation und Verifikation. Parallel dazu finden im amerikanischen Wirtschaftsraum vorrangig die von der American of Society of Mechanical Engineering herausgegebene ASME 14.5-2009 „Geometrical Dimensioning and Tolerancing (GD&T)“ [ASME, 2009] bzw. deren Vorgänger ASME 14.5-1994 Anwendung. Sowohl die ISO als auch die ASME können dabei als Organisationen für Standardisierung auf eine lange Historie zurückblicken. Die ASME wurde im Jahr 1880 gegründet und die ISO im Jahr 1997.

Die geometrische Produktspezifizierung bzw. Tolerierung erfolgt in der ISO-GPS und in der ASME 14.5 mit einer Symbolsprache. Mit dieser Symbolsprache werden die Bezugssysteme, die geometrische Toleranzen sowie die Toleranzzonen beschrieben. Obwohl die Symbole in der ISO und ASME zum großen Teil gleich oder ähnlich sind, sind beide Tolerierungssysteme nur zu 70 – 80% kompatibel. Unterschiede gibt es bei einigen Toleranzangaben in der Spezifikation und Verifikation, obwohl die häufig gleichen Symbole in ISO und ASME dem ungeschulten Betrachter oft eine 100 % Kompatibilität vortäuschen.

2. UNTERSCHIEDE IM TOLERIERUNGSPRINZIP

Ein wesentlicher Unterschied beider Normensysteme besteht im zu Grunde liegenden gegensätzlichen Tolerierungsprinzip. ISO basiert auf dem

„**Unabhängigkeitsprinzip**“, ASME basiert auf dem „**Hüllprinzip**“, auch Rule #1 genannt.

Hüllprinzip: perfekte Form im Maximum-Material-Zustand („size controls form“)

Unabhängigkeitsprinzip: Form und Größe sind unabhängig [8015, 2011]

Die Auswirkung der unterschiedlichen Tolerierungsprinzipien beschränkt sich nicht nur auf ein einzelnes Geometrieelement sondern auch darauf, wie gemeinsam tolerierte Gruppen von Geometrieelementen oder Features gemessen und ausgewertet werden.

Subjekt	ISO GPS Spezifikation	ASME 14.5-2009
Hüllbedingung	Ⓔ	default [Rule #1]
Unabhängigkeitspr./ Independency	default	Ⓘ
Simultaneous Requir.	CZ	default
Separate Requirement	default [Unabhängigkeitspr.]	SEPT REQ

Abb. 1: Unterschiede der „Default-Regeln“ in ISO und ASME

2.1 Spezifikation der Größenmaße nach ISO-GPS und ASME

Das unterschiedliche Tolerierungsprinzip wirkt sich auch auf lineare Größenmaße auf. So gilt als Default-Regel in der ASME für Größenmaße das Hüllprinzip und in der ISO das Unabhängigkeitsprinzip.

$$\text{ASME } \varnothing 30 \pm 1 \neq \text{ISO } \varnothing 30 \pm 1$$

Nach ASME definiert das Maß $\varnothing 30 \pm 1$ für einen Zylinder die äußere Hülle von $\varnothing 31$ mm, welche nicht durchbrochen werden darf und das Zweipunktmaß $\varnothing 29$, welches nicht unterschritten werden darf. Dies ist vergleichbar mit dem Taylor'schen Grundsatz. Die Form des Zylinders muss am Maximum-Material-Zustand „perfekt“ sein, damit der Hüllzylinder nicht verletzt wird. In der ASME wird diese Regel Rule #1, und „Size controls Form“ bezeichnet.

In der ISO entspricht dieselbe Maßangabe $\varnothing 30 \pm 1$ dagegen nur einem örtlichen Zweipunktmaß. Die Form oder die Hülle wird bei Zweipunktmaßen nicht mit betrachtet, da hier das Unabhängigkeitsprinzip nach der ISO 8015 gilt.

Unabhängigkeitsprinzip:

ISO $\varnothing 30 \pm 1$ entspricht ASME $\varnothing 30 \pm 1$  (Independency-Symbol)

Hüllprinzip:

ISO Ø30±1  entspricht ASME Ø30±1

2.2 Beispiel einer ISO-GPS-tolerierten Zeichnungsansicht

Die folgende Abbildung (Abb. 2) zeigt eine Zeichnungsansicht nach ISO-GPS toleriert und die Interpretationsschwierigkeiten nach ASME. Die nach ASME 14.5-2009 nicht unterstützten geometrischen Tolerierungen sind exemplarisch durchgestrichen.

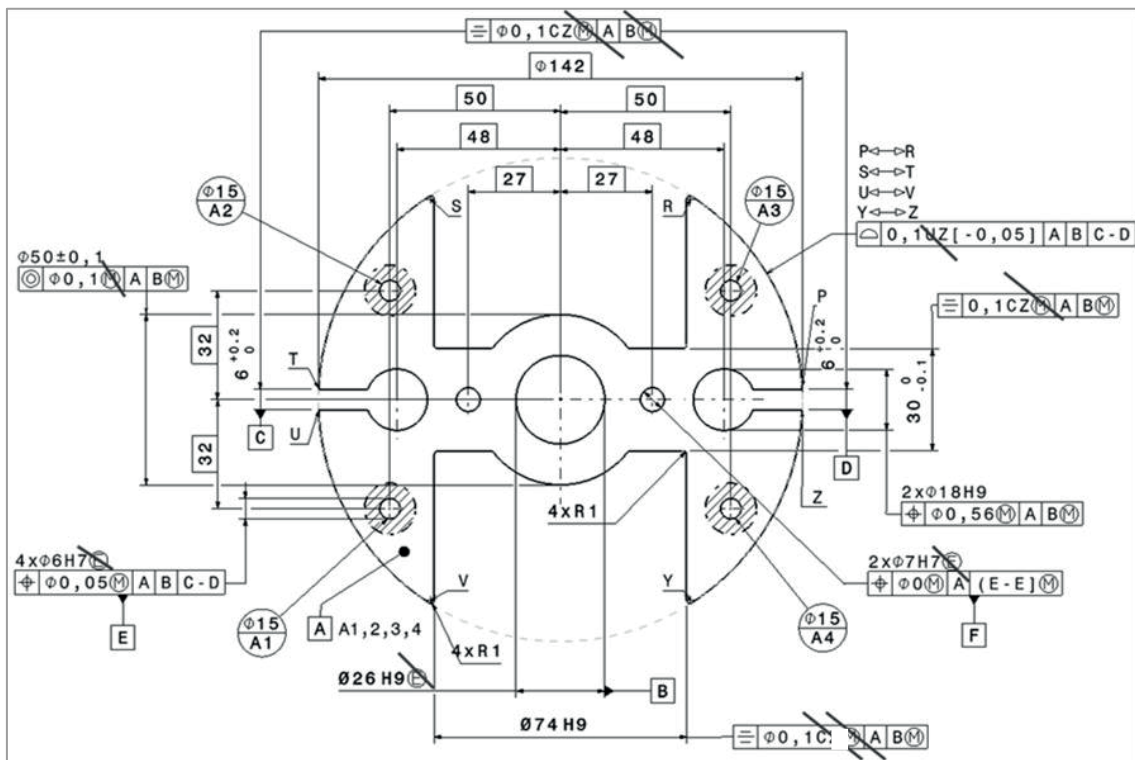


Abb. 2: Beispielzeichnung nach ISO-GPS

Folgende Spezifikationskonflikte würden sich ergeben, wenn eine ISO-GPS Zeichnung nach ASME bewertet werden würde:

- 1) Der Buchstabe E für Hüllprinzip für Größenmaße ist als Symbol in der ASME nicht vorhanden. In der ASME gilt das Hüllprinzip Default-mäßig für Größenmaße und benötigt deshalb kein extra Symbol. Es gilt hier die Rule #1, wonach die Größe die Form bestimmt.
- 2) Das Symbol CZ für Common Zone bedeutet gemeinsame Toleranzzone und ist in der ASME so nicht spezifiziert. Mit CZ soll in dieser Zeichnungsansicht erreicht werden, dass die mit der Symmetrietoleranz

tolerierten Mittelebene auf beiden Seiten gemeinsam gemessen und ausgewertet werden. Da in der ASME Default-mäßig das Hüllprinzip gilt, werden Default-mäßig beide Mittelebenen automatisch gemeinsam gemessen und ausgewertet. In der ISO gilt jedoch als Default das Unabhängigkeitsprinzip, und damit die getrennte Messung und Auswertung. Erst durch den Modifikator CZ wird die Mittelebene gemeinsam betrachtet.

- 3) Das in der Zeichnung verwendete Symbol UZ im Toleranzrahmen der Profiltoleranz des Außendurchmessers gibt an, dass die Profiltoleranzzone einseitig nach innen verschoben ist. In der ASME wird ein ähnliches Symbol verwendet, das Symbol U.
- 4) Ein weiterer Unterschied ist die Anwendung des Modifikators M für die Maximum-Material-Bedingung. Während in der ISO auch für Symmetrie und Koaxialitätstoleranzen die Maximum-Material-Bedingung erlaubt ist, ist dies nach der ASME speziell für Symmetrie und Koaxialität nicht erlaubt.

2.3 Unterschiede bei der Koaxialitäts- und Symmetrietoleranz

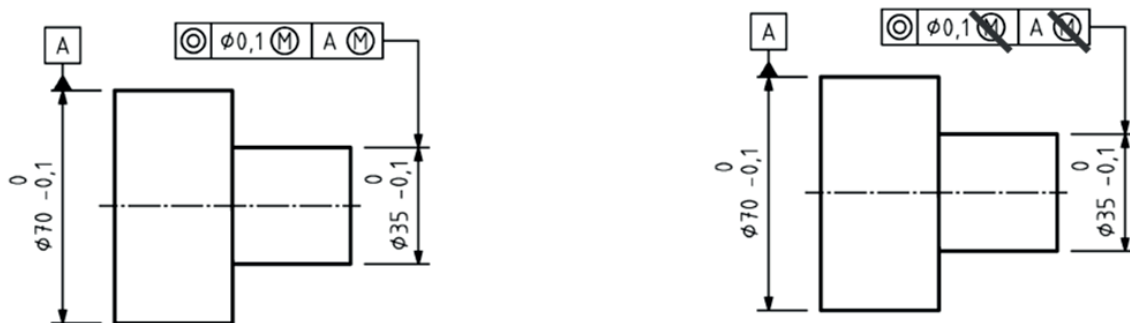


Abb. 3: Tolerierung einer Koaxialität nach ISO (links) und ASME (rechts)

Ein weiterer Unterschied besteht in der Verwendung des Modifikators M für Maximum-Material-Bedingung für Koaxialitäts- und Symmetrietoleranz. Während die ISO GPS, speziell die ISO [2692, 2014] den Modifikator M für Symmetrie und Koaxialität erlaubt (Bonustoleranz) darf der Modifikator in der ASME weder für Symmetrie noch für Koaxialität angewendet werden. Alternativ empfiehlt die ASME 14.5-2009 die Positionstoleranz mit dem Modifikator M anwenden.

2.4 Unterschiedliche Spezifikation der Winkelmaße

Winkelmaße sind in der ISO und der ASME unterschiedlich spezifiziert. So begrenzen nach ISO 14405-2 die Winkeltoleranzen keine Formabweichung (Abb. 4-links). [14405, 2011]

Nach der ASME 14.5-2009 dagegen, begrenzen die Winkeltoleranzen die Formabweichung (siehe Rule#1 und Abb. 4-rechts).

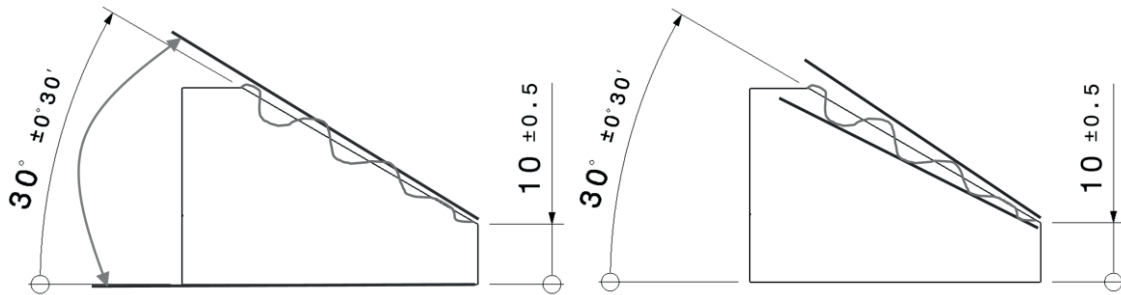


Abb. 4: Spezifikation der Winkelmaße nach ISO (links) und ASME (rechts)

Nach der ASME 14.5-2009 dagegen, begrenzen die Winkeltoleranzen die Formabweichung (siehe Rule#1).

2.5 Einschränkung bei der Anwendung von Formtoleranzen in der ASME

In der ASME ist die Anwendung der Formtoleranzen etwas eingeschränkter als in der ISO. Nach ISO [1101, 2015] können koplanare Flächen mit einer Ebenheitstoleranz und dem Modifikator CZ zu einer gemeinsamen Toleranzzone zusammengefasst werden. In der ASME 14.5-2009 gilt jedoch, dass Formtoleranzen, z. B. Ebenheit, immer nur auf einzelne Features anwendbar sind. Als Alternative kann mit einer Profiltoleranz eine Koplanarität für 2 separate Flächen spezifiziert werden.

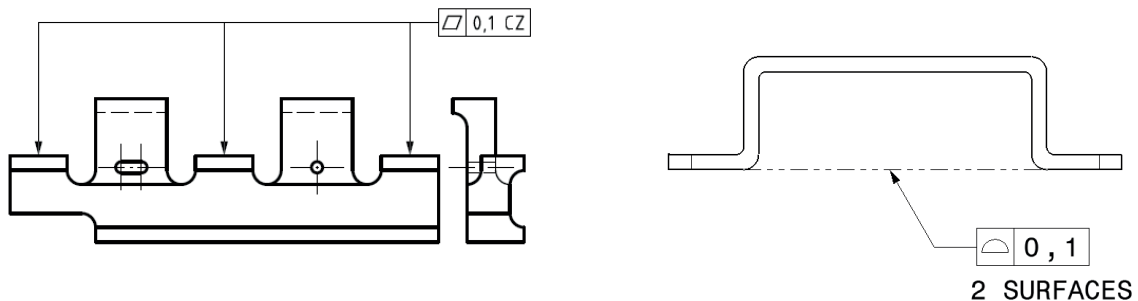


Abb. 5: Tolerierung koplanarer Flächen nach ISO (links) und AMSE (rechts)

Die beiden unterschiedlichen Default-mäßig geltenden Tolerierungsprinzipien in ISO (Abb. 6-links/Mitte) und ASME (Abb. 6-rechts) bewirken auch Spezifikationsunterschiede bei einer umlaufenden Profiltoleranzzone.

ISO/DIS [5458, 2016] (E) :

Jedes Geometrieelement wird einzeln für sich ausgewertet, wenn kein CZ „combined zone“ im Toleranzrahmen steht, siehe Unabhängigkeitsprinzip.

ASME 14.5-2009:

Alle Geometrieelemente bilden eine kombinierte Toleranzzone um das theoretisch genaue Profil, siehe Hüllprinzip bzw. Rule #1.

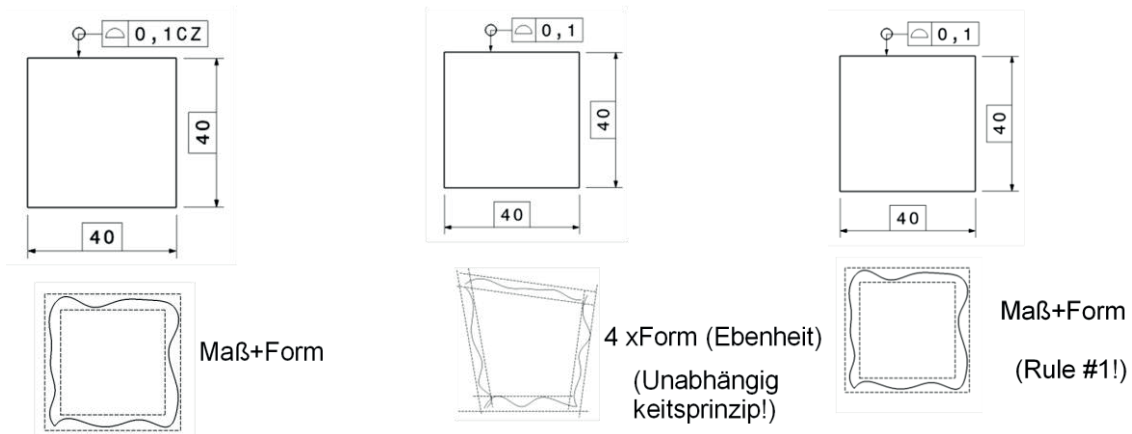


Abb. 6: Umlaufende Flächenprofiltoleranz nach ISO (links und Mitte) und nach ASME (rechts)

2.6 Profiltoleranz-Interpretation

Die Form einer Profiltoleranzzone wird in der ASME 14.5-2009 anders als in der ISO [1660, 2013] (E) spezifiziert.

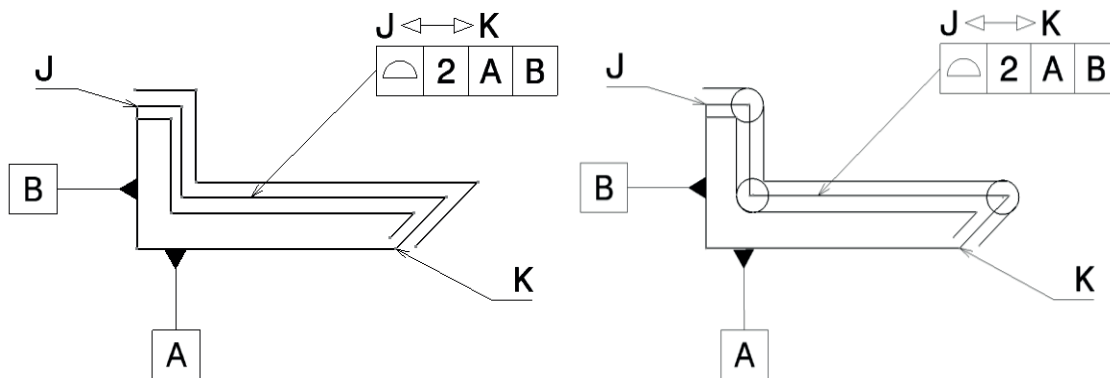


Abb. 7: Interpretation einer Profiltoleranz nach ISO (links) und ASME (rechts)

Nach ASME gelten Profiltoleranzen normal (rechtwinklig) zum „wahren Profil“ an allen Punkten entlang der Fläche. Die Begrenzung der Toleranzzone folgt der Form des „wahren Profils“. An einer scharfen Ecke folgt die Toleranzzone dem Schnittpunkt der Begrenzungslinien, siehe Abbildung 7-rechts.

Nach ISO 1660 folgt die Toleranzzone der Nenngeometrie, indem eine Kugel an dem Profil entlang geführt wird. Es bildet sich hier anstelle einer scharfen Ecke eine abgerundete Profilecke, siehe Abbildung 7-links.

2.7 Positionstoleranzen

In der ISO und ASME gibt es unterschiedliche Definitionen für die, insbesondere bei der Verbundtolerierung mit einem doppelten Toleranzrahmen.

In der ASME 14.5-2009 positioniert die obere Positionstoleranz das Lochbild zum Bezugssystem, und im unteren Positionstoleranzrahmen werden die Löcher noch einmal enger zueinander positioniert (Abb. 8).

In der ISO positioniert zwar die obere Positionstoleranz die Löcher auch zum Bezugssystem, aber die untere Positionstoleranz positioniert die Löcher nicht zueinander, sondern definiert nur die Rechtwinkligkeitstoleranz der Bohrungsachsen zur Bezugsfläche A (Abb. 9).

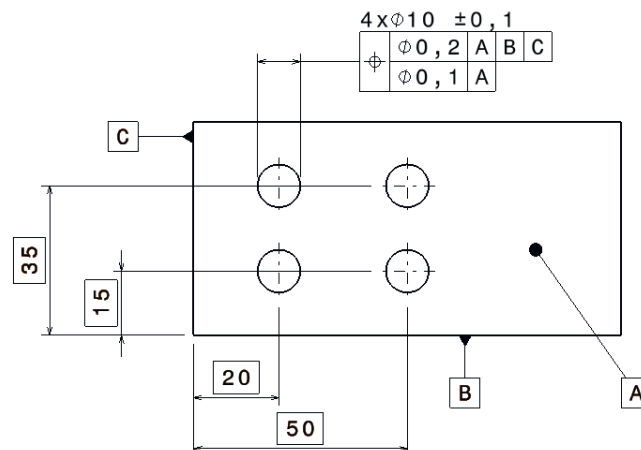


Abb. 8: Positionstolerierung von Lochmustern nach ASME

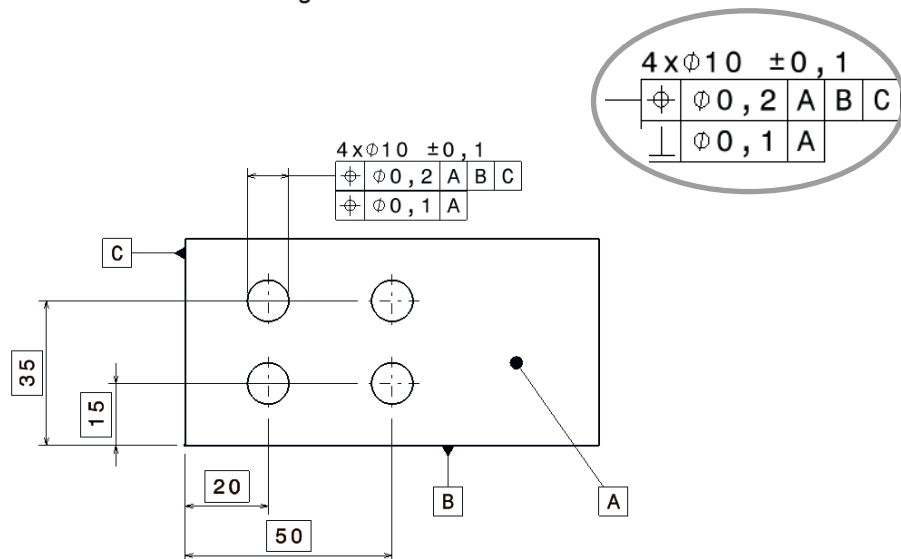


Abb. 9: Positionstolerierung von Lochmustern nach ISO

3. SIMULTANE UND SEPARATE MESS-/ PRÜFAUSWERTUNG

Bei der Messauswertung oder Lehrung von Lochmustern wirken sich die unterschiedlichen Tolerierungsprinzipien ebenfalls aus.

Nach ASME werden die im Bild dargestellten Lochbilder simultan ausgewertet, das heißt, die Lage zueinander wird ebenfalls geprüft. Die Prüfung kann zum

Beispiel mit einer Lehre (Lehre mit aufweitbaren Domen), die beide Lochmuster gleichzeitig prüft, durchgeführt werden.

Nach ISO GPS 5458 werden die Lochmuster unabhängig zueinander geprüft.

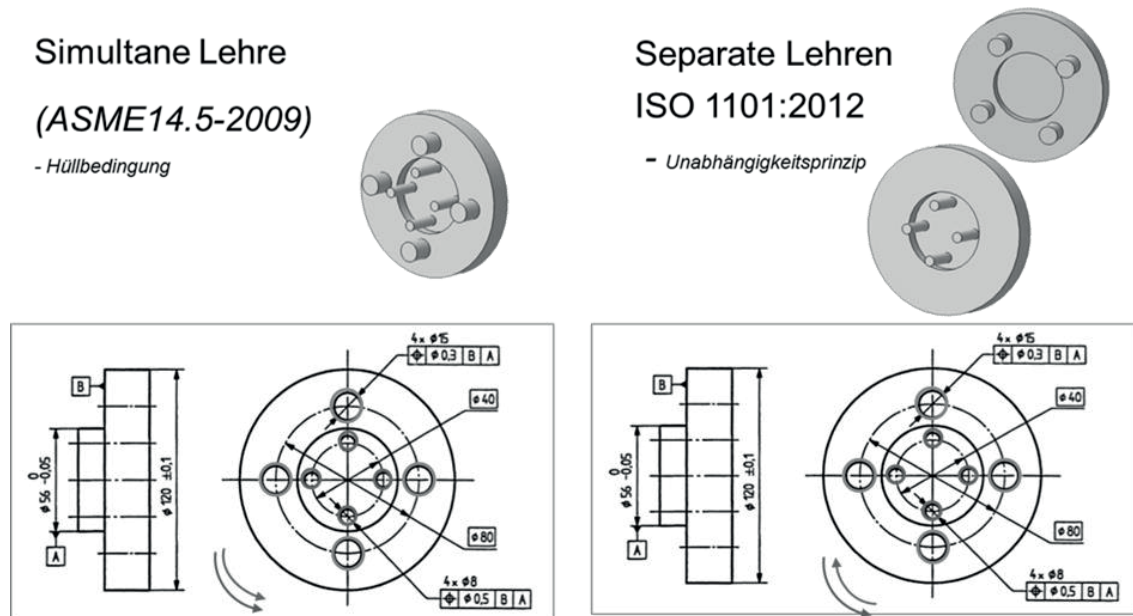


Abb. 10: Prüfung von Lochmustern

4. QUELLEN

- [ASME, 2009] ASME 14.5-2009: Geometrical Dimensioning and Tolerancing.
- [1101, 2015] ISO/DIS 1101.3:2015: Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out.
- [1660, 2013] ISO 1660:2013 (E): Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Profile tolerancing.
- [2692, 2014] ISO 2692:2014: Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Maximum material requirement (MMR), least material requirement (LMR) and reciprocity requirement.
- [5458, 2016] ISO/ DIS 5458:2016 (E): Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Positional and pattern tolerancing.
- [8015, 2011] ISO 8015:2011: Geometrical product specifications (GPS) – Fundamentals – Concepts, principles and rules.
- [14405, 2011] ISO 14405-2:2011: Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 2: Dimensions other than linear sizes.

INTEGRATIVE MESSTECHNIK – NEUENTWICKLUNGEN IN DER AUTOMATISIERTEN RAUHEITS- UND KONTURMESSTECHNIK

Rolf Klöden

CASE enterprises GmbH, CEO, rolf.kloeden@case-enterprises.eu

Abstract: Trotz weitreichender Neuentwicklungen in der Oberflächenmesstechnik ist das Tastschnittverfahren immernoch die dominierende Technologie in der industriellen Messtechnik von Rauheiten. Mit dem Einsatz dieser Systeme in der integrativen Messtechnik ergeben sich besondere Schwierigkeiten der Referenz bei der Nutzung mechanischer Führungen für Bezugsebenentaster. Es wird ein Laserinterferometrischer Taster vorgestellt, der als Referenz bzw. Bezugsgerade einen Laserstrahl verwendet und gleichzeitig einen großen Messbereich bei gleichbleibend geringer Auflösung sicherstellt.

KEYWORDS: TASTSCHNITTMESSSYSTEM, BEZUGSEBENENTASTER,
LASERINTERFEROMETER, RAUHEITSMESSUNG, INTEGRATIVE MESSTECHNIK

1. EINLEITUNG

1.1 Tastschnittsysteme für die Rauheits- und Konturmessung

Trotz weitreichender Entwicklungen in der Oberflächenmesstechnik stellt das Tastschnittverfahren immer noch das dominierende Messprinzip für die Rauheitsmessung in der Industrie dar. Das hängt im Wesentlichen damit zusammen, dass dieses Verfahren das erste und lange Zeit das einzige Messverfahren für die Oberflächenrauheit darstellte, das genormt war. Alle heute noch in technischen Zeichnungen angegebenen Rauheitstoleranzen basieren somit auf funktionell korrelativen Werten, die mit dem Tastschnittmessverfahren ermittelt wurden. Bei der Anwendung neuer, moderner Messverfahren stellt sich aus diesem Grund immer wieder die Frage, inwieweit die gemessenen Werte mit denen, die mit dem Tastschnittverfahren ermittelt wurden, vergleichbar sind, um bei der Überprüfung der Zeichnungstoleranzen keinen Fehlinterpretationen aufzusitzen. Diese Fragestellungen sind durchaus berechtigt, da sich die zahlreichen moderneren 2D- und 3D-Oberflächenmessverfahren zum Teil sehr erheblich von dem Prinzip des Tastschnittverfahrens unterscheiden. Insbesondere die unterschiedlichen Interaktionen der Sensorik mit der zu messenden Oberfläche führen hier zum Teil zu sehr verschiedenen Ergebnissen, so dass in der heutigen Normung sogar zwischen mechanischen und elektromagnetischen Oberflächen unterschieden wird.

Um diese Probleme zu umgehen und die Zertifizierung und Auditierung von Prüfprozessen nicht zu erschweren, werden heute überwiegend weiterhin Tastschnittgeräte in der Industrie eingesetzt, obwohl sie bezüglich ihrer Messzeit und Anfälligkeit gegenüber Störeinflüssen zum Teil deutlich Nachteile aufweisen.

Auf Grund der damit begründet anhaltenden Nachfrage nach Tastschnittmessgeräten wurden diese Systeme in den vergangenen Jahrzehnten zunehmend weiter ausgebaut, verbessert und dem aktuellen Stand der Technik kontinuierlich angepasst. Am Grundprinzip hat das allerdings nichts geändert. Eine Tastnadel mit definiert genormter Spitzengeometrie wird mittels eines Vorschubgerätes entlang einer Referenzgeraden über die zu messenden Oberflächen gezogen. Die Auslenkung der Tastnadel senkrecht zur Bewegungsrichtung wird dabei mit einem geeigneten Wandlersystem erfasst und den Lateralpositionen zugeordnet, so dass ein 2D-Oberflächenprofil erstellt werden kann, an dem dann die verschiedensten Rauheitsparameter ermittelt werden können. (Abb.1)

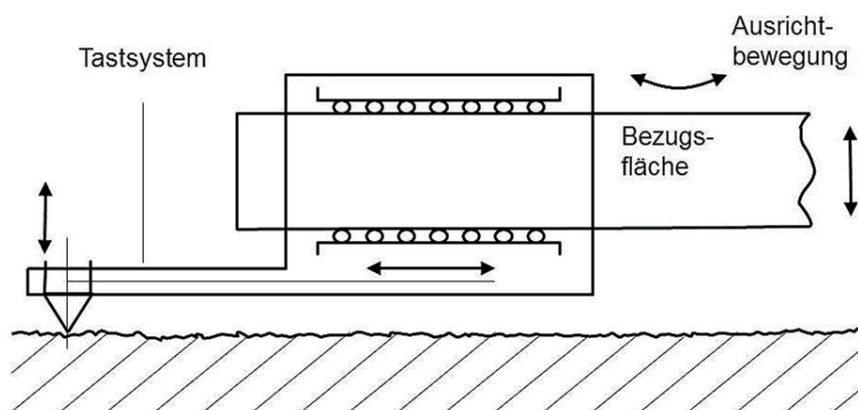


Abb. 1: Tastsystem des Tastschnittmessgerätes

Stützt sich das Tastsystem bei der Messung nicht mit einer oder mehreren Kufen auf der zu messenden Oberfläche ab, so wird hierbei von einem Freitastsystem oder Bezugsebenentaster gesprochen. Dies ist die heute vorzugsweise angewendete Methode, da hierbei keine mechanische Vorfilterung der Welligkeit erfolgt und keine Verzerrungen des Oberflächenprofils durch ein ungünstiges Verhältnis der Wellenlänge der Oberfläche zum Abstand Tastnadel und Kufe auftreten.

1.2 Die Referenz bei Freitastsystemen und deren Probleme im fertigungsnahen Einsatz

Die Qualität eines Tastschnitt-Oberflächenmesssystems hängt u.a. im Wesentlichen von der Geradföhrung des Gerätes ab, die als Referenz des Bezugsebenentastsystems fungiert. In der Vor-Computer-Zeit wurde deshalb von Herstellern der Messgeräte großes Augenmerk auf die präzise Ausführung dieser Föhrungen gelegt, da sich Abweichungen der Geradföhrung direkt dem Messsignal überlagern und zu Fehlern in der Messung föhren.

Mit der Einführung der Computertechnik in die Messsysteme wurde dieses Thema etwas gelassener behandelt, da nun die Abweichungen der Geradföhrung ermittelt, als systematischer Fehler erkannt und über einen Korrekturdatensatz aus dem Messsignal herausgerechnet werden konnten. Diese heute noch gängige Praxis funktioniert recht gut, solange die Werte reproduzierbar auftreten. Bei den üblichen Tastschnittgeräten mit konstanter gravitativer Ausrichtung ist das alles kein Problem.

Die Entwicklung automatisierter Messsysteme, die u.a. auch mit Messrobotern zum Einsatz kommen, änderte die Voraussetzungen. Der Prüfling kommt jetzt nicht mehr zu Messgerät, sondern das Messgerät (oder besser der Messkopf) wird am Prüfling frei im Raum in 6 Freiheitsgraden positioniert. (Abb.2)

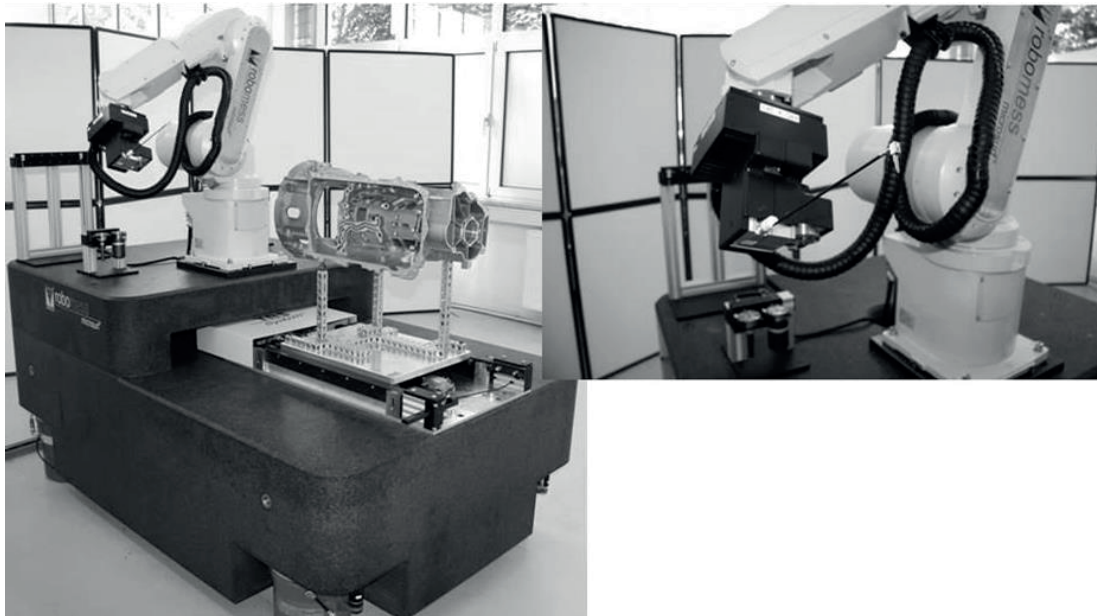


Abb. 2: Messroboter robomess für Rauheits- und Konturmessung

Das Messsystem wird damit gravitativ stets anders orientiert, so dass die Geradföhrung unterschiedlich belastet wird. Im Ergebnis treten Abweichungen in der Geradföhrung auf, die in den unterschiedlichen Raumlagen nicht mehr reproduzierbar sind.

Des Weiteren kommt erschwerend hinzu, dass auf Grund besonderer Zugänglichkeitsanforderungen öfters auch besonders lange Taster zum Einsatz kommen, die dann eine große Kraft bzw. ein großes Drehmoment auf die Geradföhrung ausüben und das Problem noch verstärken. Zum Teil föhrt auch bei langen Tastern die Durchbiegung oder ein mechanisches Schwingen zu weiteren Messfehlern.

Die stetig steigenden Qualitätsanforderungen in Form immer kleiner werdender Toleranzen erfordern aber auch gerade in der automatisierten fertigungsintegrierten Oberflächenmessung immer geringere Messunsicherheiten. Das Tastschnittmessverfahren mit Bezugsebenen-messsystem stößt damit an seine Grenzen.

1.3 Beschränkung der Messbereiche durch die Wandlersysteme

Ein seit Jahrzehnten in der Messtechnik bestehender Fakt ist, dass mit größer werdenden Messbereichen die Auflösung sich verringert. Dies liegt an den physikalischen Gegebenheiten der zu Einsatz kommenden Wandlersysteme, die die geometrische Weginformation in elektrisch und digital auswertbare Signale umsetzt.

Von den führenden Messgeräteherstellern werden schon seit einigen Jahren Tastschnittmessgeräte angeboten, mit denen sowohl Rauheit als auch Kontur „gleichzeitig“ gemessen werden können. Auf Grund der verschiedenen Messbereiche, die bei Rauheits- und Konturmessung notwendig werden, sind dies nur Hybridsysteme mit zwei unterschiedlichen Mess- und Vorschubeinrichtungen, die eine echte gleichzeitige Messung nicht zulassen. Der Vollständigkeit sei an dieser Stelle bemerkt, dass es in der Vergangenheit vereinzelt Messsysteme gab, die eine gleichzeitige Messung zuließen, aber auf Grund anderer Instabilitäten nach einigen Jahren wieder vom Markt genommen wurden.

2. NUTZUNG EINES LASERINTERFEROMETERS IN DOPPELTER FUNKTION

2.1 Prinzip eines Laserinterferometers zur Wegmessung

Die im Punkt 1 aufgeführten Unzulänglichkeiten der mechanischen Geradföhrung als Referenz für ein Bezugsebenen-Tastschnittsystem können mit einem Laserinterferometer und dem Laser als nichtmechanische Referenz beseitigt werden. Die Funktion eines Laserinterferometers soll deshalb an dieser Stelle kurz in Erinnerung gebracht werden.

Zum Einsatz kommt ein Michelson-Interferometer als Klassiker der Laserinterferometer. Der Laserstrahl einer Laserquelle wird dabei durch einen Strahlteiler geschickt, wobei sich der Laserstrahl in einen 90° abgelenkten Referenzstrahl und einen weiter geradeaus laufenden Messstrahl aufteilt. Der Referenzstrahl trifft in einem fixen Abstand auf einen Reflektor und wird direkt 180° wieder zurückgeworfen, durch den Strahlteiler auf einen Empfänger. Der Messstrahl wird ebenfalls 180° reflektiert an einem Reflektorspiegel, der sich aber entsprechend des Wegsignales in Laserachsrichtung verschiebt. Mess- und Referenzstrahl überlagern sich nach dem Passieren des Strahlteilers. Durch die monochromatischen und kohärenten Eigenschaften der Laserstrahlen kommt es bei der Überlagerung zu konstruktiver und destruktiver Interferenz, die sich am Empfänger durch Streifen mit Abstand $\lambda/2$ bemerkbar machen. Bei Wegänderungen am Messstrahlreflektor wandern diese Interferenzstreifen und es kann somit am Empfänger das Wegsignal ermittelt werden. Auf Grund der großen Kohärenzlänge sind Wegmessungen über große Messbereiche mit konstant kleiner Auflösung möglich (Abb.3).

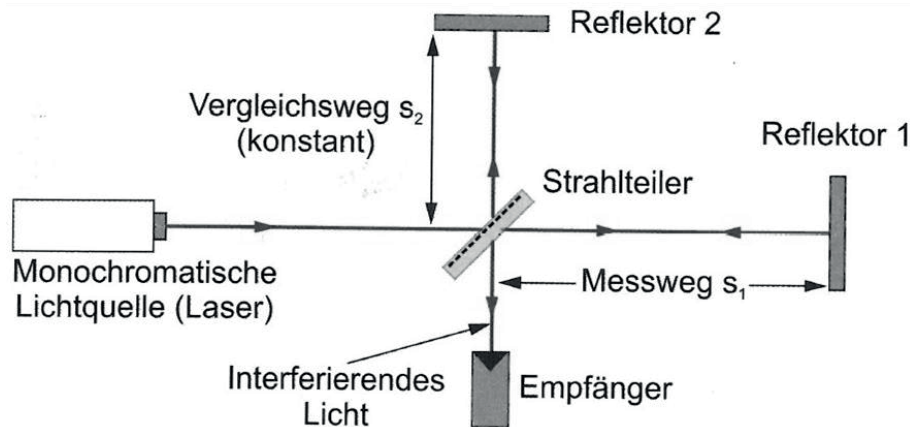


Abb. 3: Prinzip Michelson-Interferometer [Kefenstein, 2014]

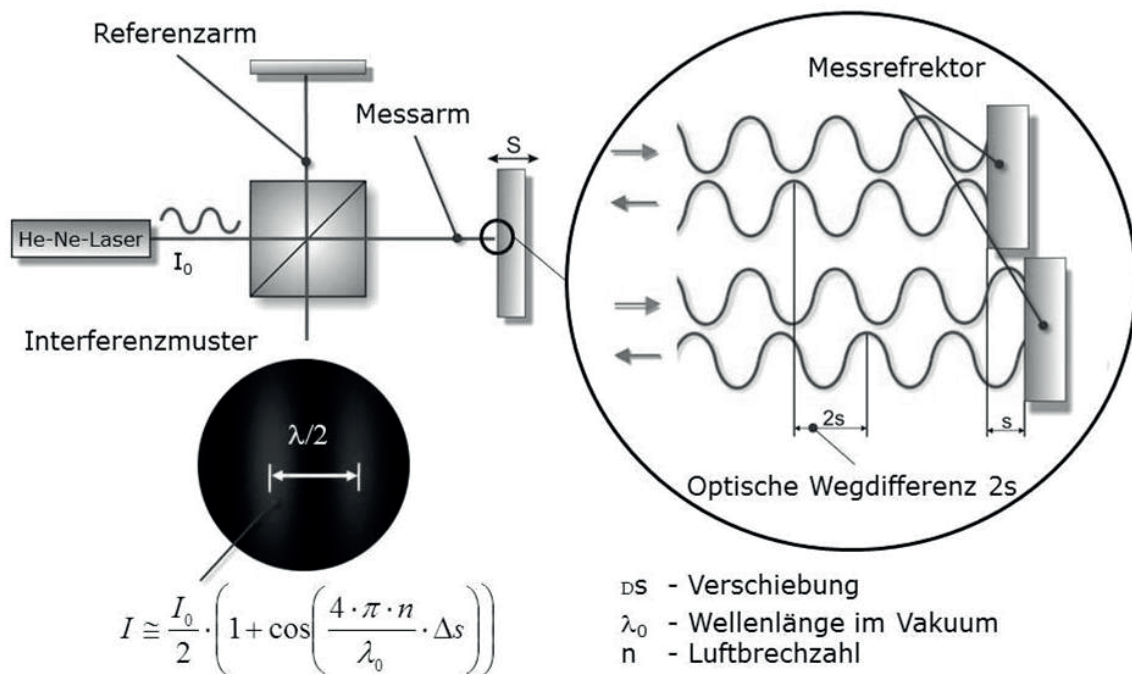


Abb. 4: Entstehung von Interferenzen im Laserinterferometer [Dontsov, 2016].

2.2 Der Laser als Referenzgerade

Um die Unzulänglichkeiten der Geradföhrung bei Freitastsystemen zu umgehen, ist es möglich die optische Achse eines Lasers als Referenz für die Oberflächenmessung zu verwenden. Hierzu wird der Laser eines unter Punkt 2.1 beschriebenen Laserinterferometers genutzt. Das Interferometer dient gleichzeitig als Wegmesssystem zur Aufnahme und Wandlung des Oberflächenmesssignals. Damit der Laserstrahl als Referenz unbeeinflusst von der Geradföhrung bleibt, wird die Laserquelle nicht mit auf der Föhrung des Vorschubsystems bewegt. Stattdessen bilden Laserquelle und zu messende Oberfläche ein eigenes Inertialsystem. Der Laser wird durch ein Rohr geleitet, das als Tastarm dient und am Kopf Tastnadel mit Messreflektor sowie Umlenkspiegel und Referenzreflektor trägt (Abb. 5).

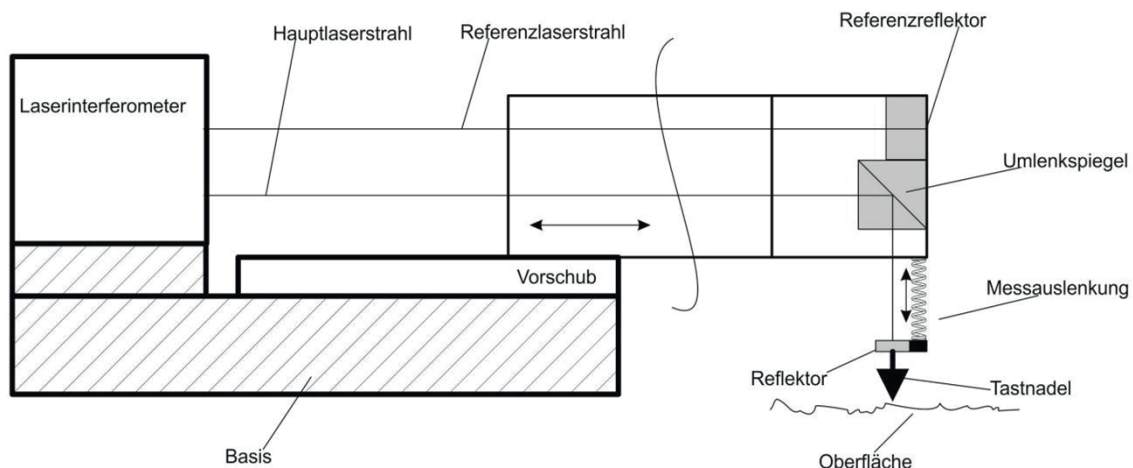


Abb. 5: Laserinterferometrischer Taster LIT, Variante 1.

Da Mess- und Referenzreflektor mit dem Tastarm gleichzeitig bewegt werden, ist die Weglängenänderung beider Laserstrahlen konstant und es wird kein Wegmesssignal erzeugt, solange der Messtaster keine Bewegung ausführt. Erst durch die Bewegung der Tastnadel, in Abhängigkeit der Oberflächenstruktur, ändert sich die Weglänge verschieden vom Referenzstrahl, so dass ein Oberflächenmesssignal erfasst werden kann.

Durch die Geradführungsabweichungen kommt es zu Verkippungen des Tastarmrohres wodurch sich der Abstand des Messkopfes zur zu messenden Oberfläche ändert. Die Tastnadel bewegt sich zwar relativ zum Kopf des Tastarmrohres, aber da die Tastnadel die Messoberfläche konstant berührt, wird keine Weglängenänderungsdifferenz zwischen Mess- und Referenzstrahl erzeugt. Um diesen Effekt sicherzustellen werden besondere Anforderungen an die optischen Systeme gestellt. So muss der Umlenkspiegel als Pentagonprisma ausgebildet sein (Abb.6), das bei Verschiebung und Verkippung keine Änderung der Laserlaufstrecke erzeugt. Sowohl der Reflektor des Messstrahls als auch der des Referenzstrahles müssen einen Reflektorspiegel in Form eines Tripelspiegels oder einer Spiegelkugel darstellen, um ebenfalls Verschiebungen und Verkippungen ihres mechanischen Trägersystems kompensieren zu können.

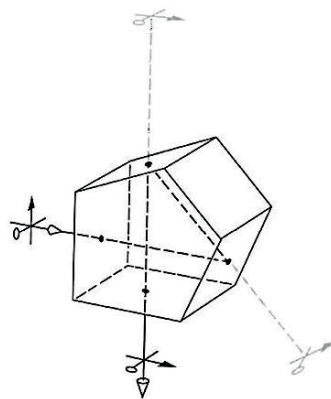


Abb. 6: Pentagonprisma

Die Reflexion des Referenzstrahles am Referenzreflektor muss dabei immer rechtwinklig zur Messrichtung, in Bewegungsrichtung des Vorschubes erfolgen. Somit wirken sich Abweichungen des Vorschubsystems und damit Lageveränderungen des Tastarmes nicht auf das Messsignal aus. Diese Anordnung wird als Laserinterferometrischer Taster (LIT) bezeichnet.

2.3 Echte gleichzeitige Rauheits- und Konturmessung

Eine zusätzliche nützliche Eigenschaft des unter Punkt 2.2 beschriebenen Systems ist, dass auf Grund des laserinterferometrischen Prinzips und der damit verbundenen großen Kohärenzlänge sehr große Messbereiche bei gleichbleibender kleiner Auflösung erreicht werden. Somit qualifiziert sich dieses System für eine echte „gleichzeitige“ Messung von Rauheit und Kontur.

3. EINSATZGEBIETE UND VORTEILE DES LIT

Der Einsatz des unter Punkt 2 beschriebenen Systems im fertigungsnahen oder integrativen Bereich bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber von konventionellen Messsystemen. Insbesondere die Vermeidung der unter Punkt 1.2 aufgeführten Unzulänglichkeiten bei der Nutzung an Messrobotern und die Verwendung sehr langer Tastarme führen bei der Nutzung des LIT zur erheblichen Verringerung von Messunsicherheiten. Dies trifft auch auf die konventionelle Nutzung im Messraum oder Labor zu.

Durch die Verwendung von Faserlasertechnologie kann der Messkopf an Messrobotern entsprechen klein gehalten werden, was weitere Vorteile bezüglich Zugänglichkeit zu den Messstellen mit sich bringt.

Durch Geradführungsabweichungen (Nicken) der Vorschubeinrichtung kommt es im Beispielfall zu Verkipnungen von ca. 30 Winkelsekunden und damit bei Tastarmlängen von beispielsweise 500 mm zu Messabweichungen von 75µm. Das ist der Todesstoß für jede Rauheitsmessung. Durch den Einsatz des LIT wirken sich diese Abweichungen nicht auf das Messergebnis aus.

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen verschiedene Ausführungen des LIT, die unterschiedliche, spezielle Anwendungen in der Oberflächenmesstechnik zulassen.

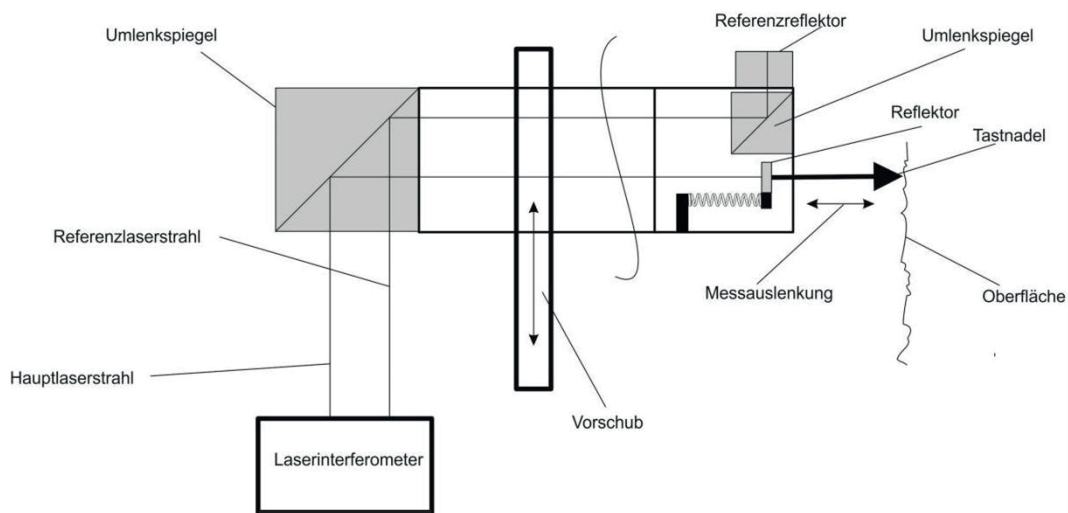


Abb. 7: Laserinterferometrischer Taster LIT, Variante 2.

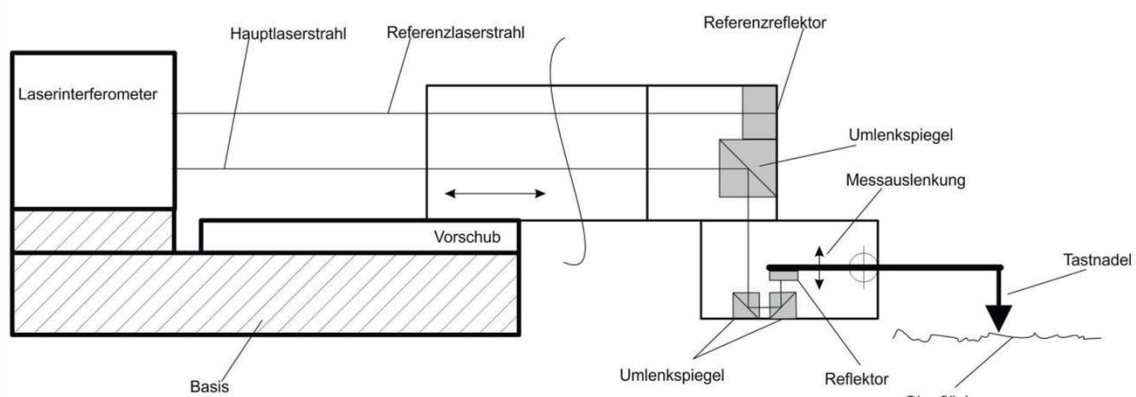


Abb. 8: Laserinterferometrischer Taster LIT, Variante 3

Auch der Einsatz von punktuell scannenden berührungslosen optischen Sensoren ist mit dem LIT möglich. Hierbei dient der LIT zur Bestimmung der Messabweichung durch Verkippung, die dann mit dem Sensorsignal zwecks Korrektur verrechnet wird (Abb.9).

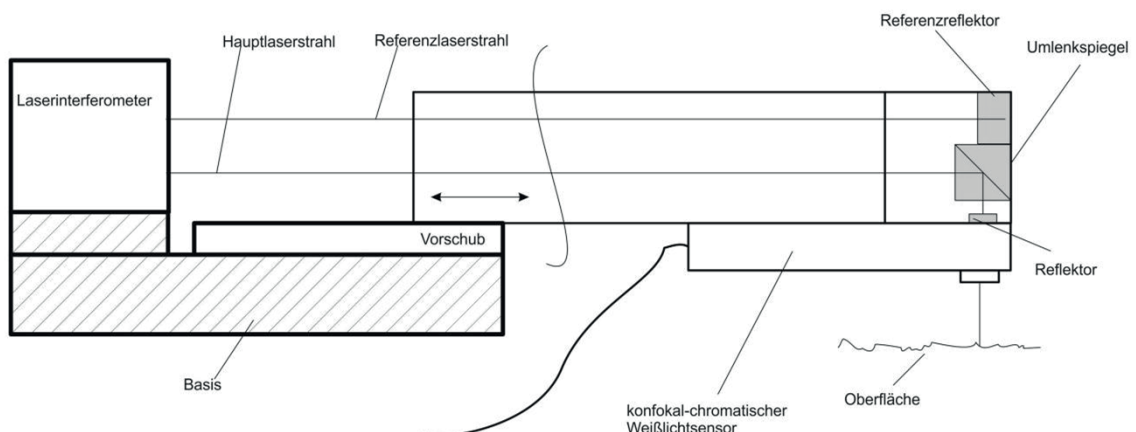


Abb. 9: Laserinterferometrischer Taster LIT, Variante mit optischem Sensor

4. QUELLEN

- [Keferstein, 2014] Keferstein, C. P.: Fertigungsmesstechnik, Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [Dontsov, 2016] Dontsov, D.: Kalibrierung der Linearachsen. Präsentation SIOS, Ilmenau 2016.

SCHNELLER IN DER OBERFLÄCHENMESSTECHNIK: APERTURKORRELATION UND KOORDINATENMESSGERÄTEINTEGRATION

Dietrich Imkamp¹, Viktor Drescher²

¹ Unternehmensbereich Industrial Metrology / Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, ZEISS Group/Gruppe, 73446 Oberkochen, Germany, email: dietrich.imkamp@zeiss.com

² Unternehmensbereich Microscopy / Carl Zeiss Microscopy GmbH, ZEISS Group/Gruppe, Carl-Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena, Germany, email: viktor.drescher@zeiss.com

Abstract: Ein wesentlicher Trend in der Fertigungsmesstechnik wird durch das Attribut "schneller" beschrieben. [Imkamp, 2016]. Das kann einerseits bei den messtechnischen Verfahren selbst durch die Verringerung der Messzeit und andererseits durch die Integration von messtechnischen Verfahren, mit dem Ziel messtechnische Informationen schneller bereit zu stellen, erreicht werden. In diesem Beitrag wird anhand der Aperturkorrelation dargestellt wie konfokale Oberflächenmessungen schneller ausgeführt werden können. Die Integration eines Tastschnittsensors in ein Koordinatenmessgerät als automatisch einwechselbarer Sensor ermöglicht Maß-, Form-, Lage- und Oberflächenmessungen in einem automatischen Ablauf. Da der zeitraubende Wechsel vom Koordinatenmessgerät zum Oberflächenmessgerät entfällt, können damit Messergebnisse schneller bereitgestellt werden.

KEYWORDS: TASTSCHNITTGERÄTE, KOORDINATENMESSGERÄTE, KONFOKALE MIKROSKOPIE

1. EINFÜHRUNG

Schnelligkeit spielt für die Produktion eine wichtige Rolle. Das gilt besonders für die Messtechnik, die in der Produktion vorwiegend Informationen zur Konformitätsprüfung und Prozessregelung liefert [Pfeifer, 2010]. Diese Informationen sollten schnell bereitgestellt werden, um den Produktionsfortschritt nicht zu verzögern. Das schnelle Bereitstellen von Information ist einerseits durch schnellere messtechnische Verfahren zu realisieren, was hier anhand der Aperturkorrelation für die Oberflächenmessung mit korrelativen Mikroskopen dargestellt wird.

Andererseits kann die Integration von Messtechnik dazu beitragen, Messergebnisse schneller bereitzustellen. Ein typisches Beispiel für Integration von Messtechnik ist das Multisensorkoordinatenmessgerät [Imkamp, 2015]. Durch den Einsatz verschiedener Sensortechniken auf einem Messgerät können viele Messaufgaben auf einem einzigen Gerät durchgeführt werden, so dass der zeitaufwendige Transport von Gerät zu Gerät und die damit auch häufig verbundenen Rüst- und Wartezeiten entfallen. Anhand der Integration eines Rauheitssensors in Koordinatenmessgeräte werden diese Vorteile präsentiert.

2. OPTISCHE OBERFLÄCHENMESSUNG MITTELS APERTURKORRELATION

Optische Oberflächenmesstechnik gewinnt in der Industrie an Bedeutung. Insbesondere empfindliche Oberflächen, die durch eine Tastspitze beschädigt oder deformiert werden, sowie solche mit aufgrund ihrer Größe oder geometrischen Form eingeschränkter Zugänglichkeit, sollten berührungslos gemessen werden.

Von den unterschiedlichen heute etablierten optischen Verfahren bietet vor allem die konfokale Mikroskopie ein Optimum bezüglich ihrer Auflösung in lateraler und vertikaler Richtung und ist damit in Bezug auf die Messaufgaben sehr flexibel. Bei der konfokalen Mikroskopie wird mittels einer vor dem Detektor angebrachten Blende das reflektierte Licht von den Oberflächenbereichen, die sich nicht im Fokus befinden, geblockt. Das Ergebnis ist eine sehr genaue Detektion der Bereiche, die sich im Fokus befinden. Durch eine Variation des Abstandes zwischen Messobjekt und Objektiv kann so sukzessive ein dreidimensionales Modell der Oberfläche generiert werden, dass zur weiteren Auswertung (z. B. Rauheitsmessung) verwendet werden kann.

Aperturkorrelation

Heute beherrschen zwei unterschiedliche Technologien den Markt der Konfokalmikroskopie.

Auf der einen Seite sind dies die Laser-Scanning-Mikroskope (z. B. ZEISS LSM 800). Bei diesen Mikroskopen wird das Objektfeld (betrachteter Bereich auf der Messobjektoberfläche) mit einem fokussierten Laserstrahl pixelweise abgetastet und das reflektierte Lichtsignal auf einem Punktdetektor detektiert. Der Vorteil dieser Technologie liegt in der hohen Bildqualität, weil nur Licht aus dem angestrahlten Probenbereich den Detektor erreichen kann und durch den Laserstrahl eine hohe Lichtleistung zur Verfügung steht. Die Nachteile sind vor allem die lange Aufnahmezeit (je nach Einstellungen < 1 fps), sowie die Anschaffungs- und Unterhaltskosten für die verwendeten Laser.

Neben solchen Punktscannern kommen auch Systeme zur Anwendung, bei denen über eine rotierende Scheibe oder ein LCD-Display mehrere Punkte der Messobjektoberfläche gleichzeitig beleuchtet werden. Gleichzeitig dient die Scheibe als Multilochblende vor einer Kamera, die bei solchen Systemen zur flächenhaften Detektion dient. Systeme dieser Bauart sind deutlich schneller, haben aber den Nachteil, dass Information irrtümlich den Detektor erreichen kann, indem sie nicht durch die eigentlich vorgesehene Blende die Kamera erreicht, sondern durch eine benachbarte Blende geht. Dieser unvermeidliche „Crosstalk“ führt zu unerwünschten Artefakten in den gemessenen Daten.

Mit dem ZEISS Smartproof 5 wurde nun erstmalig die Technologie der Aperturkorrelation in ein kommerzielles Konfokalmikroskop überführt. Diese Technologie basiert auf der Annahme, dass sich aus einem Datensatz, der neben der benötigten konfokalen Information auch „Crosstalk Information“ beinhaltet, die gewünschten Daten extrahieren lassen, solange die unerwünschte Out-of-Focus-Information nur hinreichend gut bekannt ist [Wilson, 1996]. Durch eine nachgeschaltete Verrechnung ist es in diesem Fall möglich, die hohe Geschwindigkeit eines flächenhaften Scanners mit der Bildqualität eines Punktscanners zu kombinieren.

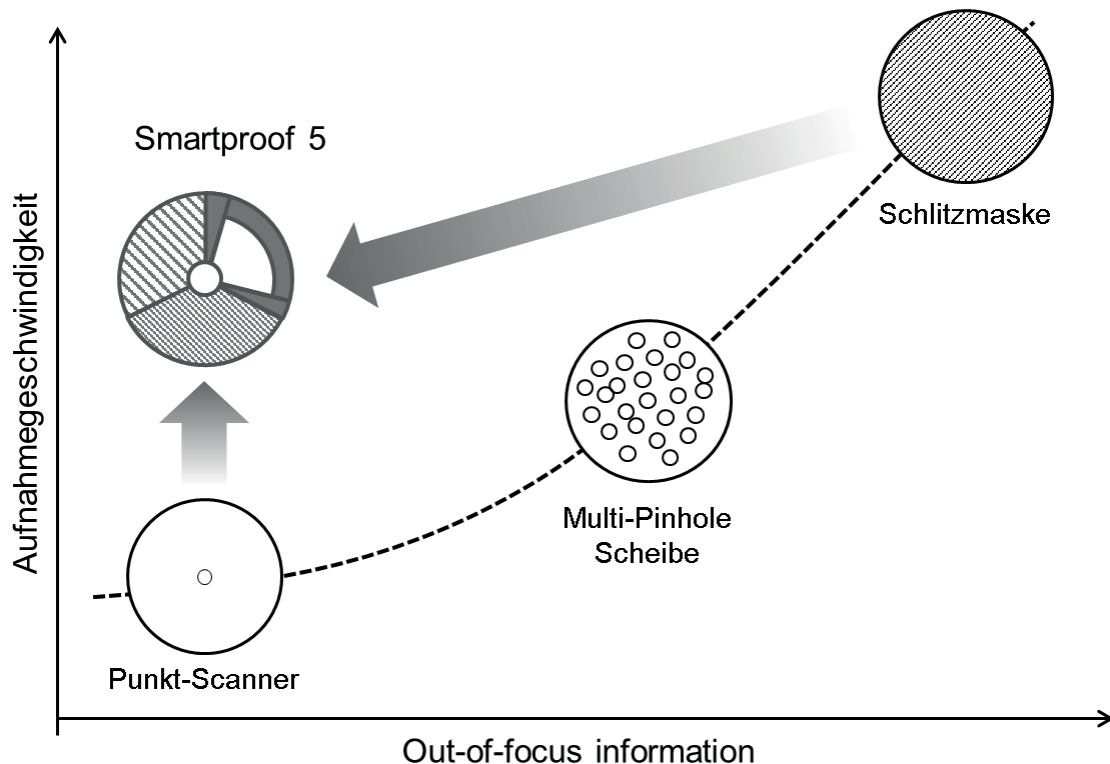


Abb. 1: Vorteile der Aperturkorrelation beim Smartproof 5

Auf diese Weise ist es möglich, beim ZEISS Smartproof 5 eine Aufnahmerate von 50 Bildern pro Sekunde zu realisieren. Das Maskendesign erlaubt gleichzeitig den Einsatz einer wartungsfreien LED anstelle eines Lasers und als Detektor eine 4 Mega-Pixel Kamera, die auch bei niedrig vergrößernden Objektiven eine ausreichende Lateralauflösung gewährleistet.

3. TASTSCHNITTSSENSOR FÜR KOORDINATENMESSGERÄTE

Die Prüfung von Rauheitskenngrößen technischer Oberflächen in der industriellen Produktion wird bei Metallteilen vorwiegend mit taktilen Tastschnittgeräten [4287, 2010] durchgeführt. Bei diesen Geräten handelt es sich um tragbare Geräte mit Sensor und Vorschub oder ortsfeste Geräte, bei denen der Sensor verschiebbar an einer Säule angebracht ist. Die Möglichkeiten zur Automatisierbarkeit solcher Geräte sind begrenzt.

Gleichzeitig werden in der industriellen Produktion Koordinatenmessgeräte mit einem hohen Automatisierungsgrad eingesetzt, um Maß-, Form- und Lagetoleranzen häufig an den gleichen Teilen, an denen auch Rauheitskenngrößen ermittelt werden, zu bestimmen. Durch eine Integration der Rauheitssensorik der Tastschnittgeräte in die Koordinatenmessgeräte wird eine höhere Automatisierung der Oberflächenmessung erzielt und die Aufwände für den Transport von Teilen von einem Gerät zum anderen sowie das zusätzliche Rüsten auf einem Gerät werden vermieden.

3.1 Integration: Sensor und Software

Die Implementierung des Rauheitssensors für Koordinatenmessgeräte ZEISS „ROTOS“ zeigt die Abbildung 1. Der Sensor ist ein miniaturisiertes Tastschnittgerät mit eigenem Vorschub. Der Tastarm bewegt sich in einem Schutzgehäuse, das gleichzeitig dazu dient den Sensor während der Rauheitsmessung durch eine Antastung über einen Stützpunkt zu „fixieren“. Durch diese Fixierung ist die Realisierung als kufenloses Freitastsystem möglich. Der Sensor ist durch zwei Drehachsen im Raum (Abbildung 2) orientierbar und wird über die CNC-Wechselschnittstelle in das Koordinatenmessgerät eingewechselt. Damit kann er im gesamten Messvolumen des tragenden Messgerätes positioniert werden.

Die Ansteuerung des Sensors einschließlich der rauheitsspezifischen Auswertung ist vollständig in die Messgerätesoftware integriert (Abbildung 3). Dazu wurde die Software um Funktionen zur Aufnahme von Oberflächenprofilen und deren Auswertung ergänzt. Damit können Messprotokolle ausgegeben werden, die sowohl Maß-, Form- und Lagermerkmale als auch Oberflächenmerkmale beinhalten

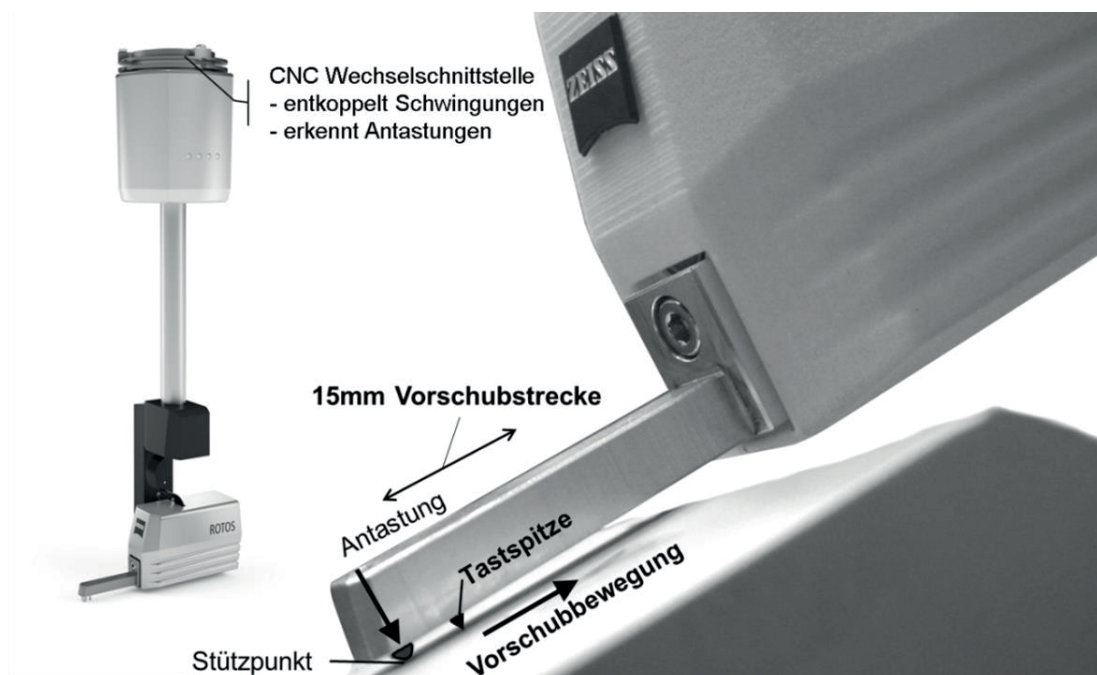


Abb. 2: Rauheitssensor ZEISS ROTOS



Abb. 3: Rauheitssensor ZEISS ROTOS und seine Drehachsen

Messelement: Messung des Oberflächenprofils

Kommentar: Strategie: Oberflächenmessung1

Sicherheitsgruppe: Solwertdefinition: Koord.-System: [Basissystem]

Toleranz für: Solwert: Istwert:

X: 0,0000
Y: 0,0000
Z: 0,0000
NX: 0,0000
NY: 0,0000
NZ: 1,0000

Ausweich-Strategie: Strategie löschen

Sicherheitsdaten: Rauheitsgerade

Voreinstellungen: Berechnung: Verwendung

Geschwindigkeit: 0,05 < 0,5000 < 0,50

Winkel: A: 0,0 B: 0,0

Winkelstellungen übernehmen von: Referenz-Element: CAD-Anstapunkt

Startpunkt: X: 0,0000 Y: 0,0000 Z: 0,0000
NX: 0,00 NY: 0,00 NZ: 1,00

Grundeinstellungen: Messung: Taststrecke: 4,0000 ISO4288

Merkmal: Rauheit

Filter: GAUSS Wellenlänge Lc: 0,8000

Rauheitsparameter auswählen
Infos zu Rauheitsmessung
Filtereinstellung Lambda S

Prüfelement: Oberflächenmessung1

Merkmal	Istwert	obere T.	unt. Tol.	Norm
Ra	0,0000	0,0040	0,0020	ISO4287 AS
Wc	0,0000	0,0040	0,0000	JISB0601 IS
WSm	0,0000	0,0050	0,0000	JISB0611 IS

Default setzen

Messparameter: Geschwindigkeit: 0,50
Taststrecke: 4,0000
Einzelmessstrecke: 0,0000
Vor- und Nachlauf: [X]
Messstrecke: 4,0000
Anzahl Einzelmessstrecken: 5

ZEISS CALYPSO

Bauteilname: FoxControl_01 Auftragsnummer: ACCURA_2
Zeichnungsnummer: Ableitung: Profilmittel

Messprotokoll

Merkmal	Messwert
1 Rauheit_Ebene Brennvraum	-1,0000
2 Rauheit_Ebene Brennvraum/Materialseitl Rauheit	995,9000
3 Rsw_2_Rauheit_Ebene Brennvraum	995,9000
4 Rsw_3_Rauheit_Ebene Brennvraum	995,9000
5 Rsw_Rauheit_Ebene Brennvraum	36,5743
6 Rauheit_Ebene Brennvraum/Materialseitl Welligkeit	83,3021
7 Wsw1_Rauheit_Ebene Brennvraum	83,3021
8 Rauheit_Ebene Brennvraum/Primär	4,7288
9 Pt_Rauheit_Ebene Brennvraum	4,7288
10 Rauheit_Ebene Brennvraum/Platheit	0,3548
11 Rq_Rauheit_Ebene Brennvraum	0,3548
12 Rauheit_Zylinder1	-1,0000
13 Rauheit_Zylinder1/Materialseitl Rauheit	40,5194
14 Rsw_Zylinder1	40,5194
15 Rauheit_Zylinder1/Materialseitl Welligkeit	0,0000
16 Wsw1_Rauheit_Zylinder1	0,0000
17 Rauheit_Zylinder1/Primär	9,0206
18 Pt_Rauheit_Zylinder1	9,0206
19 Rauheit_Zylinder1/Platheit	0,26076
20 Rq_Rauheit_Zylinder1	0,26076
21 Rauheit_XWR_Lager 1	-1,0000
22 Rauheit_XWR_Lager 1/Materialseitl Rauheit	22,48570
23 Rsw_XWR_Lager 1	22,48570
24 Rauheit_XWR_Lager 1/Materialseitl Welligkeit	6,91164
25 Wsw1_Rauheit_XWR_Lager 1	6,91164
26 Rauheit_XWR_Lager 1/Primär	4,9558
27 Pt_Rauheit_XWR_Lager 1	4,9558
28 Rauheit_XWR_Lager 1/Platheit	0,54147
29 Rq_Rauheit_XWR_Lager 1	0,54147
30 Rauheit_Ebene 90Grad	-1,0000

Abb. 4: Funktionalitäten in der Messsoftware CALYPSO für den Rauheitssensor ZEISS ROTOS

3.2 Leistung: Schnelligkeit, Zugänglichkeit und Genauigkeit

Der große Vorteil der in den Messablauf auf einem Koordinatenmessgerät integrierten Rauheitsmessung liegt in dem Schnelligkeitsgewinn durch den Wegfall von Transport- und Rüstzeiten bei der Verwendung eines separaten Oberflächenmessgerätes und der Automatisierung der Oberflächenmessung ohne wesentlichen Zusatzaufwand. Gerade bei Bauteilen mit Oberflächenmerkmalen an Flächen in verschiedenen Positionen mit unterschiedlichen Orientierungen wird dieser Vorteil deutlich. Die Messung auf einem herkömmlichen Tastschnittgerät erfordert hohen Aufwand zur Positionierung des Bauteils, um alle Messstellen zu erreichen, weil das Tastschnittgerät im Unterschied zum Koordinatenmessgerät nur in einer Ebene messen kann.

Zu Bewertung der Leistung dieser neuen Lösung gehört auch ihre Genauigkeit, die durch die Messunsicherheit quantifiziert wird. Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Rauheitskenngrößen und dem großen Anteil der Oberflächeneigenschaften an der Unsicherheit ist eine allgemeine Aussage dazu nicht möglich [Koenders, 2016]. Als Orientierung kann aber eine erzielbare Abweichung von weniger als fünf Prozent (Genauigkeitsklasse 1 nach [4772, 1979]) an Normalen mit kalibriertem Ra bis herunter zu 0,5 Mikrometern dienen.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Kürzere Mess- und Rüstzeiten im Bereich der Qualitätssicherung sind der Schlüssel zu einer besseren Produktqualität, da sich bei gleichem Personaleinsatz ein höherer Teiledurchsatz und damit eine höhere Signifikanz der Aussagen erreichen lassen.

Um dieses Ziel zu erreichen wurden zwei unterschiedliche Technologien dargestellt: Durch Aperturkorrelation kann die herausragende Datenqualität von punktschennenden Konfokal-Mikroskopen auf flächenhaft scannende Systeme übertragen werden, wodurch deren Aufnahmegeschwindigkeit um ein Vielfaches gesteigert wird. Der Tastschnittsensor für Koordinatenmessgeräte ermöglicht neben der Messung von Maß-, Form- und Lagemerkmale auch die Erfassung von Oberflächenmerkmalen auf diesen Geräten. Dadurch werden Transport-, Warte- und Rüstzeiten durch die Vermeidung der Oberflächenmessung auf einem separaten Gerät eingespart. Weiterhin ermöglicht die Messung auf dem Koordinatenmessgerät einen automatisierten Betrieb ohne Personal zu binden.

5. QUELLEN

- [Imkamp, 2015] Imkamp, D.: Multisensorsysteme zur dimensionellen Qualitätsprüfung, PHOTONIK Fachzeitschrift für optische Technologien. AT-Fachverlag GmbH Fellbach, Ausgabe 06/2015, www.photonik.de/multisensorsysteme-zur-dimensionellen-qualitaetspruefung/150/21002/317557
- [Imkamp, 2016] Imkamp, D.; Berthold, J.; Heizmann, M.; Kniel, K.; Peterek, M.; Schmitt, R.; Seidler, J.; Sommer, K.-D.: Herausforderungen und Trends in der Fertigungsmesstechnik – Industrie 4.0. tm – Technisches Messen, Volume 83, No. 7-8, S. 417–429, 2016. (DOI: 10.1515/teme-2015-0081).
- [Koenders, 2016] Könders, L.; Felgner, A.; Krüger-Sehm, R.: Normung: Taktile und optische Oberflächen-messtechnik – Spezifikationen und Kalibrierung. 5. VDI-Fachtagung Optische Messung von Funktionsflächen 2016, VDI-Fachtagung Form- und Konturmesstechnik 2016, Nürtingen bei Stuttgart, 28. und 29. Juni 2016 / VDI VDE Mess- und Automatisierungstechnik (VDI-Berichte 2285), VDI Verlag Düsseldorf, 2016.
- [Pfeifer, 2010] Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Fertigungsmesstechnik. Oldenbourg Verlag, München, 2010.
- [Wilson, 1996] Wilson, T.; Juskaitis, R.; Neil, M. A.; Kozubek, M.: Confocal microscopy by aperture correlation. Opt. Lett. 1996, 21, S. 1879-1881.
- [4287, 2010] DIN EN ISO 4287:2010: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth-Verlag, Berlin, 2010.
- [4772, 1979] DIN 4772: Elektrische Tastschnittgeräte zur Messung der Oberflächenrauheit nach dem Tastschnittverfahren. November 1979, zurückgezogen.

3D-OBERFLÄCHENSSENSOR FÜR DEN INDUSTRIELLEN EINSATZ MIT SENSORNAHER VERARBEITUNGSKETTE AUF FPGA-BASIS

Hans-Christian Schwannecke¹, Kay Wenzel², Torsten Machleidt³

¹ Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung mbH,

Hans-Christian.Schwannecke@gbs-ilmenau.de

² Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung mbH, Kay.Wenzel@gbs-ilmenau.de

³ Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung mbH, Torsten.Machleidt@gbs-ilmenau.de

Abstract: Die Weißlichtinterferometrie zählt auf dem Gebiet der optischen 3D-Oberflächenmesstechnik aufgrund der hohen erreichbaren Präzision bei hoher Messgeschwindigkeit und großem lateralem Messfeld zu den bevorzugten berührungslosen Messverfahren im Mikro- und Nanometerbereich. Die GBS mbH beschäftigt sich intensiv mit der Weißlichtinterferometrie und entwickelte eine Produktreihe für optische Messgeräte, die unter dem Namen smartWLI vertrieben wird [Machleidt, 2010]. Diese Produktreihe wird durch die hier Vorgestellten Ergebnisse um einen eingebetteten Sensor erweitert. Dieser neuartige Sensor ist auf einen produktionsnahen Einsatz zugeschnitten und bietet eine schnelle kompakte Lösung für eine 100% Kontrolle von Funktionsoberflächen.

KEYWORDS: EMBEDDED, FPGA, WEIßLICHTINTERFEROMETRIE, INLINE

1. EINLEITUNG

Flächenhafte Aufnahmen werden in höchsten 3D-Auflösungen und für unterschiedliche Objekteigenschaften (Neigung, Rauheit, Strukturen) möglich. Mit der daraus resultierenden, besonderen Bedeutung für die Mikro- und Nanotechniken, die Optoelektronik, Photonik, Optik, die Werkstoffwissenschaften, die Chemie, die molekulare Biologie, die Bio- und Molekularelektronik sowie die Halbleiterphysik und Mikroelektronik ergeben sich viele Anwendungsfelder in Laboren und in der Produktion. Auch wenn bei weitem nicht jeder Messanspruch so hoch gesteckt ist wie er sich aus den Möglichkeiten des zu entwickelnden Systems ergibt, gibt es doch einen hohen Bedarf. Es ist aus der Betrachtung der technischen Entwicklung der letzten Jahre sofort abzulesen, dass dieser Bedarf auch produktionsnah steigen wird.

Im Beitrag wird ein neuartiger, kompakter, autonom und flexibel einsatzfähiger 3D-Sensorkopf auf Basis der Weißlichtinterferometrie zur Vermessung von Oberflächen im Mikro-/ Nanometerbereich vorgestellt. Hauptaugenmerk des 3D-Oberflächensensors ist seine Industrietauglichkeit (Abbildung 1).

Eine absolute Neuheit stellt dabei der Systemverbund dar. So wurde erstmals ein vollständiges Weißlichtinterferometer mit kompletter Peripherie,

Verrechnungs- und Steuereinheiten in einem Gehäuse untergebracht. Dieses eingebettete System verdankt seine endgültige, integrierte und kompakte Bauform Modulen aus komplex verknüpften interdisziplinären Fachgebieten. Dies sind unter anderem die auf FPGA-Technologie basierende Messdatenverrechnungseinheit, der modifizierte optische Aufbau sowie die über eine SoC-Plattform realisierte Hauptsteuerung, die gleichzeitig die intelligente Lichtregelung und die Kontrolle des Aktors übernimmt.

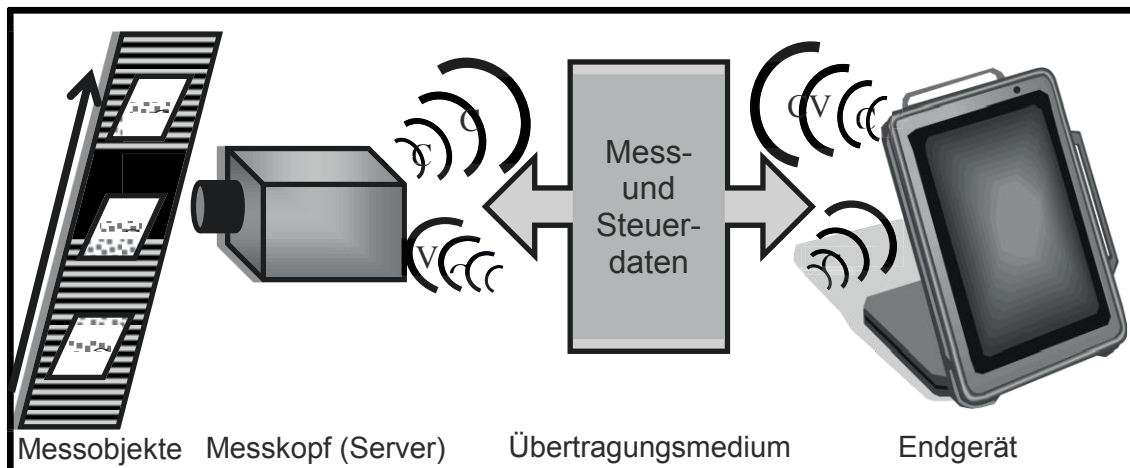


Abb. 1: Messkonzept des 3D-Oberflächensensors

Als besonderes Herausstellungsmerkmal des 3D-Sensors ist die Umsetzung der hochangepassten WLI-Algorithmen auf einem FPGA. Somit wird die Verarbeitung der Kamerabilder direkt in der Kamera auf dem angekoppelten FPGA durchgeführt.

2. PRINZIP DER 3D OBERFLÄCHENMESSUNG MITTELS WEIßLICHTINTERFEROMETRIE

Die Weißlichtinterferometrie ist eine Anwendung des interferometrischen Prinzips zur Entfernungsmessung. Ähnlich der Laserinterferometrie wird zur exakten Bestimmung einer Entfernungsänderung das ausgehende Licht mit dem reflektierten Licht überlagert. Aus dem entstehenden Korrelogramm kann die Position zum Messobjekt bestimmt werden. Im Gegensatz zur Laserinterferometrie nutzt die Weißlichtinterferometrie jedoch eine breitbandige Lichtquelle. Dies hat den Vorteil einer kleineren Kohärenzlänge wodurch auch größere Höhenunterschiede gemessen werden können, da es keine Probleme mit Phasensprüngen gibt. Dazu muss jedoch das Objekt oder entsprechend das Aufnahmesystem in Messrichtung verschoben werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass eine flächenhafte Messung mit einem handelsüblichen Bildsensor möglich wird [Seifert, 2005]. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau eines Weißlichtinterferometers auf der Basis eines Michelson-Interferometers. Bei einer Messung wird das von der Beleuchtung ausgesendete Licht im Strahlteiler aufgeteilt und sowohl auf den Referenzspiegel als auch auf das Messobjekt gerichtet. Falls der Abstand des Messobjekts dem Abstand zum

Referenzspiegel entspricht, können im aufgenommenen Bild Interferenzerscheinungen beobachtet werden. Für eine Höhenmessung werden die entstehenden Korrelogramme aufgezeichnet.

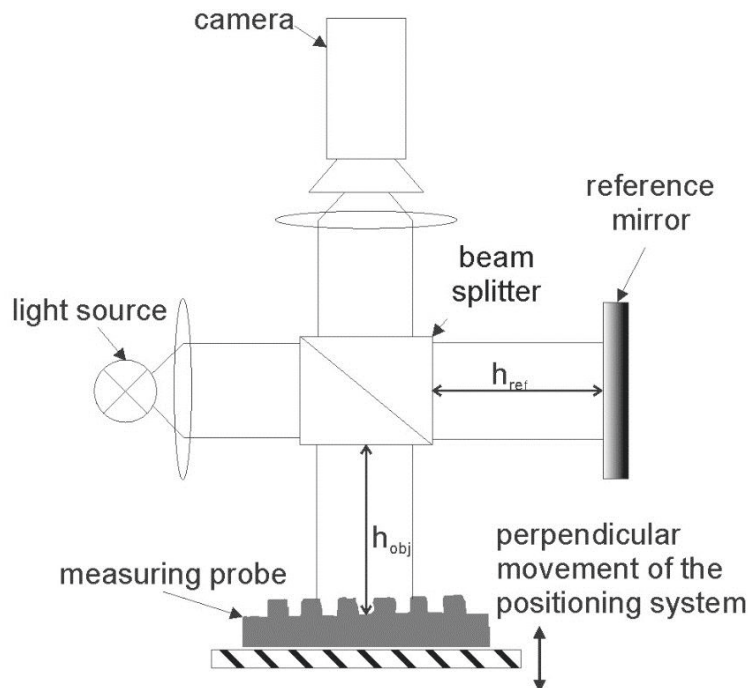


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Weißlichtinterferometers [Kapus, 2007]

Daraus folgt, dass für eine schnelle Weißlichtmessung grundsätzlich zwei Probleme betrachtet und optimiert werden müssen. Zum einen müssen schon während des Scan-Vorgangs (Bewegung in Z-Richtung) die Einzelnen Korrelogramme detektiert und zwischengespeichert werden (Eine Speicherung des gesamten Bildstapels ist zwar möglich jedoch nicht sinnvoll). Zum anderen müssen aus den ermittelten Korrelogrammen die exakten Höhenwerte berechnet werden.

3. AUFBAU DES 3D-OBERFLÄCHENSSENSORS

Der Oberflächensensor ist als kompaktes und autarkes System konzipiert. Abbildung 3 zeigt den Systementwurf des 3D-Oberflächensensors mit den einzelnen Komponenten:

1. Kamera-Komplettsystem (Spezialentwicklung)
2. Eingebettete FPGA-Plattform mit Schnittstellen zum Kameramodul und nach Außen
3. Beleuchtungssystem mit eigenem Steuermodul
4. Interferenz-Objektiv
5. Piezomotor

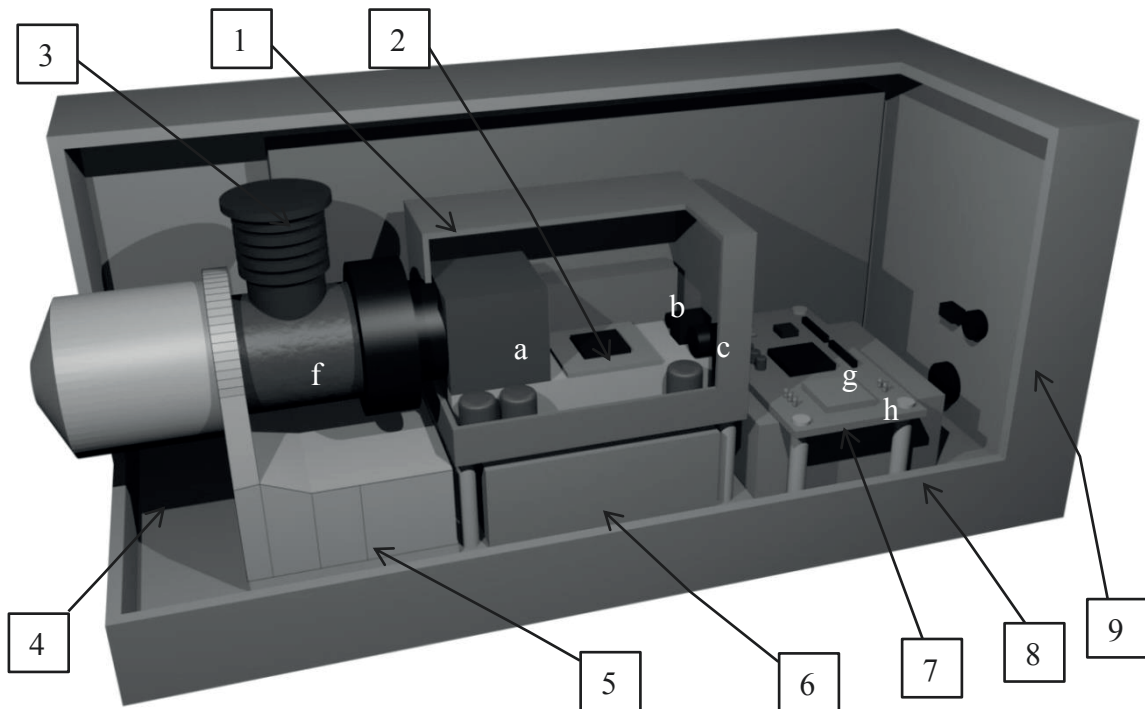


Abb. 3: Entwurf der Systemstruktur des 3D-Oberflächensensors

- 6. Piezosteuerung mit integriertem Frequenzgenerator und Regelung
- 7. Hauptprozessorsystem (HK)
- 8. Stromversorgung HK, Piezosteuerung, Kamerasystem, Beleuchtung
- 9. Systemschnittstellen (Ethernet, Digitale IO, Spannungsversorgung)

Das Kernstück der WLI Verarbeitung ist im Kamerasystem mit eingebetteter FPGA-SoC Plattform beheimatet. Diese kombiniert die Möglichkeit einer hochangepassten FPGA-Verarbeitung mit der funktionalen Mächtigkeit eines ARM Systems. Selbiges kümmert sich um die übergeordnete Ablaufsteuerung sowie den Datentransfer. Der Hauptkontroller, ein weiteres nachgelagertes ARM System, ist für die Datenanalyse und die Kommunikation mit der Umwelt sowie den zugehörigen Peripherieelementen (Licht- und Piezosteuerung) zuständig. Beide ARM Systeme sind für eine schnelle Kommunikation über Ethernet miteinander verbunden.

Abb. 4 zeigt die Struktur der FPGA-Basierten Weißlichtverarbeitung. Die über den CMOS-Sensor aufgenommen Bilddaten werden per LVDS seriell an den FPGA übertragen. Im „Cam-Interface“ werden die Daten zuerst deserialisiert und dann 16Bit Parallel an die Vorverarbeitung weitergereicht. Der „Preprocessor“ bildet den ersten Verarbeitungsschritt und detektiert in den Bilddaten die gesuchten Korrelogramme. Diese werden zur Weiterverarbeitung über den AXI-Bus im DDR3 Speicher des ARM Systems abgelegt. Nach abgeschlossener Bildaufnahme werden im „Postprocessor“ die gefundenen Korrelogramme in Höhenwerte umgerechnet und per Ethernet an die nachgelagerten Hauptkontrollereinheit übergeben. Dort werden die Messdaten für eine graphische Darstellung aufbereitet.

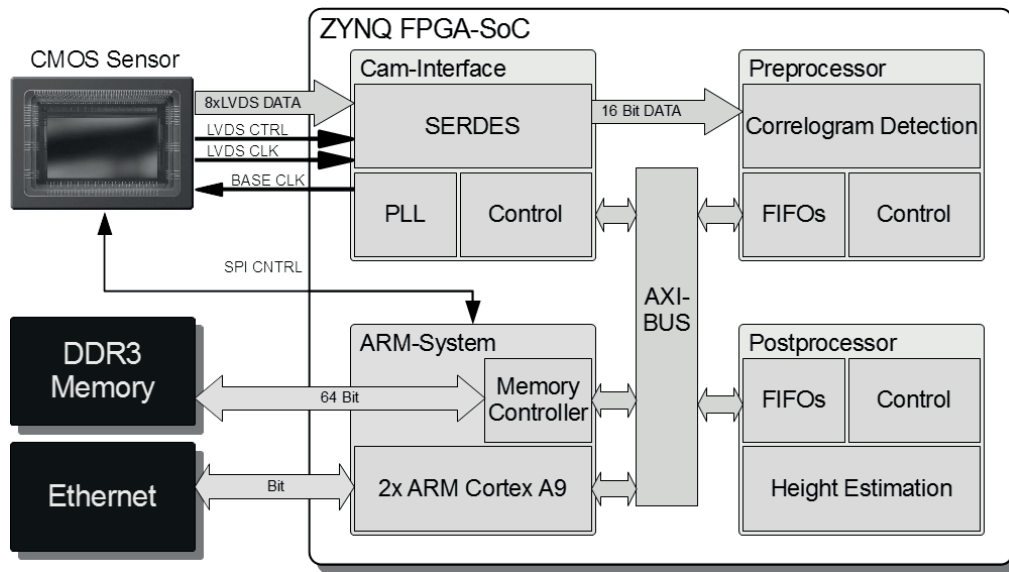


Abb. 4: Übersicht Kamera-FPGA-SoC Teilsystem

4. KENNZAHLEN UND MESSERGEBNISSE

Der aktuelle Prototyp des Systems verarbeitet Weißlichtdaten mit einer Framerate von 140 Bildern pro Sekunde. Was bei einer Schrittweite von 320 nm zu einer Bildaufnahmezeit von ca. 22 ms/μm führt. Pro Messung werden 1024x1024 Höhenwerte mit einer Genauigkeit von <100 nm berechnet. Die für die Berechnung benötigte Zeit beträgt derzeit ca. 2 s. Mit dem verbauten Positioniersystem ist ein Messbereich von insgesamt 200 μm erfassbar. Die laterale Auflösung des Systems ist vom gewählten Interferenzobjektiv abhängig. Das installierte Objektiv bietet eine 20-fache Vergrößerung und kann einen lateralen Messbereich von ca. 0,22 x 0,33 mm bei einer Auflösung von 0,3 μm pro Pixel erfassen. Abbildung 5 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Messung mit dem FPGA-basierten 3D-Oberflächensensor. Als Messobjekt diente ein Kalibriertarget mit einem 15 μm Punktabstand.

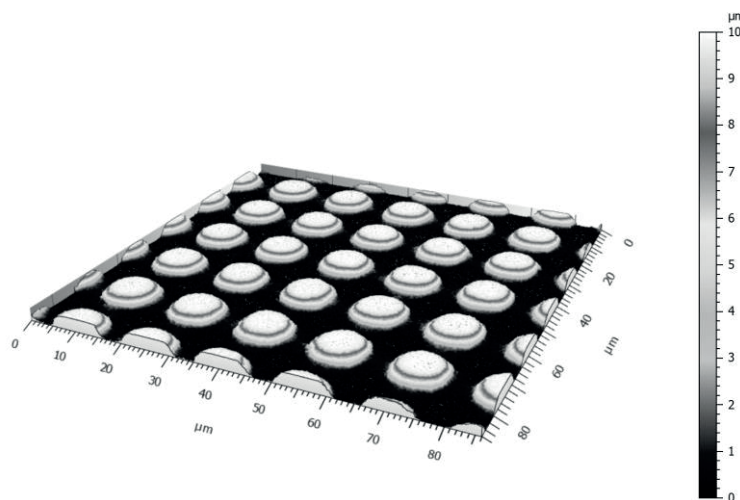


Abb. 5: Messergebnisse mit dem 3D-Oberflächensensor an einem Kalibriertarget

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Umsetzung eines kompakten Weißlichtinterferometers wie dem hier Vorgestellten, eröffnet der Industrie die Möglichkeit einer produktionsnahen, hundertprozentigen Qualitätskontrolle von Funktionsoberflächen. Ein funktionsfähiger Prototyp des Systems wurde auf der VISION 2016 vorgestellt. Derzeit sind wir in der Lage einen Bildstapel mit einer Geschwindigkeit von 140 Frames pro Sekunde zu erzeugen. Dies soll in Zukunft auf bis zu 300 FPS gesteigert werden. Auch die erreichbare Genauigkeit (aktuell < 100 nm) wird durch eine Umsetzung genauerer Nachverarbeitungsalgorithmen weiter gesteigert werden. Eine weitere Herausforderung liegt in der Reduzierung des Formfaktors für die Ansteuerung des Z-Positioniersystems, hier wird zurzeit an einer Lösung gearbeitet welche sowohl den Genauigkeitsanforderungen als auch den Anforderungen an Form und Größe entspricht.

6. QUELLEN

- [Machleidt, 2010] Machleidt, T.; Kollhoff, D.; Kapusi, D.: "smartWLI" – Eine modulare Systemlösung zur 3D-Oberflächenmessung mittels Weißlichtinterferometrie. 3D-NordOst, 13. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, GFal Berlin, Dez. 2010, ISBN: 987-3-033-942709-00-2.
- [Kapusi, 2007] Kapusi, D.; Machleidt T.; Franke, K.-H.; Jahn R.: White light interferometry in combination with a nanopositioning and nanomeasuring machine (NPMM). Proceedings of SPIE Vol. 6616, Munich 2007.
- [Seifert, 2005] Seifert, T.: Verfahren zur schnellen Signalaufnahme in der Weißlichtinterferometrie. Dissertation, Universität Erlangen, 2005.

MODERNE OBERFLÄCHENMESSUNG: GESTALT UND GESTALTABWEICHUNGEN

Heinz-J. Kedziora¹, Maik Meyer², Dr. Raimund Volk³

¹ Mahr GmbH, Produktmanagement Entwicklung, Heinz.Kedziora@Mahr.de

² Taylor Hobson, GB der Ametek GmbH, DKD-Kalibrierlabor, Maik.Meyer@Ametek.com

³ JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH, Grundlagenentwicklung, raimund.volk@jenoptik.com

Abstract: Moderne Tastschnittgeräte können gleichzeitig die Makro- und die Mikrogeometrie einer Werkstückoberfläche erfassen und ermöglichen so die Kontur- und die Rauheitsauswertung aus einem einzigen Tastschnitt. Da die Messzeit dadurch deutlich reduziert wird, bedeutet dies eine große Effizienzsteigerung in der Oberflächenmessung. Gegenüber der „klassischen“ Kontur- und Rauheitsmesstechnik ergeben sich Fragestellungen, die in den aktuellen Normen und Richtlinien noch nicht oder nicht ausreichend beantwortet werden, wie z. B.: Welches Tastelement ist zu verwenden? Wie sind die Messbedingungen zu wählen? Welche Einflussgrößen für die Messunsicherheit sind zu berücksichtigen? Welche Messunsicherheit kann erwartet werden? Wie kann die Rückführbarkeit sichergestellt werden?

Im Vortrag sollen Antworten auf diese Fragen gegeben werden, nachdem in einer kurzen Einführung der Stand der Gerätetechnik vorgestellt wird. Die Ergebnisse ausgewählter Messbeispiele werden das Thema abrunden.

KEYWORDS: KONTURMESSUNG, RAUHEITSMESSUNG, TASTSCHNITTGERÄT

1. EINLEITUNG

Moderne Tastschnittgeräte können gleichzeitig die Makro- und die Mikrogeometrie einer Werkstückoberfläche erfassen und ermöglichen so die Kontur- und die Rauheitsauswertung aus einem einzigen Tastschnitt. Da die Messzeit dadurch deutlich reduziert wird, bedeutet dies eine große Effizienzsteigerung in der Oberflächenmessung.

2. STANDORTBESTIMMUNG

2.1 Aktueller Stand der Gerätetechnik

Wesentliche Merkmale der hier betrachteten Tastschnittgeräte sind ein Z-Messbereich deutlich größer als 10 mm bei einer Auflösung in Z-Richtung im Nanometerbereich oder kleiner und einer Auflösung in X-Richtung deutlich besser als 1 µm. Das Einmessen bzw. das Justieren dieser Messgeräte erfolgt über den gesamten Messbereich in einer Prozedur. Mit Hilfe geeigneter Normale (Raunormal, Tiefeneinstellnormal, Konturnormal, hochgenaue Kugeln) kann nachgewiesen werden, dass die technischen Daten über den gesamten Messbereich eingehalten werden, siehe z. B. [Volk, 2013] [Kedziora, 2008].

2.2 Aktueller Stand der Software zur Konturauswertung

Insgesamt kann der aktuelle Stand der Software zur Konturauswertung in Messgeräten gemäß 2.1 als gut betrachtet werden. Das Grundprinzip Erfassen einer Kontur als Tastschnitt, Berechnung von Ersatzelementen und Auswertung von Ergebnissen aus den Ersatzelementen wird generell angewandt und ermöglicht die Bewertung von Konstruktionselementen gemäß der technischen Spezifikation. Teilweise gibt es rein sprachliche Unterschiede in Benennungen, z. B. Bogen/ Kreisbogen/ Radius/ Teilkreis, Gerade/ Linie/ Segment oder Auswertezone/ Auswertebereich/ Abschnitt/ Messbereich. Die Ursache unterschiedlicher Ergebnisse ist eher auf unterschiedliche Auswertestrategien als auf verschiedene Geräte derselben Geräteklasse zurückzuführen.

2.3 Aktueller Stand der Standardisierung

Im Folgenden soll eine kurze Zusammenfassung des aktuellen Standes der Normen und Richtlinien gegeben werden.

Für die klassische Rauheitsauswertung, d. h. Messung auf mehr oder weniger ebenen Flächen, gibt es nationale und internationale Normen für Zeichnungseintragung, Gerätetechnik, Messbedingungen, Kennwert- und Filteralgorithmen, Kalibrierung, Normale [1302, 2002], [3274, 1998], [4288, 1998], [4287, 2010], [10049, 2014], [16610-21, 2011], [ASME B46.1, 2009], [13565-1 bis 3, 1998], [12179, 2000], [5436-1, 2000].

In der Gerätenorm der neuen Normreihe ISO 25178 für die flächenhafte Beurteilung von Oberflächen ist in der Gerätenorm „Merkmale von berührend messenden Geräten“ erstmalig die bogenförmige Bewegung des drehbar gelagerten Tastelements aufgenommen, siehe Abb. 5 [25178-601, 2011].

Nationale oder internationale Normen für die Konturmessung und -auswertung gibt es bislang nicht. Für die Prüfung von Konturmessgeräten und die Rückführung von Konturmessungen wurden Anfang der 2000er Jahre in Zusammenarbeit mit der PTB geeignete Normale entwickelt und eingeführt [Neugebauer, 2004]. Erste Richtlinien zu Konturmessgeräten wurden im VDI FA 3.24 erarbeitet [2629-1, 2008] und [2629-2, 2012]. Einen Überblick über den Stand der Normung zu Kanten und Radien gibt es im Tagungsband zum XIII. Internationalen Oberflächenkolloquium [Dietzsch, 2012].

Detaillierte Vorgaben für die Messung und Auswertung von Werkstückkanten mit unbestimmter Form und von Radien an Werkstückkanten gibt es in zwei Bosch-Normen [BOSCH1] und [BOSCH2].

3. UNGELÖSTE MESSTECHNISCHE AUFGABEN – BEISPIELE

3.1 Radien, Kanten, Übergänge

Ein wesentliches Defizit der Konturbewertung besteht in den fehlenden Festlegungen der Auswertemethoden. Während zum Beispiel in der Rauheitsmesstechnik eine umfassende Festlegung von Default-Bedingungen existiert, ist bei der Konturmesstechnik keinerlei Festlegung vorhanden. Dies führt in der Praxis zu unterschiedlichen Auswertestrategien und damit zu unterschiedlichen Messergebnissen. Diese Problematik war Anlass, im Jahr 2012 das Oberflächenkolloquium ganz ins Zeichen des Themas „Kanten und Radien“ zu stellen [Dietzsch, Gröger, 2012].

Häufige Probleme in der Praxis werden bei der Bewertung von Radien, Radiusübergängen und Kanten angetroffen. Obwohl es hier einzelne firmenspezifische Lösungen gibt (z. B. [BOSCH1], [BOSCH2]), existiert keine Standardmethode. Die folgenden Abbildungen sollen dies beispielhaft verdeutlichen.

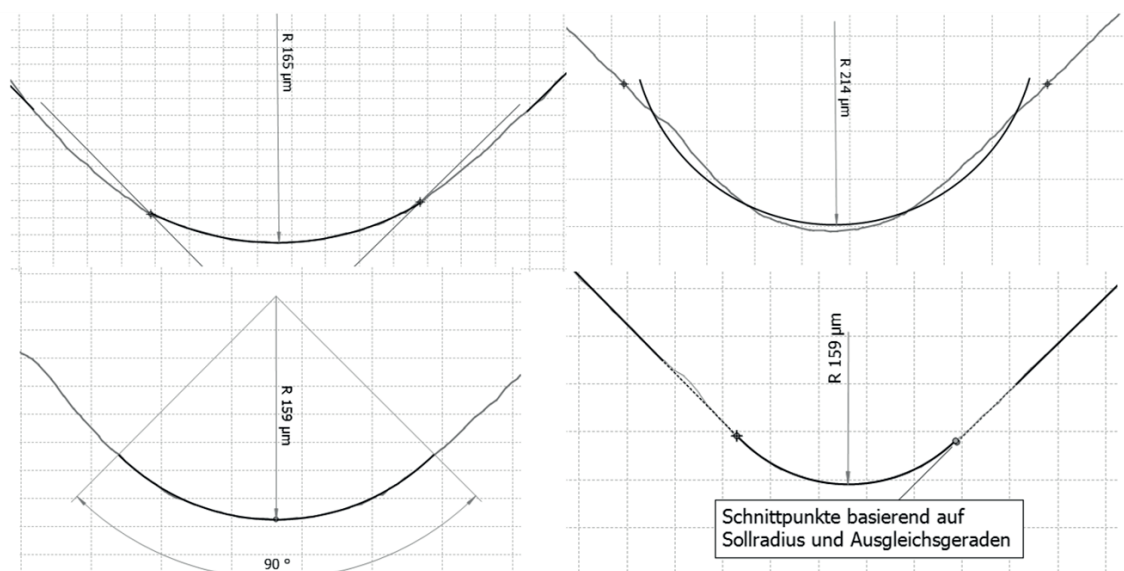


Abb. 1: Definition eines Radius-Bereichs – vier beispielhafte Möglichkeiten

Der Auswertebereich für die Radiusbewertung wird in der Abb. 1 links oben durch Schnittlinien parallel zu den Kanten erzeugt. Im Bild rechts daneben geschieht die Bereichsfestlegung durch eine Schnitttiefe. Im Bild unten links ist ein Segmentwinkel definiert, während im Bild unten rechts ein Sollradius eingepasst wird, dessen Schnittpunkte mit den Kanten den Radiusbereich festlegen. Jede dieser Methoden erlaubt die eindeutige und wiederholbare Auswertung des Radius, führt jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen. Wenn der Konstrukteur oder der Prüfplan keine Methode vorschreibt, ist eine Default-Festlegung sinnvoll.

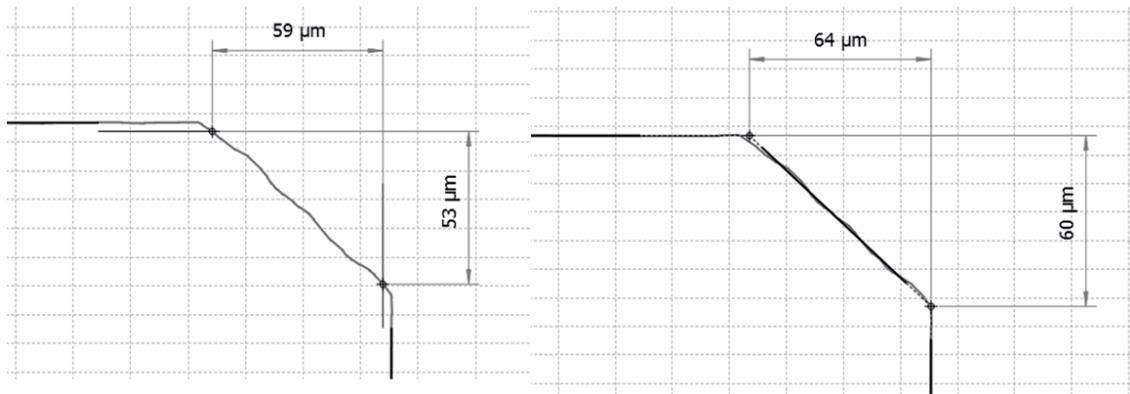


Abb. 2: Definition eines Kantenbruchs – zwei beispielhafte Möglichkeiten

Abb. 2 zeigt die gleiche Situation für Kantenbrüche. Hier werden die Bereiche einmal durch Schnittlinien parallel zu den Kanten erzeugt bzw. aus Schnittpunkten der Kanten mit dem Kantenbruch definiert.

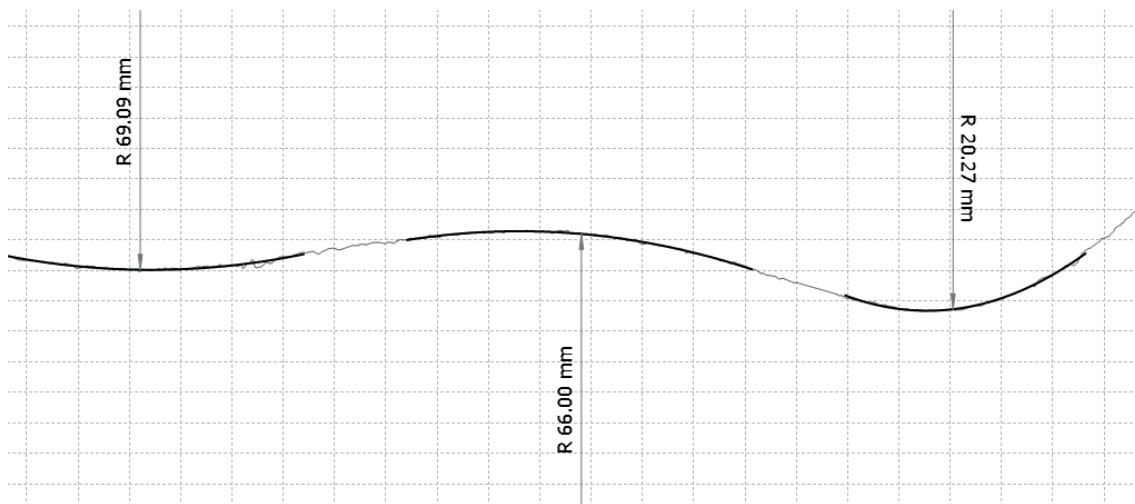


Abb. 3: Beispiel Übergänge von Radien

Ein weiteres ungeklärtes Problem ist der Umgang mit Radiusübergängen (s. Abb. 3). Hier stellt sich die Frage, wie eine Default-Festlegung für die Erkennung der Übergänge der Kreisbögen bzw. der Radien definiert wird.

Bei allen genannten Beispielen ist aber nicht nur die Festlegung der Methoden notwendig. Ebenso sollte dem Konstrukteur die Möglichkeit gegeben werden, diese oder weitere Methoden zeichnungstechnisch festzulegen, um funktionalen Anforderungen zu genügen oder auch um Sonderfälle eindeutig definieren zu können.

Schlussendlich muss auch die Problematik der Messung großer Radien bei kleiner Segmentlänge erwähnt werden. Hier sollten dem Konstrukteur Hilfsmittel an die Hand gegeben werden, um einzuschätzen, wie sinnvoll die Tolerierung des Radius im vorliegenden Falle noch ist oder ob z. B. besser eine Sollradius-einpassung vorgenommen werden sollte und dann nur noch die Formabweichung bewertet wird.

3.2 Defizite in der Standardisierung

Im Abschnitt 3.1 wurden fehlende Vorgaben für die Auswertemethode erläutert, aber es gibt weitere, grundsätzliche, nicht standardisierte Bedingungen, die die Hersteller von Konturmessgeräten lösen, ohne auf eine standardisierte Basis zurückgreifen zu können.

3.2.1. Mittelpunktprofil versus Berührprofil

Nach DIN EN ISO 3274 ist das Mittelpunktprofil, also die „Linie des Mittelpunktes einer Tastspitze, die die Oberfläche in der Schnittebene abstastet“, die Basis für jede weitere Auswertung [3274, 1998]. Dies ist für die Auswertung einer Kontur nicht sinnvoll, wie in Abb. 4 verdeutlicht wird.

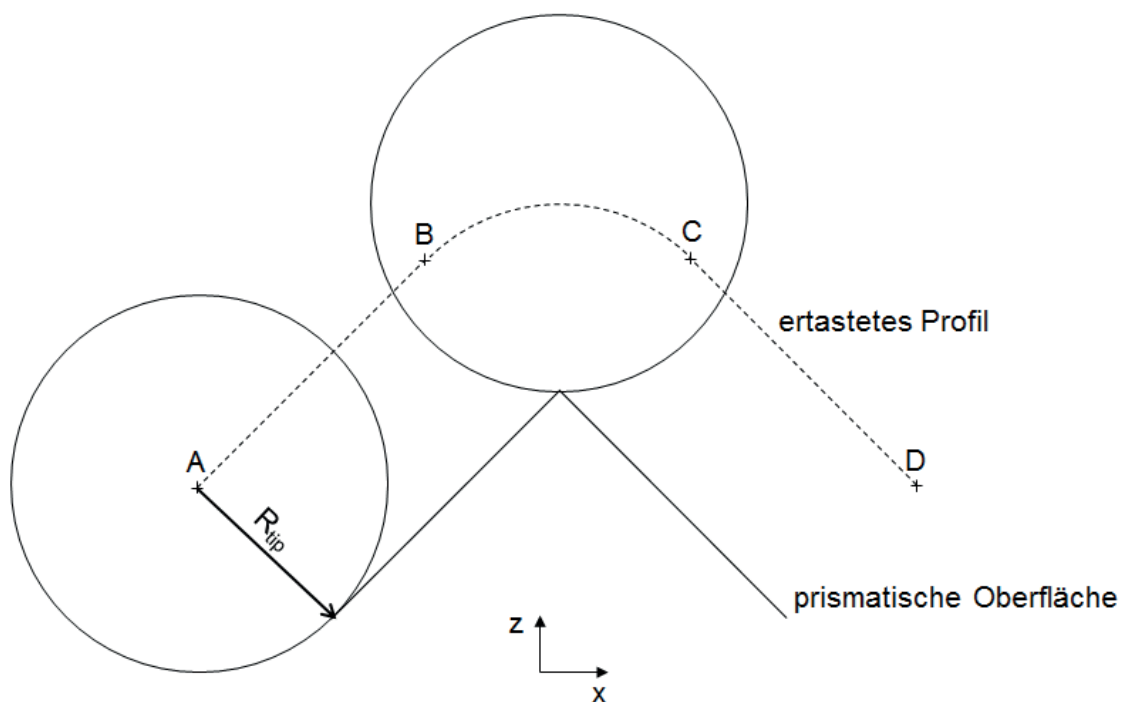


Abb. 4: Ertastetes Profil einer prismatischen Oberfläche

Der Winkel der prismatischen Oberfläche wird in den Abschnitten AB und CD des ertasteten Profils korrekt wiedergeben, lediglich um den Tastelementradius R_{tip} verschoben, aber der sehr kleine Radius an der Spitze wird im Abschnitt BC um R_{tip} vergrößert. Die Konturauswertung basiert auf dem Berührprofil, das durch morphologische Filterung aus dem ertasteten Profil berechnet wird.

3.2.2. Profilpunktabstand und Interpolation

In DIN EN ISO 3274 wird, wenn in der Spezifikation nichts anderes angegeben ist, der maximale Profilpunktabstand für die Rauheitsmessung abhängig vom Cut-off λ_c vorgegeben. Für die Konturmessung gibt es keine „Default-Vorgaben“. Außerdem bewirkt die bogenförmige Bewegung des Tastelements

abhängig von der Auslenkung dZ eine Verschiebung des Antastpunkts um dX , siehe Abb. 5, was dazu führt, dass die erfassten Profilpunkte einer beliebigen Kontur nicht äquidistant sind.

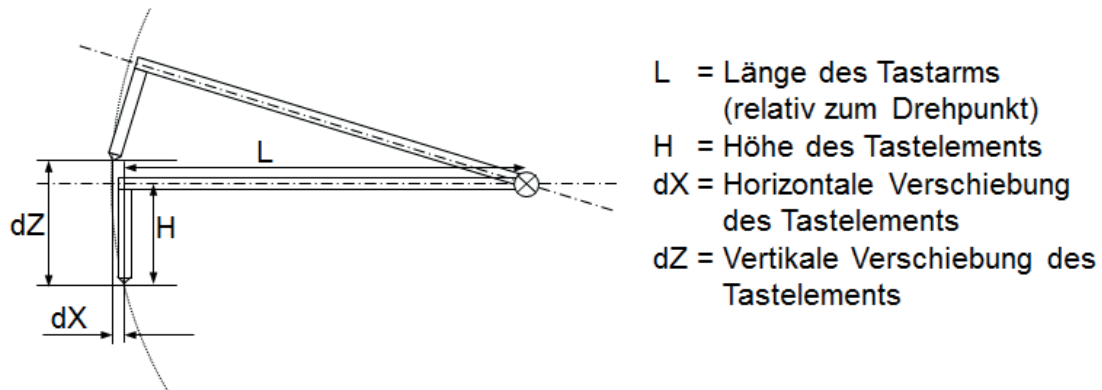


Abb. 5: Bogenförmige Bewegung des drehbar gelagerten Tastelements

Für die Bestimmung von Ersatzelementen, die üblicherweise die Basis der Konturauswertung sind, ist dies nicht kritisch, aber spätestens dann, wenn auf Basis der gleichen Messdaten eine Rauheitsauswertung erfolgen soll, muss durch Interpolation ein konstanter Profilpunktabstand erzeugt werden. Dazu sind verschiedene Verfahren möglich, die heute nicht standardisiert sind.

3.2.3. Formeliminierung

Während in der Konturmessung in der Regel die Form bzw. die Formabweichungen ausgewertet werden, gilt für das Primärprofil, das die Basis für die weitere Rauheitsmessung ist, „das Primärprofil enthält keine Nennform“ [ISO 3274]. Dabei ist nicht eindeutig vorgegeben, wie die Nennform zu entfernen ist. Während es bei Rauheitsmessgeräten mit einem (sehr) kleinen Messbereich ausreicht, die Neigung eines erfassten Profils durch eine Projektion auf die X-Achse zu eliminieren, erfolgt bei Tastschnittgeräten, die die Makro- und Mikrogeometrie erfassen können, die Formeliminierung durch eine Rotation der Profildaten. Dadurch ist die Länge des Konturprofils größer als die vor der Messung eingestellte Messstrecke.

4. LÖSUNGSANSÄTZE

Im Gemeinschaftsausschuss FA 3.24/3.25 des VDI/VDE wird zurzeit mit der Richtlinie VDI 2604 ein erstes Dokument erarbeitet, in dem Definitionen und Merkmale von Geräten abgestimmt und festgelegt werden. Dadurch werden rein sprachliche Hemmnisse und Missverständnisse ausgeräumt werden.

Ein sehr viel schwieriges Thema ist die „Verifikation“ der in einer Zeichnung vorgegebenen Konturspezifikation, siehe Abb. 6.

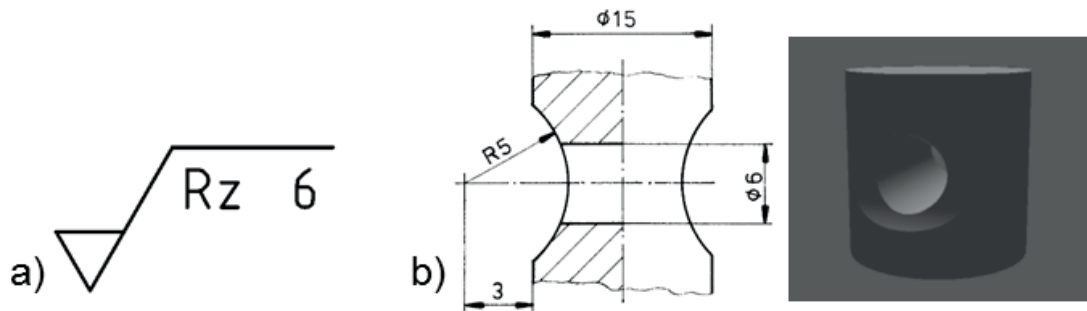


Abb. 6: a) Beispiel einer Rauheitsspezifikation und b) Beispiel einer Konturspezifikation

Die Rauheitsspezifikation ist im Standardfall so einfach, weil es neben der Angabe der Toleranzgrenze zahlreiche „Default-Bedingungen“ gibt, die bei der Messung zu beachten sind. Im Beispiel bedeutet dies für die Rz-Spezifikation: Bei der Messung mit einem Tastschnittgerät mit 2- μm -Tastspitze, einem Profilpunktastabstand von 0,5 μm über eine Messstrecke von 5 x 0,8 mm (= 4,0 mm Länge) senkrecht zur Bearbeitungsrichtung und Auswertung nach Anwendung eines λ_s -Filter mit der Grenzwellenlänge 2,5 μm und einem Gauß-Filter λ_c mit 0,8 mm darf das Ergebnis der Rz-Berechnung 6 μm nicht überschreiten.

Ganz anders ist die Situation für die Konturspezifikation, Abb. 6 b): In der Zeichnung ist mit „R5“ ein Radius von 5 mm spezifiziert, ohne dass es für diesen Fall „Default-Bedingungen“ oder weitere Angaben zur Messung und Auswertung gibt. Es ist dem Anwender überlassen, welcher Tastelementradius verwendet wird, über welche Strecke und mit welchem Punktabstand die Kontur erfasst wird und über welchen Ausschnitt bzw. hier welche Ausschnitte der erfassten Kontur die Radiusauswertung erfolgt. Die Vergleichbarkeit verschiedener Messungen ist nicht gegeben. Ein Ausweg aus dieser Situation ist auf zwei Wegen möglich:

- Durch eine Norm oder Richtlinie, die Default-Bedingungen für die Konturmessung und -auswertung definiert und/oder
- durch eine Norm oder Richtlinie, die für die Konstruktion Angaben zur Verfügung stellt, die die Mess- und Auswertebedingungen genauer spezifizieren.

Das Beispiel der Prüfung des 5-mm-Radius stellt den einfachen Fall dar, da hier nur ein „primäres“ Konturelement ausgewertet wird. Es wird erheblich komplexer, wenn Konturergebnisse aus mehreren Ersatzelementen berechnet werden müssen, z. B. der Abstand der Mittelpunkte zweier Regressionskreise.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Gerätenorm für Tastschnittgeräte muss der aktuelle Stand der Geräte berücksichtigt werden (DIN EN ISO 3274 hat den Stand von 1998!). Eine neue Norm über die „Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten“ wird den Stand moderner Tastschnittgeräte widerspiegeln. Damit wird die Konturmesstechnik als ein Teil der Oberflächenmessung in die Normung einziehen.

5. GESTALTABWEICHUNGEN UND MESSUNSICHERHEIT

Bei einer Rauheitsmessung liefert die Inhomogenität der Oberfläche, die z. B. durch die Streuung der R_z -Werte bei über die Oberfläche verteilten Messungen quantifiziert werden kann, den größten Einzelbeitrag an der Gesamtmessunsicherheit [2602-4, 2014].

Bei Konturmessungen liefern die Rauheit und insbesondere Formabweichungen wesentliche Beiträge an der Messunsicherheit eines Konturergebnisses. Dieses wird am Beispiel eines konvexen Konturelements, einem Kreisbogen mit nominellem 10-mm-Radius, erläutert.

Gemessen wurden zwei Exemplare eines Konturnormals nach VDI 2629, eines in Referenzqualität und ein zweites mit nur grenzwertiger Qualität. Dieses Normal hat eine wenige μm große Formabweichung am Zenit, vermutlich aufgrund von Umkehrspiel bei der Herstellung mit der Erodiermaschine.

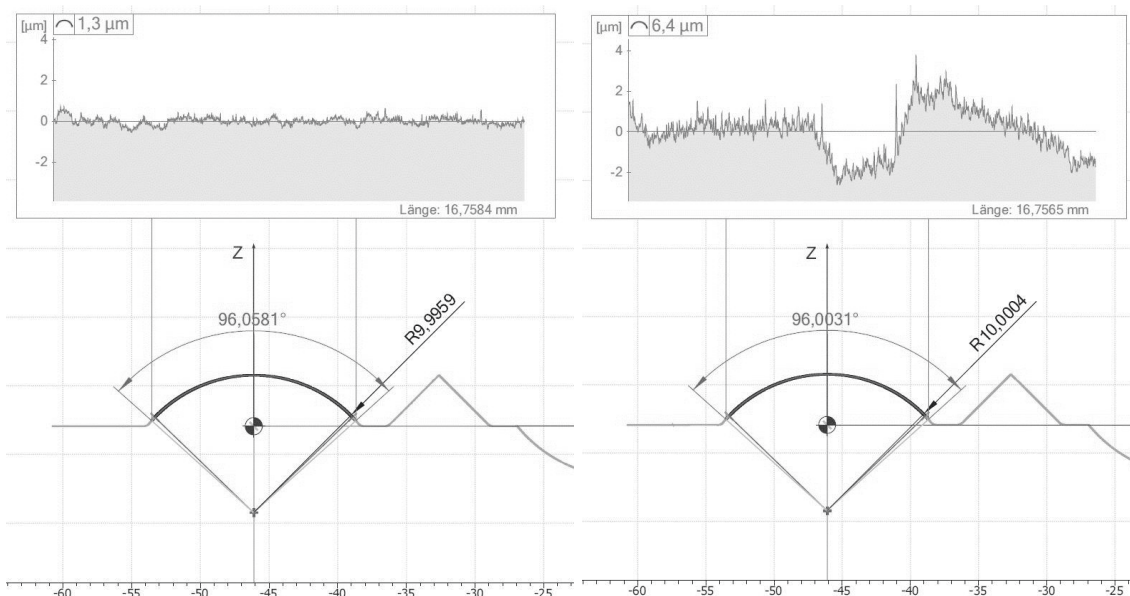


Abb. 6: Beispiele konvexer Kreisbögen, links mit geringer, rechts mit großer Formabweichung

Der Einfluss der Formabweichung wird bei einem kleineren ausgewerteten Winkelsegment größer. Zur Verdeutlichung wurden Rohdaten des Referenznormals und des Normals mit deutlicher Formabweichung mehrfach ausgewertet, wobei der Winkelbereich der mittig um den Zenit liegenden Auswertezone variiert wurde. In der Praxis sind Winkelsegmente von 40° und weniger durchaus üblich. Aus den Daten innerhalb der Auswertezone wurden jeweils ein Regressionskreis und dessen Radius berechnet, siehe Abb. 7.

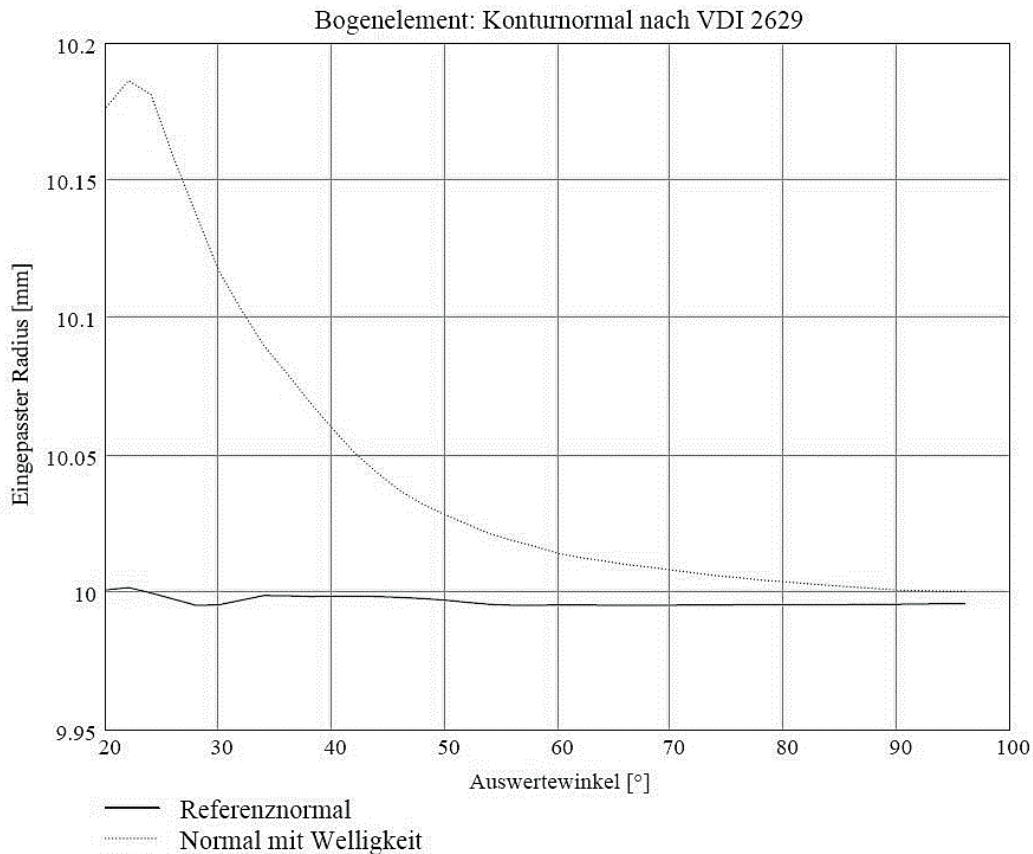


Abb. 7: Abhängigkeit des Radius des Konturelements vom ausgewerteten Winkelsegment

Beschreibung

In Abb. 7 stellt die gepunktete Kurve den berechneten Radius des „schlechten“ Konturnormals dar, siehe Abb. 6 rechts. Die durchgezogene Kurve zeigt die gleiche Auswertung für das Konturnormal in Referenzqualität, siehe Abb. 6 links.

Kommend von dem großen Auswertebereich von 96°, rechts im Diagramm in Abb. 7, steigt der berechnete Radius beim „schlechten“ Normal mit kleiner werdendem Auswertebereich stark an.

Beim Referenznormal (durchgezogene Kurve) sind zwar auch Schwankungen zu beobachten, aber auf einer wesentlich kleineren Skala.

Interpretation

Die starken Abweichungen beim berechneten Radius bei Verkleinerung des Auswertebereichs sind beim „schlechten“ Normal wohl auf die mittig vorhandene Formabweichung bzw. lokale Welligkeit zurückzuführen. Diese spielt bei kleineren Auswertebereichen proportional eine immer größere Rolle.

Wäre die Formabweichung nicht weitgehend mittig zentriert, wäre zu erwarten gewesen, dass sich in der Radien-Verlaufskurve eine andere Form ergeben hätte, möglicherweise auch abwechselnd positive und negative Abweichungen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurde gezeigt, dass moderne Tastschnittgeräte leistungsfähiger sind als das in der gültigen Gerätenorm abgebildete Tastschnittgerät. Es gibt sehr leistungsfähige Softwarepakete zur Konturauswertung, die die Anforderungen der Industrie erfüllen. Die Hauptursachen für zum Teil unzureichende Vergleichbarkeit von Konturauswertungen sind

- a) die Unterschiede in der Auswertestrategie und
- b) die Mikrostruktur, die der Kontur überlagert ist.

Die der Kontur überlagerte Rauheit, Welligkeit und Formabweichung führt insbesondere dann zu einer deutlich erhöhten Messunsicherheit, wenn z. B. eine Radiusauswertung über ein kleines Winkelsegment oder eine Winkelauswertung bei sehr kurzen Schenkellängen erfolgt.

Da die Tastschnittgeräte der hier behandelten Geräteklasse neben der Kontur (= Makrogeometrie) auch die Mikrogeometrie erfassen können, ist es denkbar, dass zusätzlich zur Berechnung des Konturergebnisses die Messunsicherheit auf Basis der in den Messdaten vorhandenen Mikro-Gestaltabweichungen und der technischen Daten des Tastschnittgeräts ermittelt wird. Die Mathematik hierfür ist nicht trivial, und es wäre wünschenswert, dass dieses Thema in Zusammenarbeit von Herstellern, Hochschule und PTB angegangen und die Entwicklung von Normen und Richtlinien vorangetrieben wird.

7. QUELLEN

- [10049, 2014] DIN EN 10049:2014-03: Messung des arithmetischen Mittenrauwertes Ra und der Spitzenzahl R_{Pc} an metallischen Flacherzeugnissen. Beuth-Verlag, Berlin, 2014.
- [1302, 2002] DIN EN ISO 1302:2002-06: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation. Beuth-Verlag, Berlin, 2002.
- [12179, 2000] DIN EN ISO 12179:2000-11: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Kalibrierung von Tastschnittgeräten. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- [13565-1 bis 3, 1998] DIN EN ISO 13565-1:1998-04: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen. Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve. Teil 3: Beschreibung der Höhe von Oberflächen mit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve. Beuth-Verlag, Berlin, 1998/ 2000.
- [25178-601, 2011] DIN EN ISO 25178-601:2011-01 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft –

- Teil 601: Merkmale von berührend messenden Geräten (mit Taster). Beuth-Verlag, Berlin, 2011.
- [2602-4, 2014] VDI/VDE 2604 Blatt 4: Oberflächenprüfung – Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten – Kalibrierung, Messunsicherheit. Beuth-Verlag, Berlin, 2014.
- [2629-1, 2008] VDI/VDE 2629 Blatt 1: Genauigkeit von Konturenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Konturenmessgeräte nach dem taktilen Tastschnittverfahren. Beuth-Verlag, Berlin, 2008.
- [2629-2, 2012] VDI/VDE 2629 Blatt 2 Genauigkeit von Konturenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Ermittlung der Unsicherheit von spezifischen Konturenmessungen mit Normalen/kalibrierten Werkstücken. Beuth-Verlag, Berlin, 2012.
- [3274, 1998] DIN EN ISO 3274:1998-04: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten. Beuth-Verlag, Berlin, 1998.
- [4287, 2010] DIN EN ISO 4287:2010-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth-Verlag, Berlin, 2010.
- [4288, 1998] DIN EN ISO 4288:1998-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth-Verlag, Berlin, 1998.
- [5436-1, 2000] DIN EN ISO 5436-1:2000-11: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale – Teil 1: Maßverkörperungen. Beuth-Verlag, Berlin, 2010.
- [ASME B46.1, 2009] Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay). The American Society of Mechanical Engineers. New York 2009.
- [BOSCH1] Bosch-Norm N42AP620: „Prüfung von Werkstückkanten mit unbestimmter Form“. Robert Bosch GmbH, 2015.
- [BOSCH2] Bosch-Norm N42AP621: „Messung von Radien an Werkstückkanten“. Robert Bosch GmbH, 2010.
- [Dietzsch, 2012] Dietzsch, M.: Stand der Normung zu Kanten und Radien. Tagungsbeitrag: XIII. Internationales Oberflächenkolloquium. Universitätsverlag Chemnitz, 2012.
- [Dietzsch, Gröger, 2012] XIII. Internationales Oberflächenkolloquium, Tagungsband, Universitätsverlag Chemnitz, 2012.

- [Neugebauer, 2004] Neugebauer, M.; Jusko, O.; Wäldele, F.; Kedziora, H.-J.; Meyer, M.; Volk, R.: Geometrische Normale zur Prüfung von Konturmessgeräten. Technisches Messen 71, 2004.
- [Kedziora, 2008] Kedziora, H.-J.: Correct roughness evaluation on non-flat surfaces. Tagungsbeitrag: XII. Internationales Oberflächenkolloquium. Shaker Verlag, Aachen, 2008.
- [Volk, 2013] Volk, R; Feifel, S.: Full scale calibration of a combined tactile contour and roughness measuring device. Tagungsbeitrag: The 11th International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments. Aachen, 2013.

EINFLÜSSE DER OBERFLÄCHENSTRUKTUR AUF DIE STREUUNG VON RAUHEITSKENNWERTEN: PRAXISRELEVANTE UNTERSUCHUNGEN

Sebastian Rief¹, Jörg Seewig², Dorothee Hüser³

¹ Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, rief@mv.uni-kl.de

² Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, seewig@mv.uni-kl.de

³ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Abt. 5 Fertigungsmesstechnik, dorothee.hueser@ptb.de

Abstract: Bei der Messung von Rauheit auf technischen Oberflächen fällt oftmals auf, dass sich die Kennwerte auf derselben Probe an unterschiedlichen Messstellen stark unterscheiden. Die Ursachen für diese Streuung der Rauheitskennwerte werden anhand detaillierter Messungen verschiedener Oberflächen vorgestellt. Dabei spielt es eine wichtige Rolle, dass viele technische Funktionsoberflächen zufällige Strukturen („Statistik der Oberfläche“) aufweisen. Deren Auswirkungen auf Rauheitskennwerte werden anhand verschiedener Messstellenpläne untersucht. Durch die Wahl der Messbedingungen kann der Einfluss im konkreten Anwendungsfall eingestellt werden. Die Untersuchungen stellen eine Basis dar, um die Unsicherheit der Rauheitskennwerte durch die Statistik der Oberfläche in die Tolerierung von Bauteilen einfließen lassen zu können.

KEYWORDS: RAUHEIT, UNSICHERHEIT, STATISTIK, FUNKTIONSOBERFLÄCHEN

1. MOTIVATION UND EINLEITUNG

Rauheitsmesstechnik spielt eine wichtige Rolle in der Beurteilung von Funktionsoberflächen. Dabei ist die taktile Messtechnik auch heute noch das meistgenutzte Messprinzip. Sie ist im Vergleich zu optischen Verfahren besser verstanden und sehr vielfältig und robust einsetzbar [Manske, 2013]. Die Normung ist deutlich weiter fortgeschritten. Ihre Nachteile gegenüber der optischen Messtechnik sind zum einen ihre Langsamkeit, zum anderen ist sie in der Praxis nicht für flächenhafte Messungen einsetzbar.

Technische Funktionsoberflächen weisen oftmals zufällige Strukturen, die sogenannte „Statistik der Oberfläche“, auf. Die Topographie ändert sich im Bereich weniger Mikrometer mitunter stark. Dies bedeutet, dass bei einer geringen Veränderung der Messposition sich das gemessene Profil und damit die Rauheitskennwerte stark ändern können (siehe hierzu Abb. 2). Dies führt bei der taktilen Rauheitsmessung von technischen Funktionsoberflächen zu einer hohen statistischen Unsicherheit. Dieses Problem ist schon lange bekannt [2602, 2014, S. 6] und praxisrelevant, da die Rauheitskennwerte über die Annahme oder Nichtannahme von Bauteilen entscheiden können. Es existieren allerdings noch keine allgemeinen Richtlinien und Vorgehensweisen, um diese

Streuungen der Rauheitskennwerte zu charakterisieren und abzuschätzen. Untersuchungen hierzu werden am Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik durchgeführt, wobei diese zunächst auf die Rauheit auf Zylinderlaufbahnen fokussiert sind. Dazu wurde mit Unterstützung des „Arbeitskreises 3D-Rauheitsmesstechnik“ der deutschen Automobilindustrie eine Auswahl an Proben zusammengestellt und detailliert gemessen [Rief, 2016]. Weiterhin sind mathematische Modelle in Arbeit, anhand derer die Statistik der Oberfläche auf Basis von Monte-Carlo-Simulationen untersucht werden kann.

Ziel dieser Arbeit ist es, anhand praxisnaher Beispiele die Auswirkungen der Statistik der Oberfläche anschaulich zu machen. Es werden verschiedene Messstellenpläne miteinander verglichen, um den Einfluss der Messstrategie aufzuzeigen. In einem zweiten Abschnitt wird am Beispiel der Kenngröße R_z die Änderung von Messbedingungen in Kombination mit der Statistik der Oberfläche untersucht. Die Basis bilden hier ebenfalls praxisnahe Messungen realer technischer Oberflächen. Abschließend folgen Fazit und Ausblick.

1.1 Messstrategie

Alle Messungen in dieser Veröffentlichung wurden an einem nanoscan 855 (vgl. Abb. 1 a) und b)) von Jenoptik durchgeführt. Dieses bietet die Möglichkeit hochauflösender Rauheitsmessungen (Auflösung in Höhenachse 0,6 nm laut Hersteller) bei einem großen Messbereich (bei Rauheitsmessungen +/- 12 mm). Durch einen Y-Positionierer sind CNC-gesteuerte Parallelmessungen und das automatisierte Abfahren verschiedener Messstellenpläne möglich.

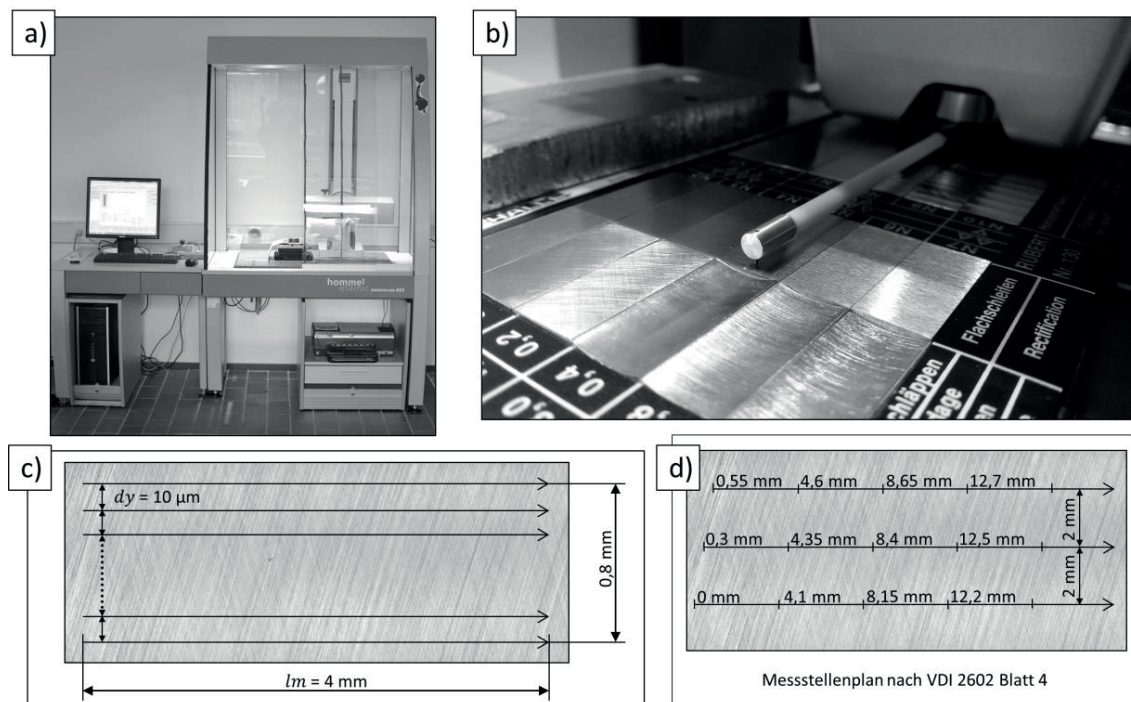


Abb. 1: Messung der Proben. a) Messplatz Nanoscan 855, b) Messung der Proben, c) Messstellenplan für die Parallelmessungen, d) Messstellenplan nach VDI 2602 Blatt 4

Für alle Profile wird nach der Messung eine Bezugsgerade mittels Total-Least-Squares berechnet, die Profile werden nach dieser Geraden ausgerichtet. Anschließend werden sie mit einem kubischen Spline auf ein äquidistantes Raster interpoliert. Als Profilfilter kommen das lineare Gaußfilter nach ISO 16610-21 [16610-21, 2013] im Standardfall und das Sonderfilter nach ISO 13565-1 [13565-1, 1998] für die plateauartigen Oberflächen zum Einsatz. Die Filtergrenzwellenlängen werden für alle Auswertungen zu $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ und $\lambda_s = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$ gewählt. Für die Messstrecke gilt bei allen Auswertungen im ersten Abschnitt $l_m = 4 \text{ mm}$. Die Bedingungen wurden so festgelegt, um alle Profile vergleichbar auszuwerten und nur den Einfluss der Oberfläche selbst darzustellen. Es werden verschiedene Messstellenpläne miteinander verglichen. Zum einen werden auf jeder Oberfläche 81 parallele Messungen im Abstand von $10 \text{ }\mu\text{m}$ durchgeführt, um das Verhalten der Rauheitskennwerte quer zur Messrichtung zu untersuchen (vgl. Abb. 1 c)). Weiterhin wurde der Messstellenplan aus VDI 2602 Blatt 4 [2602, 2014] gewählt (vgl. Abb. 1 d)). Dieser wird speziell zur Untersuchung der Statistik der Oberfläche empfohlen. Zusätzlich wurden auf jeder Probe 25 Wiederholmessungen auf der gleichen Stelle, ohne Neueinlegen der Proben durchgeführt. Mit deren Hilfe kann im Vergleich der Einfluss des Messgerätes abgeschätzt werden.

Es wurden verschiedene Proben als Demonstratoren ausgewählt. Als Beispiel für ein Oberflächennormal wurde ein Halle-Raunormal vom Typ KNT 4058-01 Stufe 2 gewählt (Probe 1). Weiterhin kommen ein Rubert-Vergleichsnormal (Probe 2) als Beispiel für eine geschliffene Oberfläche und Proben von Zylinderlaufbahnen als Beispiele für eine plateauartige Oberfläche (Probe 3) und eine Oberfläche mit Porenstrukturen (Probe 4) zum Einsatz. Die Proben wurden so ausgewählt, dass die Kenngrößen R_a und R_z etwa in einer Größenordnung liegen.

Für die Untersuchungen von R_z kam eine weitere plateauartige Zylinderlaufbahn zum Einsatz (Probe 5). Diese Probe wurde ausgewählt, da auf ihr längere Messungen und damit detailliertere Auswertungen über längere Messstrecken möglich waren.

2. ZUFÄLLIGE STRUKTUREN TECHNISCHER OBERFLÄCHEN

Technische Oberflächen weisen oft zufällige Strukturen auf. Diese Strukturen entstehen in Abhängigkeit vom jeweiligen Bearbeitungsverfahren. Dabei führen beispielsweise spanende Bearbeitungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide zu einem zufälligen Charakter der Oberfläche (z. B. Schleifen, Honen). Dieser Charakter der Oberfläche führt dazu, dass sich taktil gemessene Profile innerhalb weniger Mikrometer stark unterscheiden können. Dies führt dann zu einer Streuung von Rauheitskennwerten. In Abb. 2 ist dieses Verhalten anhand der vorgestellten Proben dargestellt. Die dargestellten Topographien (Abb. 2 a)) sind die nebeneinander dargestellten, taktilen Messungen nach dem Messstellenplan aus Abb. 1 c). Die Abbildungen dienen hier zur Einschätzung der Oberflächenstruktur, daher wurde auf eine

Darstellung der Höhenachse verzichtet. Die Skalierung der verschiedenen Oberflächen ist unterschiedlich.

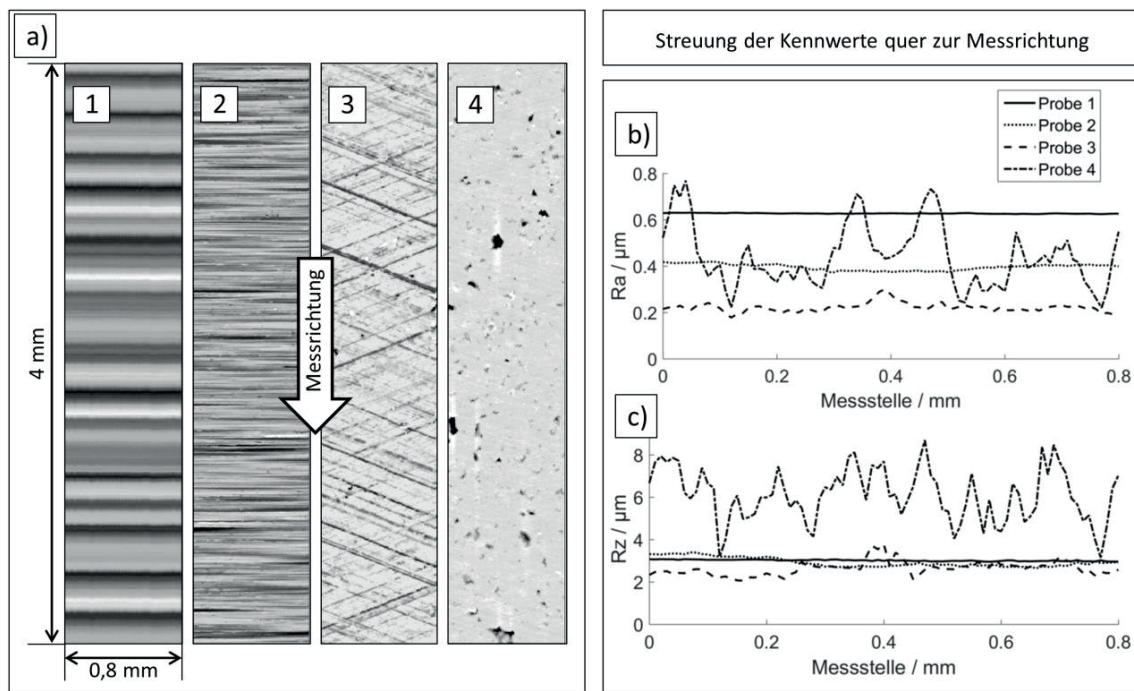


Abb. 2: Auswirkung verschiedener Oberflächentypen auf die Streuung von Rauheitskennwerten. a) taktile gemessene Topographien der Proben 1 bis 4, b) Veränderung von Ra quer zur Messrichtung, c) Veränderung von Rz quer zur Messrichtung

Zur Herstellung von Probe 1 (Raunormal Stufe 2) wird ein präzises Schleifverfahren eingesetzt, daher ist diese erwartungsgemäß quer zur Messrichtung am gleichmäßigsten ausgeprägt. Der Oberflächencharakter auf Probe 2 ist ähnlich, aber die Schleifriefen sind deutlich ungleichmäßiger. Bei Probe 3 kommt eine zusätzliche Veränderung durch die charakteristische Kreuzstruktur des Honprozesses hinzu und bei Probe 4 ist die Oberfläche durch die Porenstruktur am ungleichmäßigsten. Dies wirkt sich auf die Rauheitskennwerte aus. Anhand der beiden Beispielen Ra (Abb. 2 b)) und Rz (Abb. 2 c)) nach [4287, 2010] sind diese Auswirkungen dargestellt. Dabei sind die jeweiligen Kennwerte von allen parallel gemessenen Tastschnitten aufgetragen. Der Abstand zwischen zwei Tastschnitten beträgt wie in Abb. 1 c) dargestellt 10 μm. Die Ergebnisse der verschiedenen Proben unterscheiden sich deutlich. Abhängig vom Oberflächencharakter ändert sich der Kennwert quer zur Messrichtung. Von Probe 1 hin zu Probe 4 steigt die Streuung um Größenordnungen an. Hier im Beispiel ist zu erkennen, dass sie auf technischen Oberflächen im Vergleich zu Raunormalen deutlich erhöht ist.

3. EINFLUSS DES MESSSTELLENPLANS

Wenn in der Praxis Rauheitsmessungen durchgeführt werden, sollte immer nach einem Messstellenplan vorgegangen werden. So können Messungen auf verschiedenen Proben oder Messgeräten miteinander verglichen werden. Der

Messstellenplan sollte so gewählt werden, dass die entscheidenden Eigenschaften der Probe abgebildet werden. Um den Einfluss der Wahl des Messstellenplans zu demonstrieren, wurden auf den vorgestellten Proben Messungen nach verschiedenen Messstellenplänen für die vier Rauheitskenngrößen R_a , R_q , R_z [4287, 2010] und R_k [13565-2, 1998] durchgeführt und miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. In den Diagrammen ist jeweils die Standardabweichung für eine Kenngröße auf den verschiedenen Proben als Balkendiagramm dargestellt.

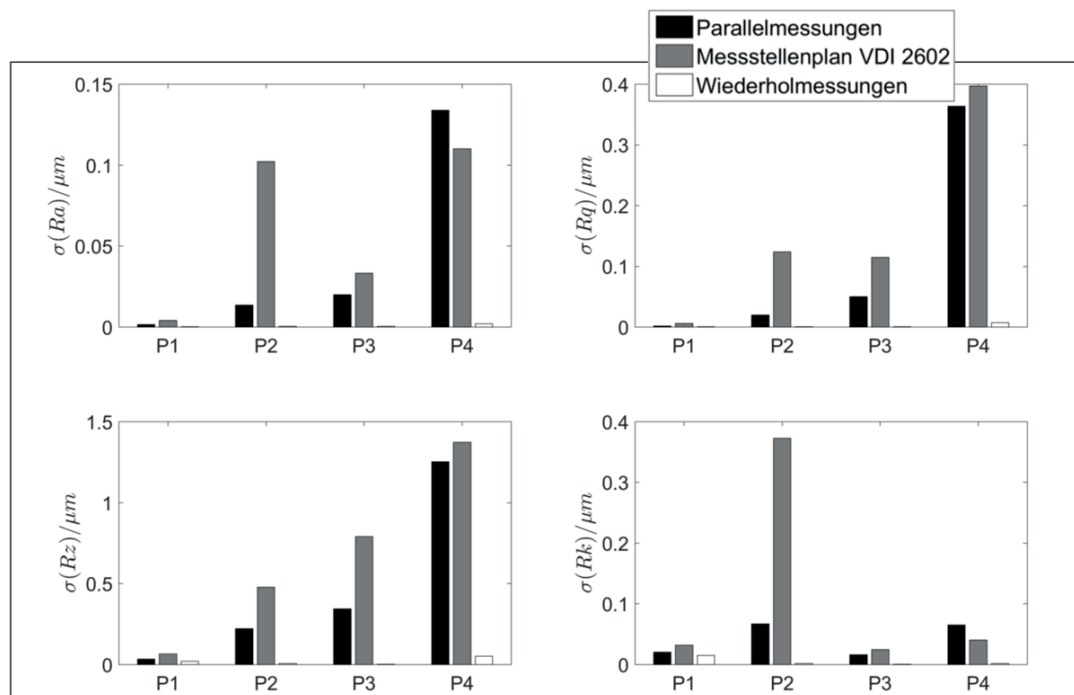


Abb. 3: Vergleich verschiedener Messstellenpläne, Darstellung der Standardabweichung ausgewählter Rauheitskennwerte (R_a , R_q , R_z und R_k)

Zunächst ist festzustellen, dass die Standardabweichungen auf Probe 1 für alle Kenngrößen und Messstellenpläne gering sind. Das Normal ist quer zur Messrichtung sehr gleichmäßig, daher ist die Standardabweichung bei den Parallelmessungen sehr gering. Weiterhin wiederholt sich das Profil des Normals alle 4 mm, so dass auch bei in Messrichtung verschobenen Profilen nur geringe Unterschiede in den Kenngrößen auftreten. Daher ist auch die Standardabweichung bei Messungen nach dem Messstellenplan nach [2602, 2014] über alle Kenngrößen nur leicht erhöht. Dies entspricht den Erwartungen und ist essentiell für die Nutzbarkeit des Normals.

Generell ist festzustellen, dass die Abweichungen beim Messstellenplan nach [2602, 2014] über alle Kenngrößen und Proben am höchsten sind. Das liegt daran, dass der Messstellenplan nach [2602, 2014] Unterschiede der Oberfläche in Messrichtung und parallel dazu berücksichtigt. Im Vergleich zum hier gewählten Messstellenplan für Parallelmessungen deckt er auch einen breiteren Bereich der Oberfläche ab. Die einzige Ausnahme bildet hier Probe 4 bei den Kenngrößen R_a und R_k . Dort verändert sich die Oberfläche aufgrund

der Porenstruktur bereits innerhalb weniger μm stark, dies wird durch die Parallelmessungen mit geringem Abstand deutlicher herausgestellt.

Bei den Wiederholmessungen ist die Streuung am geringsten. Daran ist abzulesen, dass der Einfluss des Messgeräts im Vergleich zur Statistik der Oberfläche gering ist. Bei etwaigen Positionierungsungenauigkeiten sind aber auch hier größere Unterschiede bei ungleichmäßigeren Oberflächen zu erwarten.

Werden die verschiedenen Kenngrößen einzeln betrachtet, so ist festzustellen, dass R_a , R_q und R_z auf Probe 4 am stärksten streuen. R_k dagegen zeigt auf Probe 2 die größten Abweichungen. Das liegt daran, dass die ersten drei Kenngrößen von der ungleichmäßigen Porenverteilung auf Probe 4 stark beeinflusst werden. Der Anteil der Kernrauheit R_k ist aber vergleichsweise klein und gleichmäßig ausgeprägt. Auf Probe 2 dagegen ist der Anteil der Kernrauheit größer als auf den beiden anderen technischen Oberflächen und ändert sich durch die ungleichmäßigen Schleifriefen stark. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Streuung von Rauheitskennwerten auf technischen Oberflächen erwartungsgemäß deutlich höher als auf Normalen ist. Welche Kennwerte wie stark streuen, ist wiederum vom Fertigungsverfahren abhängig.

4. MESSBEDINGUNGEN – EINFLUSS DER EINZELMESSSTRECKEN

Im Unterschied zu Kenngrößen wie R_a , R_q oder bspw. R_k wird R_z durch die Anzahl und Länge der Einzelmessstrecken beeinflusst. Einzelmessstrecken kommen bei den anderen Kenngrößen nicht vor. Bleibt die Länge der Einzelmessstrecken gleich, so sinkt die Standardabweichung von R_{zk} (dabei ist k die Anzahl der Einzelmessstrecken) mit $1/\sqrt{k}$ (Wurzel-N-Gesetz). Dies ergibt sich durch die Mittelwertbildung. Ändert sich die Länge der Einzelmessstrecken, so ist der Einfluss komplexer [Seewig, 2013]. Die Standardabweichung von R_{zk} ist dann von der Verteilungsdichte der untersuchten Oberfläche abhängig und mathematisch nicht geschlossen darstellbar. Daher soll der Einfluss der Anzahl an Einzelmessstrecken sowie deren Länge anhand eines praktischen Beispiels vorgestellt werden.

Dazu wurden drei Proben ausgewählt, Probe 3 und 4 wurden bereits vorgestellt. Zusätzlich wird eine weitere gehonte Zylinderlaufbahn untersucht. Die Probe ermöglicht längere Messungen und damit detailliertere Untersuchungen. In Abb. 4 ist dazu die Messstrategie dargestellt. Die Proben (a)) werden nach dem in (b)) dargestellten Messstellenplan gemessen. Die Messstrecke wird so lang gewählt, dass die komplette Länge der Probe abgedeckt wird. Es werden Parallelmessungen im Abstand von $dy = 0,5 \text{ mm}$ durchgeführt. Dabei werden so viele Tastschnitte gemessen, sodass die komplette Breite der Probe abgedeckt wird. Die einzelnen Profile werden gefiltert und für die Auswertung in mehrere kürzere Profile aufgeteilt. Dabei wird R_{zk} für $k = 1, \dots, 25$ Einzelmessstrecken berechnet. Diese Auswertung erfolgt für Einzelmessstrecken der Längen $l_e = 0,8 \text{ mm}$ und $l_e = 2,5 \text{ mm}$. Ein kompletter Ablaufplan ist in (c)) dargestellt.

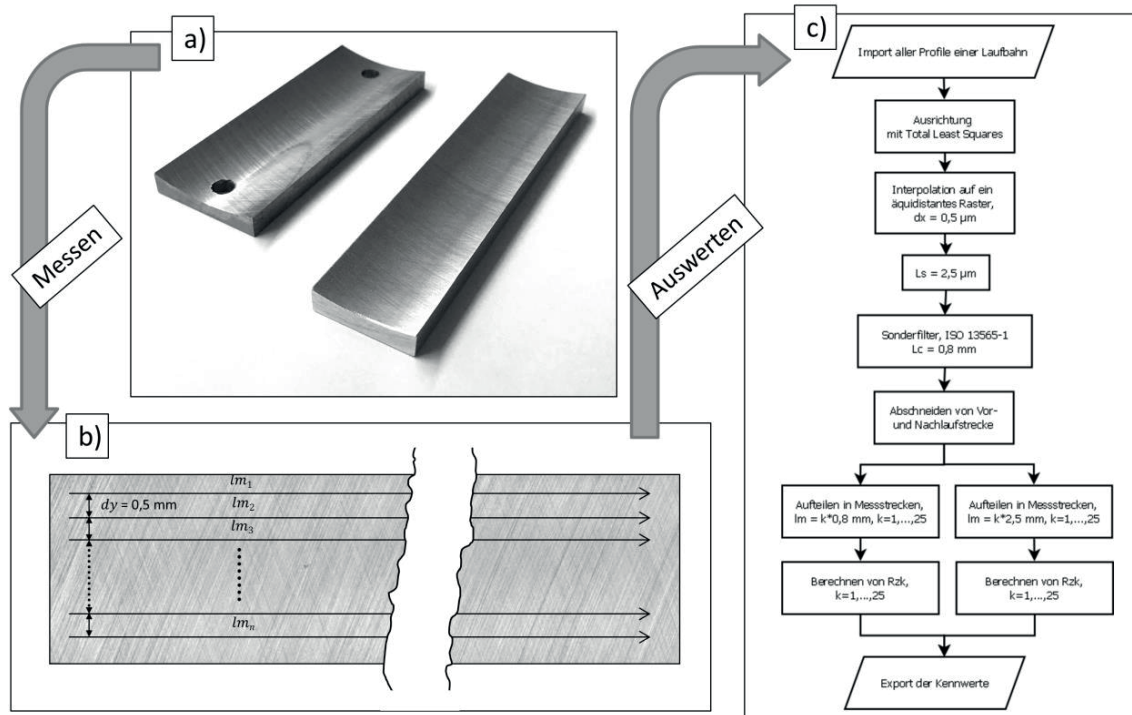


Abb. 4: Messstrategie zur Untersuchung von Rz. a) Proben 3 und 4, b) Messstellenplan, c) Ablaufdiagramm zur Auswertung

Es erfolgt für jedes k eine getrennte Auswertung. Das bedeutet, bspw. für die Länge der Einzelmessstrecken $l_e = 0,8$ mm werden für $k=1$ alle langen Profile in Einzelprofile der Länge $l_e = 0,8$ mm aufgeteilt. Auf diesen Profilen wird dann Rz_1 ausgewertet. Für eine Beispielprobe mit einer Länge der gefilterten Messstrecke à 40 mm und 25 parallel gemessene Profile ergeben sich dann $40 / 0,8 \cdot 25 = 1250$ Einzelprofile und auch 1250 Werte für Rz_1 . Wird $k=5$ gewählt, so ergeben sich $40 / (5 \cdot 0,8) \cdot 25 = 250$ Einzelprofile der Länge 4 mm, auf denen Rz_5 ausgewertet wird (also Rz mit 5 Einzelmessstrecken). Das Vorgehen ist beispielhaft für $k=1$, $k=5$ und $k=25$ in Abb. 5 dargestellt.

Auf dieser Basis kann das Verhalten von Rz für die vorgestellten Einflüsse analysiert werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt. Dabei sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung aller auf der jeweiligen Probe ausgewerteten Werte für Rz_k dargestellt. Wie zu erwarten ist, hängt der Mittelwert für Rz_k nur von der Länge der Einzelmessstrecke ab. Dass der Mittelwert mit der Länge der Einzelmessstrecke ansteigt, deckt sich mit den theoretischen Ergebnissen aus [Seewig, 2013]. Je länger die Einzelmessstrecke, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit dass innerhalb der Einzelmessstrecke eine große Spitze oder ein tiefes Tal auftritt. Diese Wahrscheinlichkeit drückt sich in der Erhöhung des Kennwerts aus.

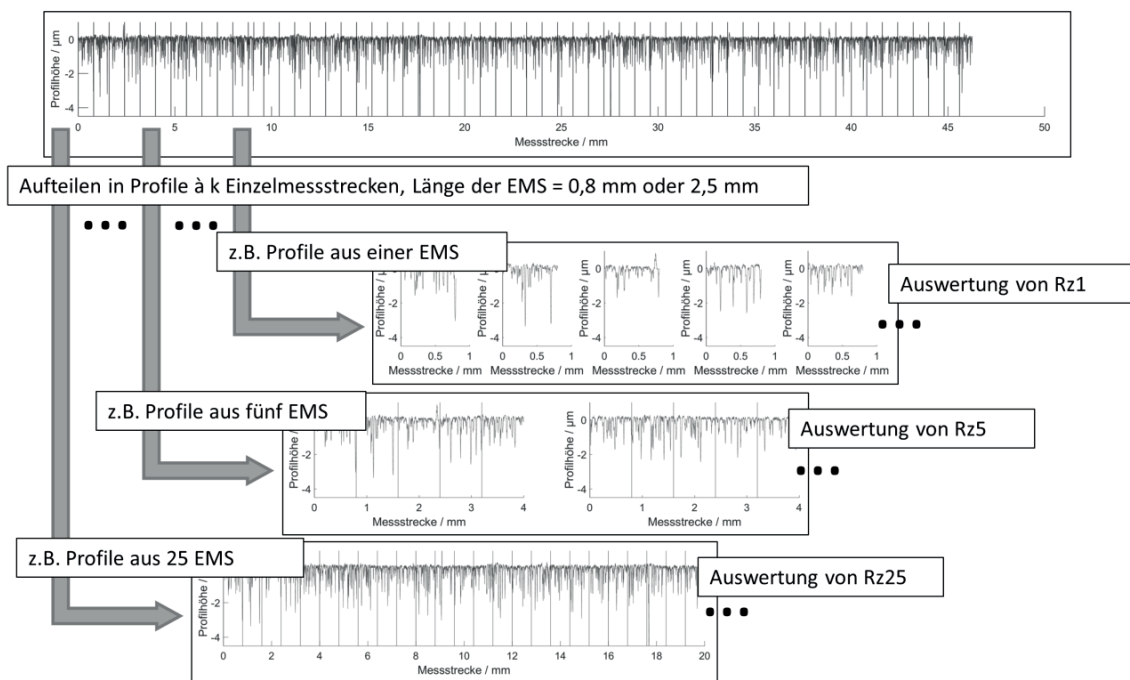


Abb. 5: Vorgehensweise zur Untersuchung der Anzahl der Einzelmessstrecken auf Rz. Beispielhaft: Auswertung mit einer, fünf und 25 Einzelmessstrecken

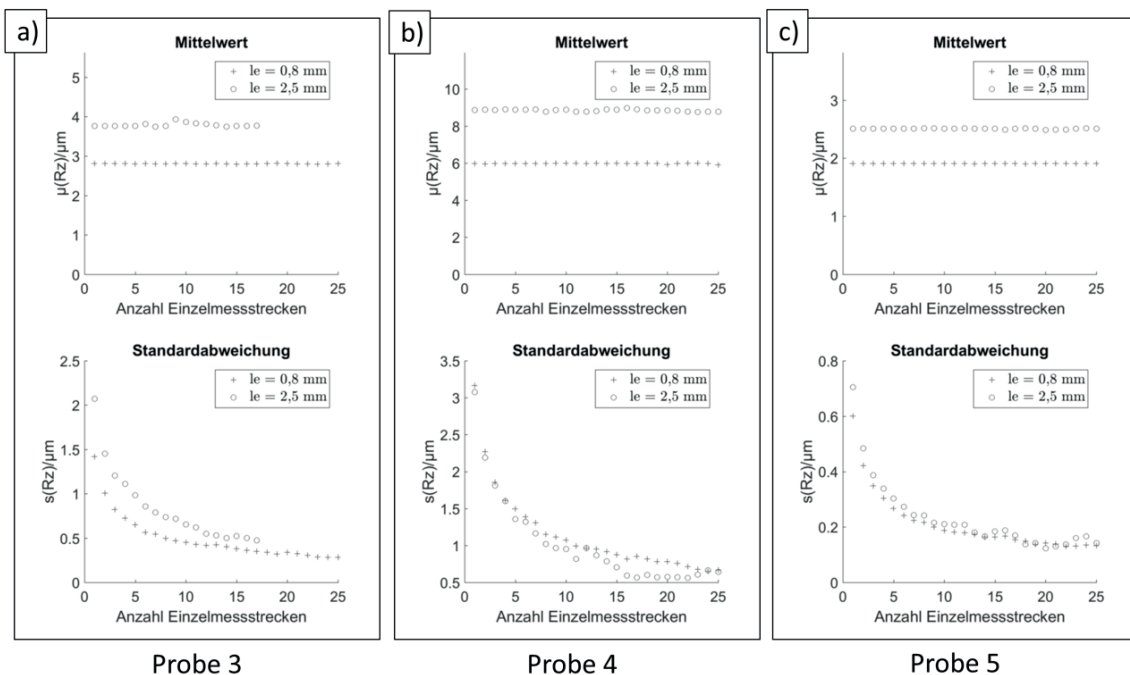


Abb. 6: Einfluss der Anzahl der Einzelmessstrecken auf das Verhalten von Rz. Untersuchung für $l_e = 0,8 \text{ mm}$ und $l_e = 2,5 \text{ mm}$

Weiterhin ist festzustellen, dass die Standardabweichung von R_z für die beiden untersuchten Längen der Einzelmessstrecken $0,8 \text{ mm}$ und $2,5 \text{ mm}$ jeweils in der gleichen Größenordnung liegt. Das bedeutet, dass die Unsicherheit für eine längere Einzelmessstrecke vergleichsweise hoch ist. Bei

der gleichen Anzahl an Einzelmessstrecken ist die Länge der Gesamtmessstrecke um den Faktor $2,5 / 0,8 = 3,125$ größer.

Die Kenngröße R_z verhält sich also nicht, wie es intuitiv zu erwarten wäre: Eine Verlängerung der Einzelmessstrecke führt nicht zu einer kleineren Streuung. Ist die Streuung für die Anwendung zu hoch, so kann dem durch eine höhere Anzahl an Einzelmessstrecken begegnet werden. Diese Effekte müssen in die Wahl der Messbedingungen mit einbezogen werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Der Einfluss der zufälligen Struktur von technischen Oberflächen wurde anhand praxisnaher Messungen untersucht. Dabei wurde zunächst der Einfluss verschiedener Messstellenpläne beleuchtet. In der Praxis muss der Messstellenplan auf die konkrete Messaufgabe angepasst werden. Ein großflächiger Messstellenplan wie der nach [2602, 2014] berücksichtigt auch Veränderungen der Oberflächenstruktur in Messrichtung, während Messungen über kleinere Felder feinere Details untersuchen können. Es ist wichtig genau zu definieren, welche Teile der Oberfläche für die Anwendung von Interesse sind. Darauf basierend muss die Wahl der Messstellen erfolgen. Die im Vergleich zu Normalen hohe Streuung der Kenngrößen auf technischen Oberflächen ist kein Mangel des Messgeräts und sagt auch nichts über etwaige Mängel der Oberfläche aus.

Im zweiten Abschnitt wurde ein weiterer Aspekt der Wahl der Messbedingungen betrachtet. Bei R_z bedeutet eine Erhöhung der Anzahl an Einzelmessstrecken immer eine Erhöhung der statistischen Sicherheit. Bei einer Verlängerung der Einzelmessstrecken dagegen bleibt die Standardabweichung bei gleicher Anzahl an Messstrecken im Beispiel etwa gleich. Dieses besondere Verhalten von R_z muss bei der Wahl der Messbedingungen berücksichtigt werden.

Zusammenfassend gilt, dass die Statistik der Oberfläche in Kombination mit der Wahl der Messbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf die statistische Sicherheit der Rauheitskennwerte hat. Die Einstellung dieser Faktoren muss bei der Tolerierung von Oberflächenmerkmalen berücksichtigt werden und ggf. angepasst werden. Auf Anwenderseite muss ein Bewusstsein für die statistischen Eigenschaften von Rauheitskennwerten auf technischen Oberflächen geschaffen werden. Besonders auf Oberflächen mit stark zufälligem Charakter ist die Aussagekraft einzelner Tastschnitte gering, Kennwerte können sich innerhalb weniger μm deutlich unterscheiden.

Am Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik sind in Zusammenarbeit mit dem „Arbeitskreis 3D-Rauheitsmesstechnik“ der deutschen Automobilindustrie und dem FB 5.1 der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig tiefergehende Untersuchungen in Arbeit. Dazu zählt unter anderem die in [Rief, 2016] vorgestellte Datenbank mit Messdaten von Zylinderlaufbahnen. Die vorliegenden Ergebnisse können nur einen kleinen Ausschnitt darstellen.

6. QUELLEN

- [2602, 2014] VDI 2602 Blatt 4: Oberflächenprüfung – Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten – Kalibrierung, Messunsicherheit. Beuth-Verlag, Berlin, September 2014.
- [4287, 2010] DIN EN ISO 4287:2010-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth-Verlag, Berlin, Juli 2010.
- [13565-1, 1998] DIN EN ISO 13565-1:1998-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen. Beuth-Verlag, Berlin, April 1998.
- [13565-2, 1998] DIN EN ISO 13565-2:1998-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve. Beuth-Verlag, Berlin, April 1998.
- [16610-21, 2013] DIN EN ISO 16610-21:2013-06: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter. Beuth-Verlag, Berlin, Juni 2013.
- [Manske, 2013] Manske, E.: Anwendungsbezogene Auswahl physikalischer Messprinzipien für die Mikro- und Nanotechnik, Konferenzbeitrag: „Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2013“, Nürtingen, 23.-24. Oktober 2013, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 131-140.
- [Rief, 2016] Rief, S., Seewig, J.: Unsicherheit von Rauheitskennwerten in der Praxis. wt Werkstattstechnik online, Veröffentlichung voraussichtlich Ausgabe 11/12 2016.
- [Seewig, 2013] Seewig, J.: The Uncertainty of Roughness Parameters, Konferenzbeitrag: „AMA Conferences 2013“, Nürnberg, 14.-16. Mai 2013, DOI: 10.5162/sensor2013/B6.2.

EIGNUNGSPRÜFUNG KONFOKALER SENSOREN ZUR RAUHEITSMESSUNG

Florian Schwarzer¹, Dr. Raimund Volk²

¹ Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH, Grundlagenentwicklung,
florian.schwarzer@jenoptik.com

² Jenoptik Industrial Metrology Germany GmbH, Grundlagenentwicklung,
raimund.volk@jenoptik.com

Abstract: Zur Charakterisierung von Oberflächenrauheiten werden häufig Tastschnittgeräte eingesetzt. Im Vergleich zu optischen Sensoren sind sie jedoch langsam und berühren die zu messende Oberfläche. Bei einigen Anwendungen sind daher optische Sensoren attraktiver, insbesondere wenn es um berührungsloses Messen oder hohe Messgeschwindigkeiten geht. Bei der Evaluierung optischer Sensoren zeigt sich jedoch oft, dass sie für die Messung von Rauheitskenngrößen ungeeignet sind, weil das Messprofil von Artefakten überlagert ist. Es wurde nun eine Software entwickelt, mit der ausgehend von einem taktil gemessenen Referenzprofil auf die Anwendbarkeit von konfokalen Sensoren geschlossen werden kann. Im Falle einer Nichtanwendbarkeit kann so auf die Anschaffung teurer Sensorik für Testzwecke verzichtet werden. Grundlage des Verfahrens ist u. a. ein Modell für konfokale Sensoren, welches im Rahmen des Förderprojektes OptAssyst entwickelt wurde.

KEYWORDS: RAUHEIT, KONFOKALE SENSOREN, EIGNUNGSTEST, SIMULATION

1. MOTIVATION

Zur Charakterisierung von Oberflächenrauigkeiten werden i. d. R. taktile Taster eingesetzt. Im Vergleich zu optischen Sensoren sind sie jedoch langsam und berühren die zu messende Oberfläche. Bei einigen Anwendungen sind daher optische Sensoren attraktiv, insbesondere wenn es um berührungsloses Messen oder hohe Messgeschwindigkeiten (z. B. bei Topografien) geht.

Bei der Evaluierung optischer Sensoren zeigt sich jedoch oft, dass sie für die Messung von Rauheitskenngrößen ungeeignet sind, weil das Messprofil von Artefakten überlagert ist.

Es wurde nun eine Software entwickelt, mit der ausgehend von einem taktil gemessenen Referenzprofil auf die Anwendbarkeit von konfokalen Sensoren geschlossen werden kann. Im Falle einer Nichtanwendbarkeit kann so auf die Anschaffung teurer Sensorik für Testzwecke verzichtet werden.

Grundlage des Verfahrens ist u. a. ein Modell für konfokale Sensoren [Mauch, 2012], [Mauch, 2013], welches im Rahmen des Förderprojektes OptAssyst am ITO Stuttgart entwickelt wurde.

2. MODELLBILDUNG

2.1 Unsicherheit des Höhenmesswertes konfokaler Sensoren

Aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Lichtes sind Messergebnisse konfokaler Sensoren nur bedingt mit denen taktiler Sensoren vergleichbar. Die Systematik der Abweichungen wurde u. a. in [Mauch 2012] untersucht. Mit einem aufwendigen Modell und viel Rechenzeit lassen sich so die Messergebnisse konfokaler Sensoren für ein taktil gemessenes Referenzprofil näherungsweise vorhersagen.

Da aufwendige Simulationen i. d. R. nicht praktikabel sind, eignet sich eine worst case Abschätzung der Messunsicherheit besser, um mit geringem Aufwand eine Aussage über die Eignung eines konfokalen Sensors für eine Rauheitsmessaufgabe zu treffen.

Die Unsicherheit des Höhenmesswertes von konfokalen Sensoren kann nach [Mauch, 2013] in Abhängigkeit von der lokalen Krümmung $\kappa_{surf}(x)$ der Oberfläche wie folgt modelliert werden:

$$\sigma_z(x) \cong \frac{1}{2} \cdot \frac{z_R}{\kappa_{max}} \cdot \kappa_{surf}(x) \quad (1)$$

Die Parameter der Objektivlinse z_R und κ_{max} begrenzen den Bereich, in dem die Unsicherheit σ_z proportional zur lokalen Krümmung $\kappa_{surf}(x)$ der Oberfläche ansteigt [Mauch, 2013]. Jeder einzelne Messpunkt unterliegt zudem einem Reproduzierbarkeitsrauschen welches typischerweise ein zehntausendstel ($k = 10^{-4}$) des Messbereiches (MB) beträgt.

$$\sigma_R = k \cdot MB \quad (2)$$

2.2 Bestimmung der lokalen Profilkrümmung

Aufgrund der begrenzten Fokussierbarkeit optischer Sensoren ist der Spotdurchmesser i. d. R. mehrere Mikrometer breit. Innerhalb dieses Lichtfleckes fließen die lokalen Höhen der Oberfläche zu einem gewissen Teil in das Höhenmesssignal des konfokalen Sensors ein. Der Spotdurchmesser wird typischerweise durch die Halbwertsbreite der lokalen Intensität (FWHM) bestimmt. Bei Annahme einer Normalverteilung der Intensität lässt sich ein Bereich $\pm 3\sigma$ mit

$$FWHM \cong 2,3548 \cdot \sigma \quad (3)$$

berechnen, in dem 99,73% der durch den Lichtfleck in Messrichtung abgedeckten Punkte enthalten sind.

Zunächst werden die Messpunkte x in der näheren Umgebung ($\pm 3\sigma$) eines jeden Messpunktes x_i nach Gleichung 4 gewichtet.

$$w(x_i) = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_i}{\sigma}\right)^2} dx \quad (4)$$

Für die $\pm 3\sigma$ -Umgebung wird dann eine Regressionsgerade durch die gewichteten Punkte berechnet, deren Steigung die lokale Steigung des Profils an der Stelle x_i ist. Das lokale Krümmungsprofil wird durch weitere Differentiation des lokalen Steigungsprofils in der $\pm 3\sigma$ -Umgebung, aber ohne weitere Wichtung berechnet.

2.3 Eignungsprüfung konfokaler Sensoren für die Rauheitsmessung

In der Praxis reicht die Kenntnis der lokalen Unsicherheit eines Profilmesswertes i. d. R. nicht aus, um die Eignung eines konfokalen Sensors für Rauheitsmessungen zu beurteilen.

Daher wurde eine Software (Abbildung 1) entwickelt, mit der die gängigen Prozessfähigkeitsverhältnisse C_g und C_{gk} für konkrete Rauheitskenngrößen simuliert werden können, wenn ein bisher taktil gemessenes Oberflächenprofil mit einem konfokalen Sensor gemessen werden soll.



Abb. 1: Simulationssoftware für die Eignungsprüfung

Dazu werden alle Messpunkte eines taktil gemessenen Referenzprofils in Abhängigkeit von der Unsicherheit des Höhenmesswertes nach Gleichung (1) und dem Reproduzierbarkeitsrauschen (Gleichung 2) variiert. Die Punkte werden dabei innerhalb des Intervalls $[z(x) - \sigma_z(x) - \sigma_R, z(x) + \sigma_z(x) + \sigma_R]$ als gleichverteilt angenommen.

Nach n (einstellbar, Standard $n = 12$) Simulationen werden Mittelwert und Standardabweichung für jede Rauheitskenngröße berechnet. Mit einer vorgegebenen Zieltoleranz (einstellbar, Standard 5% vom taktilen Referenzwert) können nun die Prozessfähigkeitsverhältnisse bestimmt werden.

3. EIGNUNGSPRÜFUNG AM BEISPIEL

Für den Nachweis der Plausibilität der Simulation wurden 2 gängige Raunormale (RNDX2 und PTB1, entsprechend Iso-Typ D [5436-1, 2000]) sowohl mit einem taktilen als auch mit einem chromatisch-konfokalen Sensor (4 μm Spotdurchmesser, NA = 0,5, Messbereich 1200 μm) gemessen und die Werte für die Kenngrößen R_a , R_z [4287, 2010] sowie R_{max} [4768, 1990] mit der Simulation verglichen.

3.1 RNDX2-Normal

Das RNDX2-Normal weist eine hartstoffbeschichtete, sinusförmige und damit symmetrische Oberfläche mit einem Spitze-Spitze-Wert von ca. 3,35 μm auf. Auf dem langwelligigen Sinus (Wellenlänge ca. 100 μm) ist zudem ein höherfrequenter Sinus (Wellenlänge ca. 4 μm) aufgeprägt. In Abbildung 2 sind die Messprofile und in Tabelle 1 die Messergebnisse der taktilen Messung, der Messung mit dem konfokalen Sensor sowie der Simulation gegenüber gestellt.

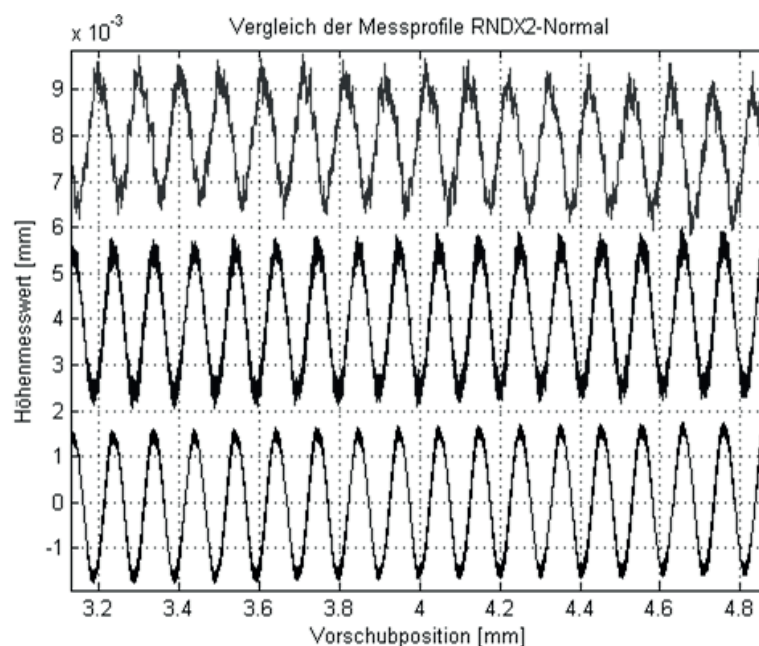


Abb. 2: Vergleich der Messprofile am RNDX2-Normal, oben: Messung mit konfokalem Sensor, mitte: simulierte Messung mit konfokalem Sensor, unten: taktile Referenzmessung

Die Messergebnisse (Tabelle 1) des optisch gemessenen und simulierten Profils stimmen recht gut überein. Lediglich der mittelwertsbetonte Parameter R_a weicht beim gemessenen Profil systematisch ab. Dieser systematische

Fehler ist in der derzeitigen Simulation aber nicht implementiert, weshalb Aussagen zur Genauigkeit (Cgk) nicht sinnvoll sind.

Das optisch gemessene und simulierte Profil weisen insbesondere in den Bereichen starker Krümmung (hier im Bereich der Spitzen) einen hohen Rauschanteil auf (vgl. Gleichung 1), was dazu führt, dass spitzenbetonte Rauheitskenngrößen systematisch von den taktilen Referenzwerten abweichen. Diese Kenngrößen können im Falle des RNDX2-Normals wiederholbar ($Cg > 1$), aber nicht akkurat ($Cgk \ll Cg$) gemessen werden.

<i>Kenngröße</i>	<i>R_{max} [μm]</i>	<i>R_z [μm]</i>	<i>R_a [μm]</i>
<i>Werte taktil gemessenes Profil</i>	3,35	3,36	1,00
<i>Werte optisch gemessenes Profil</i>	3,80	3,71	0,83
<i>Werte simuliertes „optisches“ Profil</i>	3,83	3,75	1,00
<i>Standardabweichung Simulation (n = 12)</i>	0,04	0,02	0,001
<i>C_g</i>	3,14	6,40	51,92
<i>C_{gk}</i>	-5,38	-8,92	51,25

Tab. 1: Vergleich der Messergebnisse und Prozessfähigkeitsverhältnisse RNDX2

3.2 PTB1-Normal

Das von der PTB kalibrierte Raunormal KNT 4058/1 Stufe 1 der HALLE Präzisions - Kalibriernormale GmbH (im Firmenjargon „PTB1“ genannt) weist eine feine ($R_z = 1,5 \mu\text{m}$), unregelmäßige und lokal stark gekrümmte Struktur auf. Aus diesem Grund ist das optisch gemessene Profil stark verrauscht. Das simulierte Profil weist ein ähnliches Rauschen auf (siehe Abbildung 3).

Die in Tabelle 2 gegenübergestellten Messergebnisse korrelieren sehr gut. Die Werte für die spitzenbetonten Kenngrößen R_z und R_{max} weichen aufgrund des Rauschens stark von dem taktil gemessenen Referenzwert ab. Im Gegensatz zum RNDX2-Normal sind sie aber zusätzlich nicht ausreichend wiederholbar ($Cg < 1$). Lediglich die Kenngröße R_a ist wiederholbar ($Cg > 1$) messfähig.

Die systematische Abweichung des gemessenen Profils wird wie oben beschrieben aber nicht durch die Simulation abgebildet.

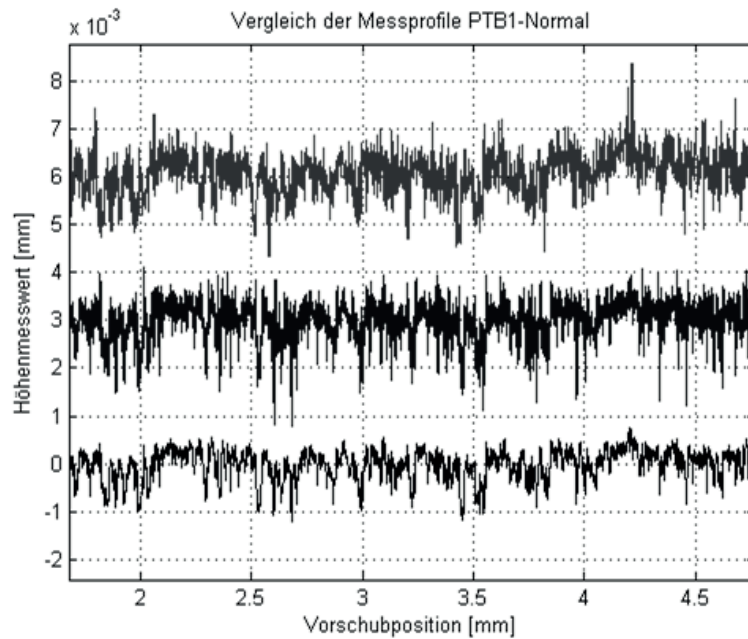


Abb. 3: Vergleich der Messprofile am PTB1-Normal, oben: Messung mit konfokalem Sensor, mitte: simulierte Messung mit konfokalem Sensor, unten: taktile Referenzmessung

Kenngröße	R_{max} [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]
Werte taktil gemessenes Profil	1,73	1,49	0,21
Werte optisch gemessenes Profil	3,05	2,59	0,29
Werte simuliertes „optisches“ Profil	3,19	2,62	0,23
Standardabweichung Simulation ($n = 12$)	0,14	0,06	0,001
C_g	0,46	0,92	10,68
C_{gk}	-7,32	-12,96	-7,07

Tab. 2: Vergleich der Messergebnisse und Prozessfähigkeitsverhältnisse PTB1

4. ZUSAMMENFASSUNG

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Eignungsprüfung lässt sich die Messmittelfähigkeit konfokaler Sensoren für Rauheitskenngrößen abschätzen, wenn ein taktil gemessenes Referenzprofil vorliegt.

Aufgrund der vereinfachten Modellbildung (keine systematischen Fehler) können jedoch nur sinnvolle Aussagen zur Wiederholbarkeit (C_g), nicht aber zur Genauigkeit (C_{gk}) gemacht werden.

In den zwei vorgestellten Beispielen wurde gezeigt, dass konfokale Sensoren für die Rauheitsmessung feiner Strukturen (PTB1-Normal) eher ungeeignet, bei weniger feinen Strukturen (RNDX2-Normal) dagegen teilweise geeignet sind. Insbesondere Kenngrößen wie R_a , die nach dem arithmetischen Mittelwert berechnet werden, lassen sich wiederholbar messen.

5. QUELLEN

- [Mauch, 2012] Mauch, F. et al.: Object depending artifacts in confocal measurements. Proc. SPIE 8466:846609.
- [Mauch, 2013] Mauch, F. et al.: Object depending measurement uncertainty of confocal sensors. Fringe 2013, S. 465-470.
- [5436-1, 2000] DIN EN ISO 5436-1:2000: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Normale – Teil 1: Maßverkörperungen. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- [4287, 2010] DIN EN ISO 4287:2010: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth-Verlag, Berlin, 2010.
- [4768, 1990] DIN 4768:1990 (zurückgezogen): Ermittlung der Rauheitskenngrößen R_a , R_z , R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten. Beuth-Verlag, Berlin, 1990.

WARUM BRAUCHEN WIR IN DER OBERFLÄCHENMESSTECHNIK EINE NORM FÜR OBERFLÄCHENDEFEKTE AUF KALIBRIERNORMALEN?

Paul Rubert

Rubert + Co. Ltd., Cheadle SK8 2PG, UK, paul2@rubert.co.uk

Das Kalibrieren von Oberflächenmessgeräten benötigt Geometrienormale und Raunormale mit genormten geometrischen Eigenschaften (ISO 5436-1, ISO 25178-70). Auf den Normalen gibt es in der Praxis immer Defekte und Fehler, die das Messergebnis und seine Messunsicherheit beeinflussen. Zu deren Charakterisierung gibt es bisher keine Normen. Weder die Spezifizierung, was Defekte sind, noch die Methoden, wie sie zu behandeln sind, sind derzeit genormt. Derartige Verfahren werden jedoch in den Qualitätsnormen ISO 17025 bzw ISO 9001 immer wieder vorgeschrieben. Der Beitrag behandelt diesbezüglich folgende Themen: 1. Warum eine Norm für Defekte an Oberflächenkalibriernormalen nötig ist; 2. Entwurf zu einer solchen Norm; 3. Erläuterungen zur Anwendung dieser Norm in der Industrie und Messtechnik.

KEYWORDS: KALIBRIEREN, KALIBRIERNORMALE, DEFEKTE, MESSUNSICHERHEIT

1. EINLEITUNG UND HINTERGRUND

1.1 Die moderne Oberflächenmesstechnik

Die Entwicklung der Oberflächenmesstechnik hat in der letzten Zeit zwei deutliche Tendenzen gezeigt: Erstens eine ständig wachsende Auswahl von auf verschiedenen physikalischen Prinzipien beruhenden Messgeräten und zweitens die immer besser werdende Genauigkeit der Geräte überhaupt, die mit entsprechend kleineren Messunsicherheiten einhergeht. Aufgrund dieser beiden Tatsachen nimmt das Kalibrieren der Geräte eine immer wichtiger werdende Rolle ein, wie auch die dazu benötigten Maßverkörperungen, wie z. B. Kalibrier- und Einstellnormale.

Es muss an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass im Lichte der heutzutage in der Industrie und Messtechnik als fast unausweichbar erscheinenden Qualitätsnormen [9001, 2015], [17025, 2005], der Messtechniker sehr häufig unter Druck steht, die Einzelheiten seines Kalibrierverfahrens systematisch und genau zu definieren und niederzuschreiben.

1.2 Kalibriernormale im Gegensatz zu funktionellen Oberflächen

Ein Kalibriernormal ist ein physikalischer Gegenstand, dessen Oberfläche eine bestimmte und in der Regel sehr einfache, mathematische Form verkörpert:

z.B. eine Ebene, eine Stufe, eine Kugel, oder eine Sinuswelle. Eine solche Oberfläche dient ausschließlich dem einzigen Zweck, gelegentlich gemessen zu werden. Außer diesem Zweck gibt es aber weder eine physikalische Funktion, die von der Oberfläche erfüllt werden muss, noch eine physikalische Eigenschaft, die sie besitzen soll. Die Oberfläche des Normals soll mathematisch korrekt und perfekt sein, und das genügt. In dieser Hinsicht bilden Kalibriernormale eine spezielle Art von erzeugten Oberflächen, die die erwünschten geometrischen Eigenschaften ganz einfach und präzise festlegen sollen. Für die meisten industriellen Oberflächen (z. B. Einspritzdüsen, Bremsscheiben, Rohrkupplungen, Zahnräder, chirurgische Prothesen) ist dies nicht der Fall. Hier hat man im Voraus meist keine genaue Vorstellung davon, welche geometrischen Eigenschaften für die beabsichtigte Funktion der Oberfläche am besten geeignet sind. Vielmehr werden solche Eigenschaften von den Ergebnissen aus Versuchen und praktischer Erfahrung abgeleitet.

1.3 Oberflächendefekte und –fehler

1.3.1. Funktionelle Oberflächen

Aufgrund des ganz besonderen technischen Charakters einer jeden funktionellen Oberfläche ist es vorzuziehen, dass alle auf einer solchen Oberfläche zu erwartenden Defekte, Fehler oder Unvollkommenheiten von Sachverständigen und Experten auf den einzelnen Gebieten beschrieben und definiert (d. h. genormt) werden.

1.3.2. ISO 8785: Surface Imperfections: Terms, definitions, parameters

In dieser Norm wurde versucht, eine Vielzahl von Oberflächendefekten auf verschiedenen Oberflächen zu beschreiben [8785, 1999]. Dabei tauchen aber zwei Probleme auf:

1. Die Defekte werden abwechselnd in Bezug auf deren Ursache und deren geometrische Form definiert. Wie soll man einen Defekt charakterisieren, der die Form eines Typs hat, die Ursache aber eines anderen?
2. Wie bereits (1.3.1) erwähnt, werden Defekte auf spezialisierten funktionellen Oberflächen viel besser von Experten in den einzelnen Bereichen der Herstellungsverfahren beschrieben als von Messtechnikern.

Unter anderem aus diesen Gründen hat sich der für die Oberflächenmesstechnik zuständige Ausschuss ISO TC 213 / WG16 für den Entwurf einer neuen Norm entschlossen, in der Defekte auf Oberflächenkalibriernormalen behandelt werden sollen. Sie wird voraussichtlich als Teil 73 der Normenreihe ISO 25178 erscheinen.

Es folgen zwei Beispiele von Oberflächendefekten, die durch mechanische Beschädigung verursacht wurden. Abbildung 1 zeigt dabei ein defektes

Tiefeneinstellnormal und Abbildung 2 den Einfluss dieses Defektes auf das Messergebnis.

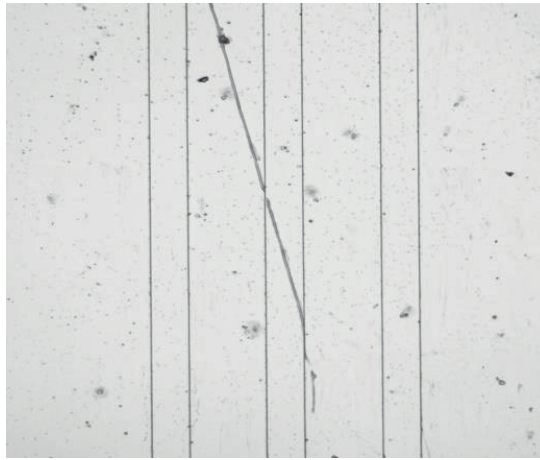


Abb. 1: schräger Kratzerschaden auf der mittleren Stufe eines Glasnormals mit 3 Stufen

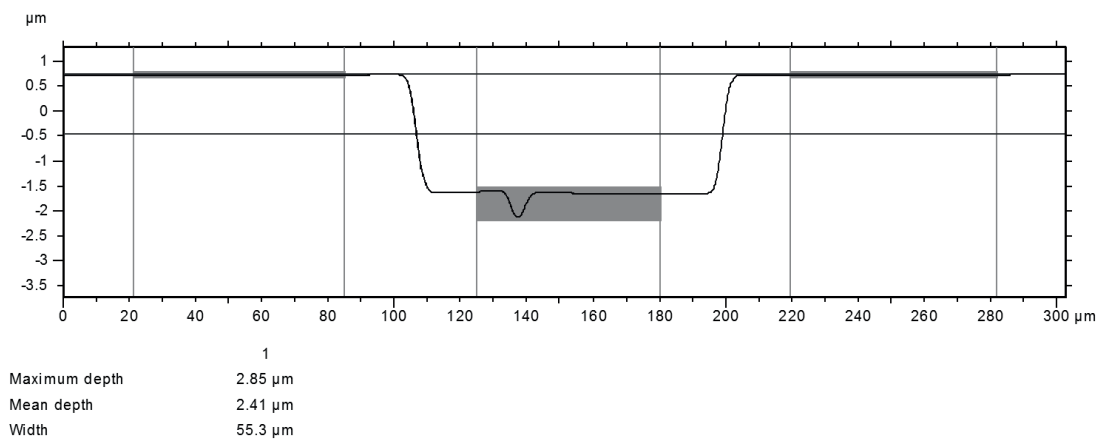


Abb. 2: Einfluss des Kratzers auf das Messergebnis

In Abbildung 3 wird eine weitgehend zerkratzte Oberfläche eines Sinus-Normals aus Nickel gezeigt.



Abb. 3: Normal mit sowohl beschädigten („guten“) als auch unbeschädigten („schlechten“) Stellen

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	mean	σ
Ra (nm)	good	507	508	509	509	505	507	508	506	506	506	507.1	1.36
Rz (nm)	area	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1600	1590	1600	1592	0.42
Ra (nm)	bad	536	508	511	513	503	492	458	514	518	507	506	20.3
Rz (nm)	area	2020	1710	1590	1880	1640	1680	1650	1850	1720	1730	1747	131

Tab.1: Messungen auf dem beschädigten Normal in Abb.3

Das zerkratzte Normal wurde an jeweils 10 Stellen im schlechten und im guten Bereich gemessen. Vergleicht man die entsprechenden Messergebnisse aus den beiden Bereichen hinsichtlich der Rz-Werte und der Messunsicherheit, wird deutlich, dass die Rauheitskenngrößen und deren Messunsicherheit durch das Vorhandensein von Oberflächendefekten stark beeinflusst werden.

1.4 Umgang mit Oberflächendefekten

Diese Frage muss unter Berücksichtigung der folgenden Zusammenhänge unbedingt beantwortet werden:

1. Wenn ein Betrieb (Messort) sein Kalibriernormal von einem Messlabor (Kalibrierort) zertifizieren lässt, ist es wichtig, dass die künftigen Messverfahren im Messort den genau gleichen Messstellenplan berücksichtigen wie am Kalibrierort. Ist das Normal an einer beliebigen zu messenden Stelle beschädigt, so muss im Kalibrierschein erklärt werden, auf welche Weise der Oberflächendefekt behandelt wurde, damit am Messort später ähnlich gemessen werden kann.
2. Beim Herstellen von Kalibriernormalen ist es wichtig, dass sich Hersteller und Kunde darüber einig sind, welche und wieviele Oberflächendefekte akzeptabel sind und welche nicht.
3. Bei der Festlegung von Mess-, bzw. Kalibrierverfahren ist es ebenfalls nötig zu verdeutlichen, wie Oberflächendefekte zu behandeln sind.

Die Bedeutung dieser letzten Bemerkung wird klar, wenn man sich die ISO-Normen im Bereich Oberflächenmesstechnik näher ansieht. Hier stellt sich ein etwas zweideutiges und unklares Bild dar. In den ersten zwei folgenden Abschnitten wird festgelegt, dass Oberflächendefekte im Allgemeinen nicht gemessen werden sollen, in den nächsten zwei Abschnitten wird aber genau das Gegenteil vorgeschrieben.

1.4.1. ISO-Normen - laut denen Defekte vermieden werden sollen

ISO 4288: Rules and Procedures for the assessment of surface texture: "6.1 Surface texture parameters are not useful for the description of surface defects. Therefore, surface defects, e.g. scratches and pores, shall **not be considered** during inspection of surface texture." [4288, 1996]

ISO 5436-1: surface texture - measurement standards - material measures – “ 8 Measurement standard certificate: “NOTE 2. Visible defects in the measuring window **should be avoided.**” [5436-1, 2000]

1.4.2. ISO-Normen - laut denen Defekte **nicht** vermieden werden sollen

ISO 12179: Surface texture - calibration of contact (stylus) instruments: “Annex A.2. (g) (calibration of motifs method instruments): Carry out five parallel measurements on each calibration measurement standard, **randomly distributed** in the width of the standard.” [12179, 2000]

ISO 4287:1997/Amd.1:2009(E) amendment 1: Peak count parameter - Page 3, clause 6.1 Replace the first two sentences with: “Surfaces most often contain local irregularities, ‘surface imperfections’ or ‘surface defects’. Such irregularities are to be considered to be part of the surface under inspection and **are not to be avoided** in measurement, if not otherwise stated in the technical requirements...” [4287:2009]

2. DIE ELEMENTE DER GEPLANTEN NORM

Es müssen unbedingt zwei Gruppen von Begriffen definiert werden: erstens die verschiedenen Klassen der Oberflächendefekte, mit der Definition eines Defektes selbst und zweitens der verschiedenen Vorgehensweisen, wie man auf das Auftreten von Defekten an einer Messfläche reagieren kann. Abgesehen von diesen Begriffen wird nichts vorgeschrieben, insbesondere werden die einzelnen definierten Vorgehensweisen weder vorgeschrieben noch verboten. Vielmehr ist es die Absicht, der Oberflächenmesstechnik eine Terminologie zur Verfügung zu stellen, durch die das Beschreiben von Defekten sowie das Formulieren von Messprotokollen und –verfahren, ermöglicht werden.

2.1 Klassifizierung der Defekts-Arten

Hier werden die verschiedenen Defekt-Arten vom Standpunkt des Messtechnikers aus definiert, jedoch wie bereits erwähnt, ohne jeglichen Bezug auf deren Ursache.

2.1.1. Defekt

Ein Defekt ist jede Abweichung der physikalischen Oberfläche des Normals (von der mathematisch gesehen idealen Geometrie) die größer ist als die hinsichtlich des Herstellungsverfahrens des Normals zu erwartende Geometrie. Beispielsweise werden scharfe Kanten „in Wirklichkeit“ immer etwas verrundet und selbst perfekte Glasplannormale sind immer etwas zerkratzt: Solche Abweichungen sollen, da sie unvermeidbar sind, nicht als Defekte angesehen werden.

2.1.2. *Wirksame Defekte*

Wirksame Defekte sind diejenigen Defekte, deren Abweichungen ausreichend groß sind, ein Messergebnis bzw. die Messunsicherheit unter bestimmten Messbedingungen zu beeinflussen. Ob eine gewisse Abweichung als Defekt zu betrachten ist, hängt von den voraussichtlichen Messbedingungen ab. Ein Defekt, der in einem Fall als wirksam erscheint, muss demnach in einem anderen Fall mit veränderten Messbedingungen als unwirksam betrachtet werden können.

2.1.3. *Sichtbare Defekte*

...sind diejenigen, welche mit bloßem Auge an einer Oberfläche erkennbar sind.

2.1.4. *Kosmetische Defekte*

...sind Defekte, die sichtbar und zugleich unwirksam sind.

2.1.5. *Gestalt-Defekte*

Dabei handelt es sich um kosmetische Defekte, die zwar mit bloßem Auge sichtbar sind, aber unter Vergrößerung (am Profil) oder anhand einer Oberflächendarstellung nicht erkennbar sind. Sie bestehen meistens aus einer Gruppe von unwirksamen Defekten, die als vereinzelt auftretende Merkmale unsichtbar sind, die aber aufgrund ihrer räumlichen Anordnung (Gruppierung) eine sichtbare Form oder Struktur ausbilden.

2.2 **Klassifizierung der Behandlungsmethoden**

2.2.1. *Den Defekt entfernen*

Man entfernt den Defekt, indem die defekten Teile der Oberfläche abgeschnitten oder die entsprechenden Datenpunkte in der Software weggelassen werden.

2.2.2. *Den Defekt vermeiden*

Die nutzbare Messfläche des Normals wird umdefiniert, sodass defekte Stellen weggelassen werden.

2.2.3. *Den Defekt reparieren*

Die defektfreie Form der Oberfläche wird entweder durch mechanische Bearbeitung des physikalischen Normals oder durch die Korrektur entsprechender Datenpunkten in der Software, wiederhergestellt.

2.2.4. *Den Defekt verändern*

Die Topographie des Defekts wird verändert, ohne dass der Defekt dabei repariert wird. Dies geschieht oft als Ergebnis eines erfolglosen Versuches, den Defekt zu reparieren.

2.2.5. *Den Defekt messen*

Der defektive Teil der Oberfläche wird, beabsichtigt oder unbeabsichtigt und ohne Entfernen, Verändern oder Reparieren, mit gemessen.

2.2.6. *Den Defekt ignorieren*

Bei der Messung der Oberfläche des Normals werden Oberflächendefekte weder absichtlich eingeschlossen noch absichtlich ausgeschlossen.

3. ZUSAMMENFASSUNG

1. Oberflächendefekte sind auf Kalibriernormalen oft vorhanden, wobei in den meisten Fällen Messergebnisse und Messunsicherheiten beeinflusst werden.
2. Es gibt bisher in der Oberflächenmesstechnik keine Terminologie und keine Begriffe für die allgemeine Beschreibung von Defekten auf Kalibriernormalen.
3. Ein passendes Vokabular in der Form einer neuen Norm wird deshalb dringend gebraucht.
4. Die darin definierten Begriffe sollen dazu dienen, dass Kunden und Hersteller von Normalen sich über die erwünschte Qualität der Normalen einigen können und dass bei der Zertifizierung eines Einstellnormals der Kunde (am Messort) genau versteht, wie am Kalibrierort gemessen wurde. Die Festlegung von Mess- und Kalibrierverfahren wird im Allgemeinen dabei auch vereinfacht.

4. QUELLEN

- | | |
|---------------|--|
| [9001, 2015] | ISO 9001:2015: Quality management systems – requirements. ISO, Geneva CH, 2015. |
| [17025, 2005] | ISO/IEC 17025:2005 (E): General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO, Geneva CH, 2005. |
| [8785, 1999] | EN ISO 8785:1999: Surface Imperfections: Terms, definitions and parameters. CEN, Brussels BE, 1999. |

- [4288, 1996] EN ISO 4288:1996 (E): Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture. CEN, Brussels BE, 1997.
- [5436-1, 2000] ISO 5436-1:2000: Surface texture: Profile method; Measurement standards - Part 1: Material measures. ISO, Geneva CH, 2000.
- [12179, 2000] ISO 12179:2000: Surface texture: Profile method – Calibration of contact (stylus) instruments. ISO, Geneva CH, 2000.
- [4287:2009] ISO 4287:1997/Amd.1:2009 (E): AMENDMENT 1: Peak count parameter. ISO TC 213/WG16 Internal Document.

WEITERENTWICKELTE ANSÄTZE ZUR CHARAKTERISIERUNG VON KANTEN AN SCHNEIDWERKZEUGEN UND WERKSTÜCKEN

Eckart Uhlmann, Simon Roßkamp, Alexander Eulitz

Technische Universität Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, rosskamp@iwf.tu-berlin.de

Abstract: Zur Kantenbearbeitung können verschiedene Fertigungsverfahren verwendet werden, mit denen jeweils typische Kantenformen und -rundungen erzeugt werden. Ein allgemeingültiges Vorgehen zur Auswertung von Kantenkonturmessungen wird dadurch erschwert. Zudem geht die Verwendung verschiedener Messmittel und Messverfahren mit zusätzlichen Herausforderungen einher. Um die Auswertungen von Kantenmessungen zu verbessern und gleichzeitig deren Vergleichbarkeit zu steigern, wurden bestehende Ansätze zur Charakterisierung von Kanten weiterentwickelt und neue Lösungsmöglichkeit eruiert. Die entwickelte Profilkennlinie kann für die Beschreibung von Schneid- sowie Werkstückkanten genutzt werden und erhält im Vergleich zum K-Faktor-Modell eine erhöhte Aussagekraft. Mit ihr können typische Kantenformen sowie komplexe Kanten beschrieben werden. Zusätzlich bieten Flächenbetrachtungen die Möglichkeit, nicht-monotone Kantenverläufe, wie sie beispielsweise bei Kantenaufwürfen auftreten, gezielt zu untersuchen.

KEYWORDS: PROFILKENNLINIE, KANTE, FEINSTBEARBEITUNG, FERTIGUNGSTECHNIK

1. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die stetige Verbesserung der Messtechnik und die Möglichkeit, mittels hochpräziser Fertigungsverfahren komplexe Konturen zu fertigen, drängen die Charakterisierung von Kanten zunehmend in den Vordergrund. Besonders das Gebiet der Schneidkantenoptimierung veranlasst die Forschung dazu, neue Ansätze und Kennwerte zur Kantenbeurteilung zu entwickeln. Wachsender Bedarf an Kantenanalysen besteht zudem in weiteren Anwendungsfeldern, wie beispielsweise der Nachbearbeitung von Werkstückkanten. Im Vergleich zu Schneidkanten weisen diese andere charakteristische Verläufe auf, deren Beschreibung häufig neue Beurteilungsmethoden erfordert. Eine weitere Herausforderung besteht in der begrenzten Vergleichbarkeit von Messungen, die mit unterschiedlichen Messsystemen erfolgt sind. Da die Hersteller der Messsysteme die verwendeten Algorithmen zur Charakterisierung der gemessenen Kanten nicht offenlegen und keine Berechnungsvorschrift in Form einer Norm existiert, ist eine herstellerübergreifende Vergleichbarkeit der berechneten Kennwerte nicht gewährleistet. Außerdem erfordern die meisten Programme zur Berechnung charakteristischer Kennwerte für jede Messung manuelle Eingaben des Bedieners, welche die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse einschränken. Am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin wurde deshalb ein Programm entwickelt, mit dem auf der Basis von Rohdaten ver-

schiedener Messgeräte eine Charakterisierung von Schneid- und Werkstückkanten vorgenommen werden kann. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein übergreifender Ansatz zur Kantencharakterisierung vorgestellt, der sowohl auf Schneid- als auch auf Werkstückkanten angewandt werden kann.

2. ANSÄTZE UND HERAUSFORDERUNGEN BEI DER CHARAKTERISIERUNG VON KANTENGEOMETRIEN

Im Bereich der Schneidkanten liegen bereits umfangreiche Forschungsergebnisse vor [Aurich, 2011; Denkena, 2003; Denkena 2014; Richarz, 2008; Risse, 2006; Graf von der Schulenburg, 2008; Tikal, 2009; Uhlmann, 2009a; Uhlmann, 2009b; Uhlmann, 2011a; Uhlmann, 2011b; Uhlmann, 2011c; Wyen, 2012; Yussefian, 2013; Zind, 2012]. Für Kanten an Werkstücken liegen hingegen bis heute wesentlich weniger Erkenntnisse im wissenschaftlichen Bereich vor. Oftmals liegt der Fokus der Untersuchungen dabei auf der Entgratung von Werkstücken [Denkena, 2011; Kedziora, 2012; Stein, 2010; Zimmer, 2012]. Insbesondere ist es bislang nicht gelungen eine Norm zu erarbeiten, in der verbindliche Vorgaben zur Charakterisierung von Kanten an Schneidkanten oder Werkstücken enthalten sind. Im Folgenden werden die am weitesten verbreiteten Konzepte zur Charakterisierung von Kanten zusammengefasst. Den Ausgangspunkt bildet dabei die Schneidkantenbeschreibung.

In der DIN 6582 [6582, 1988] wird eine grobe Unterteilung der Schneidenauführung in scharfkantig, gefast und gerundet vorgesehen. Schwieriger ist die messtechnische Charakterisierung dieser Idealfälle. Eine scharfkantige Schneide sollte weder Kantenbruch noch Kantenrundung oder Grat aufweisen. Die Herstellung einer tatsächlich scharfkantigen Schneide ist jedoch nahezu unmöglich und auch technisch nur bedingt erforderlich [Risse, 2006]. Somit müssen Toleranzen definiert werden, die berücksichtigen, dass eine scharfkantige Schneide einen gewissen Kantenbruch oder eine gewisse Rundung aufweisen kann. Die Charakterisierung einer gefasteten Schneide ist durch die Angabe des Fasenwinkels und der Fasenbreite möglich. Eine gerundete Schneide wird anhand des geometrisch bestimmten Schneidkantenradius beschrieben.

Bei der Charakterisierung von realen Schneidkanten sind jedoch Herausforderungen zu lösen, da die Kantenkontur realer Schneidkanten oft von der beschriebenen Idealform abweicht. Insbesondere bei gerundeten Schneidkanten kann die Charakterisierung mittels der Angabe eines Kantenradius r unzureichend sein. In Abb. 1 sind beispielhaft vier unterschiedliche Kanten dargestellt, deren Rundungen durch Kreise mit identischen Radien beschrieben werden können. Zudem wird bei der Angabe von Radien als Bemaßung außer Acht gelassen, dass mit vielen Verfahren, die zur Erzeugung von Kanten eingesetzt werden, die Herstellung von Rundungen mit konstantem Radius und tangentialem Übergang zur Flanke nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich ist. In der Regel entstehen somit Kantengeometrien, die nur in grober Näherung als Radius charakterisierbar sind.



Abb. 1: Vier unterschiedliche Kantenverläufe, die alle mit dem identischen Radius r beschrieben werden können.

Anstelle von Kreisbögen können andere geometrische Ersatzelemente oder Funktionen für die Beschreibung der Kantenrundung genutzt werden. Tang [Tang, 1990] schlägt hierfür die Einpassung einer Ellipse vor, während Cortés [Cortés, 2009] die Interpolation eines Polynoms sechsten Grades beschreibt. Um Fehler zu vermeiden, die bei einer Polynominterpolation durch Oszillation, wie beispielsweise durch die Schartigkeit der Schneidkante oder das Messrauschen, entstehen können, schlägt Yussefian [Yussefian, 2013] die Verwendung von B-Splines vor. Diese alternativen Ansätze zur Charakterisierung gerundeter Schneidkanten finden bislang jedoch nur begrenzt Verbreitung. Die Ursache liegt in der aufwendigen Beschreibung der an die Rundung angepassten Formen, wie beispielsweise die Angabe von sieben Koeffizienten bei einem Polynom sechsten Grades.

Ein universellerer Ansatz zur Schneidkantencharakterisierung stellt das K-Faktor-Modell dar, Abb. 2. Mit diesem können symmetrische und asymmetrische Kantenrundungen beschrieben werden. Dabei werden zunächst zwei Ausgleichsgeraden a_1 und a_2 als Verlängerungen der Span- bzw. Freifläche gebildet. An der Stelle, an der die Schneide von der Ausgleichsgeraden a_1 bzw. a_2 abweicht, liegen die Ablösepunkte A_1 bzw. A_2 . Die Abstände zwischen den Ablösepunkten und dem Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden werden Schneidabschnitt S_α und S_γ genannt. Der K-Faktor ergibt sich aus dem Verhältnis der Schneidabschnitte S_α und S_γ und beschreibt die Symmetrie der Schneidkante. Zusätzlich kann Δr als der Abstand zwischen dem Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden und dem höchsten Punkt des Profils $P_{\max}$ ermittelt werden. Auch wenn mit Hilfe des K-Faktor-Modells die Geometrie und Orientierung von Schneiden beschrieben werden kann, beeinflusst der Konturverlauf der Schneide zwischen den Ablösepunkten nur bedingt die Beschreibungsgrößen des Modells, vergleiche Abb. 2 b).

Für die von Uhlmann et al. [Uhlmann, 2011a] entwickelte Schneidenprofilkennlinie (Abk.: SPK) ist keine Festlegung auf bestimmte geometrische Ersatzelemente erforderlich. Stattdessen wird entlang der Schneidkante für jeden Profilpunkt der Freiwinkel α bzw. der Spanwinkel γ über eine Laufvariable $p(\alpha)$ bzw. $p(\gamma)$ in einem Diagramm aufgetragen, Abb. 3. Der entstehende Graph beschreibt kontinuierlich den Schneidkantenverlauf. Die SPK ermöglicht die eindeutige Charakterisierung von Kanten, selbst wenn sie eine Aneinanderreihung verschiedener Winkel und Radien darstellen. Für einen eingehenden Vergleich von Kantenprofilen ist jedoch eine grafische Auswertung aller Kantenverläufe notwendig. Dennoch wird die Schneidenprofilkennlinie als eine einzigartige Darstellung der Schneidkante bewertet. [Denkena, 2014]

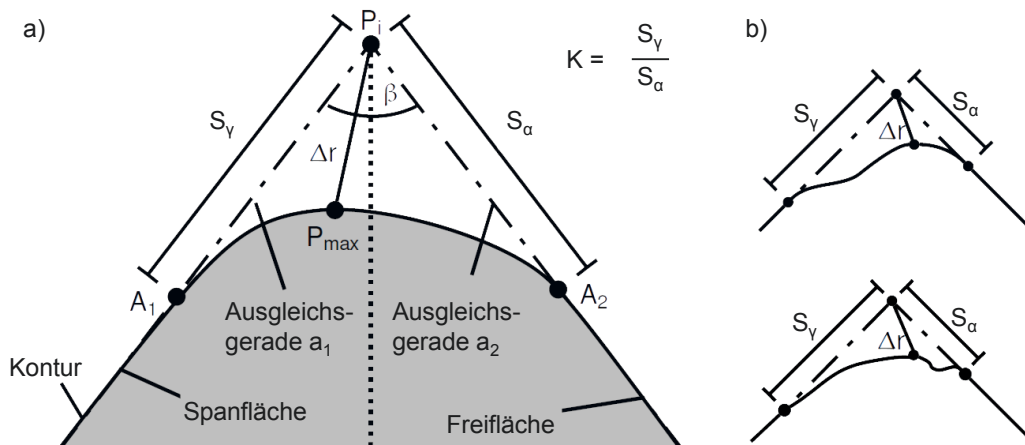


Abb. 2: Schematische Darstellung des K-Faktor-Modells; a) Bestimmung der Kennwerte in Anlehnung an [Denkena, 2007]; b) zwei Kantenkonturen mit identischen Kennwerten

Einen anderen Ansatz verfolgen Zind und Dültgen [Zind, 2012], die sich ausgehend von der Betrachtung von Messerschneiden und Sägezähnen der Kantenbeschreibung quantitativ über die Angabe von Fehlflächen nähern. Dabei wird die Fläche zwischen dem ideal scharfen Kantenprofil und dem tatsächlichen Profil ermittelt. Auch hier wird der Verlauf der Kante zwischen den Ablösepunkten berücksichtigt. Das Verfahren eignet sich insbesondere zur Beschreibung von Verschleiß, da die gegenüber der idealen Kontur fehlende Fläche beschrieben wird.

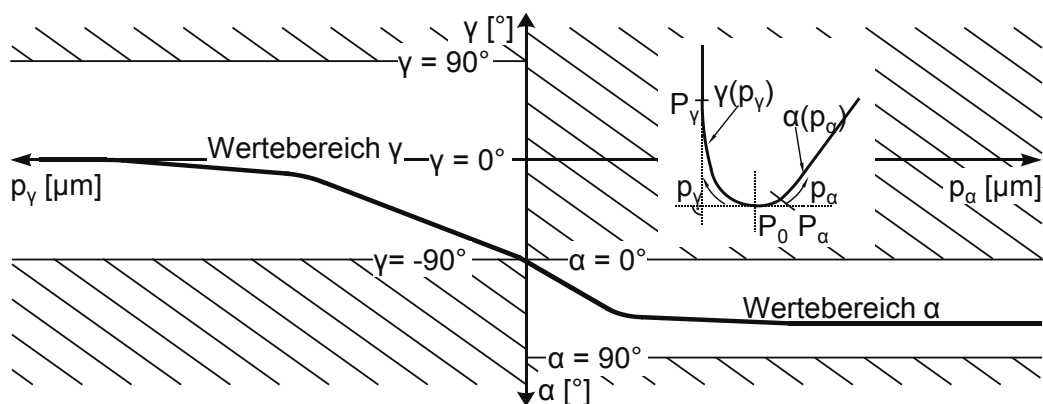


Abb. 3: Darstellung der Schneidenprofilkennlinie [Uhlmann, 2011]

Bei der Qualifizierung des Kantenbruchs gilt die DIN ISO 13715 [13715, 2000], in der insbesondere eine Unterscheidung zwischen den drei Kantenzuständen „Bereich der Abtragung“, „scharfkantiger Bereich“ und „Bereich des Grates“ erläutert wird, wobei „scharfkantig“ gemäß des informativen Anhangs B eine Abweichung zwischen $-0,05 \text{ mm}$ und $+0,05 \text{ mm}$ beschreibt. Darüber hinaus sind Werksnormen der Robert Bosch GmbH zum Stand der Technik zu zählen, die einerseits aufbauend auf der DIN ISO 13715 die Qualifizierung des Kantenbruchs beschreiben [Bosch, 2015]. Andererseits wird ein mögliches Vorgehen der Auswertung von Radienmessungen an Werkstückkanten vorgeschrieben [Bosch, 2010]. Nach dieser Definition liegt die Herausforderung der Qualifizierung in der Auswertung der aufgenommenen Messdaten. Um diese Bestim-

mung reproduzierbar und unabhängig vom Bediener vornehmen zu können, werden in der Werksnorm zum Kantenbruch aufgrund des gemessenen Profils zwei Ausgleichsgeraden definiert, die um parallel versetzte Korridor Grenzen ergänzt werden, welche die zulässige Rauheit bzw. Welligkeit enthalten. Überschreitet das Profil an keiner Stelle die Korridor Grenzen, so wird es als scharfkantig beschrieben. Überschreitet das Profil jedoch die Korridor Grenzen, wird es gemäß DIN ISO 13715 bewertet, wobei die Aussage durch Bestimmung der Durchstoßpunkte durch obere bzw. untere Toleranzgrenzen präzisiert werden [Zimmer, 2012]. Für die Anwendbarkeit müssen jedoch Prüfvorschriften vorliegen. Vor diesem Hintergrund ist eine Übertragung auf beliebige, unbekannte Kanten, für die keine entsprechende Prüfvorschrift existiert, nur eingeschränkt möglich. Analog zum Vorgehen bei der Bewertung des Kantenbruchs werden bei der Auswertung der Kantenradien Ausgleichsgeraden ermittelt. Durch die Ermittlung von Hilfsgeraden, die um einen Abstand s parallel zu den Profilabschnitten verlaufen, wird der Auswertebereich für den Radius definiert, der zwischen den Schnittpunkten der Hilfsgeraden mit dem Profil liegt, Abb. 4. Als empfohlener Abstand s wird die gemittelte Rautiefe R_z empfohlen [Bosch, 2010]. Durch die Einbeziehung der Oberflächenrauheit und die Unabhängigkeit vom Bediener ist das Verfahren sehr robust und führt zu reproduzierbaren Ergebnissen [Zimmer, 2012].

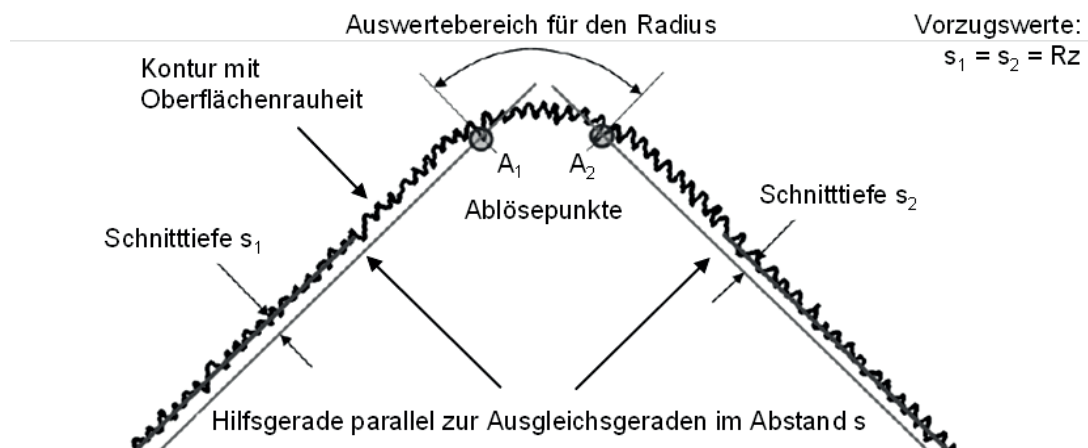


Abb. 4: Bestimmung des Kantenradius an Werkstücken in Anlehnung an [Bosch, 2010]

Unabhängig vom Ansatz zur Schneidkantencharakterisierung hängen die jeweiligen Kenngrößen massiv von der Wahl der Ablösepunkte A_1 und A_2 ab. Trotzdem werden diese Punkte bei vielen Auswertungen durch den Bediener bei jeder einzelnen Messung neu festgelegt, was sich auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse negativ auswirkt. Kedziora [Kedziora, 2012], Wyen [Wyen, 2012] sowie Yussefian und Koshy [Yussefian, 2013] schlagen eine algorithmische Festlegung der Ablösepunkte A_1 und A_2 vor. Zudem weist Grüber [Grüber, 2012] darauf hin, dass optische Messgeräte für die Kantenbruchmessung deutlich besser geeignet sind als taktile.

Im Folgenden soll die Übertragbarkeit der vorgestellten Ansätze zur Beschreibung von Schneidkanten auf die Charakterisierung von Werkstückkanten überprüft werden.

3. AQUILES - SOFTWARE ZUR HERSTELLERUNABHÄNGIGEN BEURTEILUNG VON KANTEN

Uhlmann et al. [Uhlmann, 2012] haben gezeigt, dass das Konzept der Profilkennlinie auch auf Werkstückkanten angewendet werden kann. Grundsätzlich ist eine Übertragbarkeit für alle vorgestellten Ansätze denkbar. Jedoch unterscheiden sich Werkstückkanten zum Teil erheblich von Schneidkanten, sodass bestimmte Beschreibungskonzepte versagen. Zudem können sich je nach verwendetem Fertigungsverfahren unterschiedliche Kantenformen ausbilden, die eine Charakterisierung erschweren. Eine besondere Herausforderung stellen gratbehaftete Kanten dar. Das am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin entwickelte Programm „Aquiles“ ist ein neuartiges Werkzeug zur messgeräteunabhängigen Beurteilung von Schneid- und Werkstückkanten. Das Programm verfügt über eine erweiterbare Schnittstelle zum Einlesen messgerätespezifischer Rohdaten. Diese können sowohl aus einer Tastschnittmessung als auch aus einer Topografiemessung taktiler oder optischer Messgeräte stammen. Nachdem die Rohdaten eingelesen wurden, erfolgt eine Ausrichtung des Datensatzes, sodass eine einheitliche Orientierung der Kante vorliegt. Anschließend wird im Fall eines 3D-Datensatzes ein Durchschnittsprofil gebildet, das im Weiteren ausgewertet wird. Der Grenzwert zur Bestimmung der Ablösepunkte sowie alle weiteren Konfigurationen können für die Auswertung folgender Messungen gespeichert werden und sind nicht an einen konkreten Datensatz gebunden. Somit besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Kantenprofile und Messungen verschiedener Messgeräte mit derselben Konfiguration auszuwerten. Danach erfolgt die Charakterisierung der Kante anhand einer Auswahl der oben vorgestellten Konzepte. Dies umfasst die Bestimmung

- der Kantenrundung mittels Einpassung von Kreisen oder einer Ellipse,
- des K-Faktors sowie der Schneidenabschnitte,
- der Fehlflächen und
- der Profilkennlinie.

Für eine bessere Beschreibbarkeit von asymmetrischen Kantenrundungen wird bei der Kreiseinpassung zwischen linkem und rechtem Kreis unterschieden. Dabei werden für den linken Kreis alle Messpunkte zwischen dem linken Ablösepunkt und dem höchsten Punkt des Profils $P_{\max}$ und für den rechten Kreis äquivalent die Messpunkte rechts des höchsten Punktes bis zum rechten Ablösepunkt verwendet. Zusätzlich wird die Gesamtrundung der Kante ermittelt, in die alle Messpunkte zwischen den beiden Ablösepunkten einfließen.

In Abb. 5 sind für eine Kante die eingepassten Kreise a) und die eingepasste Ellipse b) dargestellt. Die abgebildete Kante wurde mittels Strömungsschleifen hergestellt. Dabei ist insbesondere die Scherrate des viskoelastischen Mediums ein entscheidender Faktor, der an scharfen Kanten besonders hoch ist. Dies bewirkt an den exponierten Punkten einer Kante eine hohe Materialabtrennrate, die zu einer Rundung dieser Kantenbereiche führt. Mit fortschreitender Kantenrundung nehmen die Scherrate und Materialabtrennrate im Kantenbereich ab.

In der Folge stellen sich Kantenformen mit stetigem Übergang zu beiden Kantenflanken ein. Je nach Prozessparametern bilden sich unterschiedlich ausgeprägte Kanten aus, die zum Teil mit einem Kreissegment, häufig jedoch mit Ellipsensegmenten beschrieben werden können.

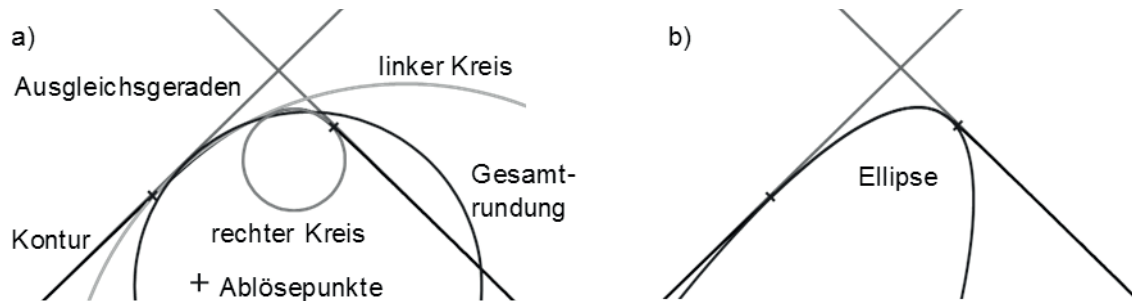


Abb. 5: Schematische Darstellung der Kantenauswertung mittels Aquiles;
a) eingepasste Kreise b) eingepasste Ellipse

Die Vorteile des Prinzips der Fehlflächen werden in Abb. 6 offenbar. Die dargestellte Kante wurde mittels robotergeführtem Tauchgleitschleifen [Uhlmann, 2011d] an einem Werkstück aus Polyamid hergestellt. Infolge der Bearbeitung kam es neben der Abtrennung zum Aufschieben von Material an der Planfläche. Eine Unterscheidung in Flächen ober- und unterhalb der Ausgleichsgeraden erlaubt die Bestimmung der Kantenflächendifferenz K_A . Anhand dieser kann ermittelt werden, ob der abtrennende oder der umformende Bearbeitungsmechanismus überwiegt. Im vorliegenden Beispiel signalisiert eine positive Kantenflächendifferenz K_A einen vorrangig abtrennenden Bearbeitungsmechanismus.

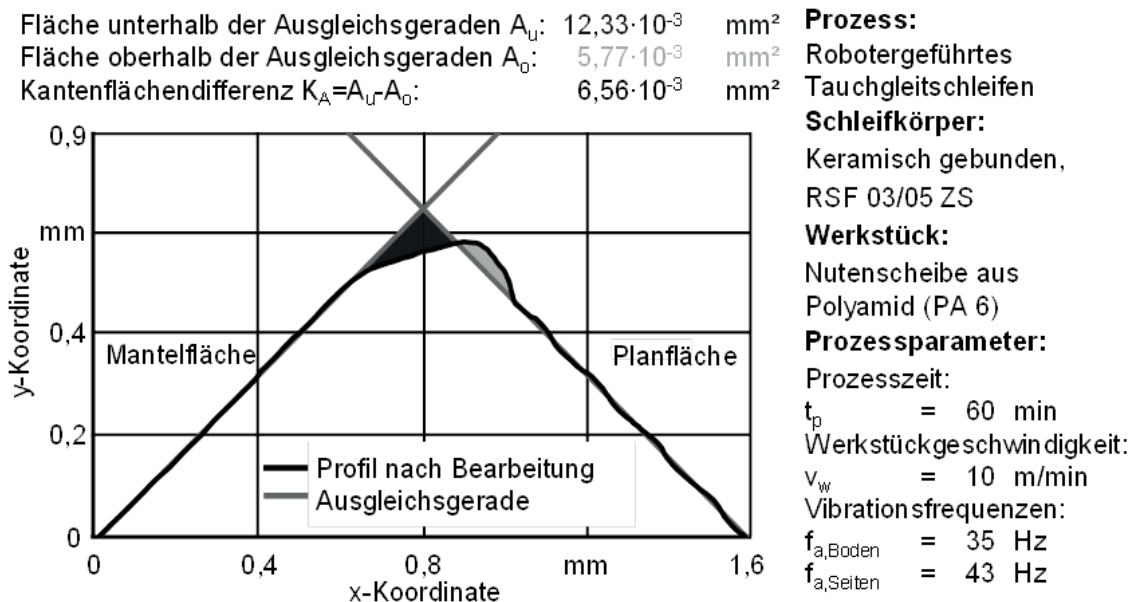


Abb. 6: Qualifizierung einer Kante mithilfe der Berechnung von Fehlflächen

4. CHARAKTERISIERUNG TYPISCHER KANTENGEOMETRIEN

Bei der Bewertung von Werkstückkanten ergibt sich die Herausforderung, dass einige Auswertemethoden eine bestimmte Kantenform erfordern. Reale Werkstückkanten weisen jedoch häufig unterschiedliche Geometrieelemente auf oder setzen sich aus verschiedenen Geometrieelementen zusammen. Typische Kantenformen sind in Tabelle 1 dargestellt. Zudem wird jeweils die Eignung der oben erläuterten Auswertemethoden zur Beschreibung der entsprechenden Geometrieelemente bewertet. Mit Hilfe der Tabelle kann auch die Eignung der Auswertemethode für Kantenkonturen, die aus mehreren Geometrieelementen bestehen, abgeschätzt werden.

	Kantenrundung		Kantenbruch		Grat
	sym-metrisch	asym-metrisch	Fase	Winkel	
Schematische Darstellung					
Radius	●	●	●	○	○
Ellipse	●	●	●	○	○
K-Faktor	●	●	●	○	○
Fehlflächen	●	●	●	○	●
Profilkennlinie	●	●	●	●	○

Tab. 1: Eignung verschiedener Auswertemethoden zur Charakterisierung von kombinierten Kantenformen aus einzelnen Geometrieelementen mittels Grad der Eigenschaftserfüllung

Die Einpassung eines Radius ist für symmetrische Kantenrundungen, die einem Kreisbogensegment entsprechen, vollkommen geeignet. Die Beschreibung der Kante mit einem einzelnen Kennwert ist zudem von Vorteil. Weicht die Kantenkontur jedoch von der idealen Geometrie ab, wird die Einpassung eines Radius fehlerhaft und beschreibt nur noch unzureichend die Kante. Dies wird insbesondere bei winkligen Geometrien, wie Fase und Winkel, deutlich. Zur Beschreibung von Graten eignen sich Radien nicht, da an dieser Stelle der Fitting-Algorithmus fehleranfällig ist.

Dem gegenüber können mit der Einpassung einer Ellipse sowohl symmetrische als auch asymmetrische Rundungen über die Angabe der beiden Halbachsen genau beschrieben werden. Diese Beschreibung kann zukünftig durch die Beschreibung des Winkels zwischen einer Flanke und einer Halbachse ergänzt werden, um die Lage der Ellipse eindeutig zu definieren. Die Anwendung auf gefaste Kanten ist nur bedingt und für Winkel oder Grat gar nicht geeignet.

Das K-Faktor-Modell ist zur Beschreibung von Schneidkanten weit verbreitet. Sofern die Kante gegenüber einem scharfkantigen Ausgangszustand über Fehlflächen verfügt, führt die Methode zu Ergebnissen. Darüber hinaus kann die Aussage mit der Angabe des Abstands Δr vom angenommenen Schnittpunkt der Kantenlinien zum höchsten Punkt des Profils $P_{\max}$ präzisiert werden. Ein Nachteil besteht jedoch darin, dass über die Angabe des K-Faktors und des

Abstands Δr kein Rückschluss auf den tatsächlichen Kantenverlauf gezogen werden kann. Bei der Beschreibung eines Winkels versagt das Modell aufgrund nicht vorhandener Fehlflächen. Zudem ist die Beschreibung von Graten nicht möglich.

Das Prinzip der Ermittlung von Fehlflächen gegenüber der idealen Kante weist einige Vorteile auf, da für die Ermittlung der Fehlflächen keine Einpassung von Geometrieelementen erforderlich ist. Somit können mit der Ermittlung von Fehlflächen alle Arten von Kantenformen, inklusive Graten, qualifiziert werden. Neben dieser universellen Anwendbarkeit kann ein einziger Kennwert ermittelt werden, der den Vergleich mit anderen Kanten erleichtert. Jedoch birgt dies, genauso wie beim K-Faktor-Modell, den Nachteil, dass von den Kennwerten nicht eindeutig auf den Kantenverlauf geschlossen werden kann.

Während mit den beschriebenen Auswertemethoden vor allem geometrische Elemente berücksichtigt werden, wird mit der weiterentwickelten Profilkennlinie ein anderer Ansatz verfolgt. In einem Diagramm werden die Laufvariable entlang der Kantenkontur und der Winkel zwischen der lokalen Tangente und einer Kantenflanke aufgetragen. Aus dem Verlauf der Profilkennlinie können die geometrischen Grundelemente ermittelt werden, da sie jeweils charakteristische Verläufe aufweisen. So entspricht ein Kantenradius in der Profilkennlinie einer Geraden, wobei die Steigung proportional zum Radius ist. Ein Winkel wiederum ist als Sprung der Profilkennlinie ersichtlich, dessen Höhe direkt mit dem Winkelmaß in Verbindung steht, während eine Ellipse als Parabel abgebildet wird. Daher muss keine Einpassung in das gemessene Profil vorgenommen werden. Im Gegensatz zu den anderen Methoden werden noch keine Kennwerte ermittelt, die sich miteinander vergleichen lassen. Dafür ist die Bestimmung der Geometrieelemente im Kantenverlauf jedoch erheblich erleichtert.

5. ANWENDUNG DER PROFILKENNLINIE AUF KOMPLEXE WERKSTÜCKKANTENGEOMETRIEN

Ausgehend von der theoretischen Betrachtung sollen die Potentiale der Profilkennlinie an einer realen Kante aufgezeigt werden. Dafür wurde eine komplexe Geometrie gewählt, die ein Kreisbogensegment sowie einen Winkel und ein Ellipsensegment enthält. Um eine möglichst hohe Maßhaltigkeit zu erreichen, wurde diese Kante erodiert. Die Kantenkontur und ihre Profilkennlinie ist in Abb. 7 dargestellt. Wie an der Auswertung mittels Profilkennlinie zu sehen ist, können die Formelemente bereits auf den ersten Blick voneinander unterschieden werden. Durch Ableitung der Profilkennlinie ist es zudem möglich, die Veränderung der Steigung analytisch zu bestimmen. Die Punkte der Veränderung der Steigung bestimmen damit die Übergangspunkte von zwei Geometrieelementen, die aufgrund der Laufvariable und des lokalen Tangentenwinkels der realen Kante zuzuordnen sind. Damit ist es möglich Bereiche, in die Geometrieelemente sinnvoll eingepasst werden könnten, zu definieren. Die erheblichen Vorteile dieses Vorgehens liegen in der strukturierten Vorgehensweise, den robusten Algorithmen, der Anwendbarkeit auf sämtliche Kanten an Werkstücken und an Werkzeugen sowie der weitgehenden Unabhängigkeit der Ergebnisse vom

Bediener. Damit steht ein Verfahren zur Verfügung, das ausgehend von Messdaten zu objektiven und vollkommen reproduzierbaren Ergebnissen der Kantenqualifizierung hoher Informationsdichte befähigt.

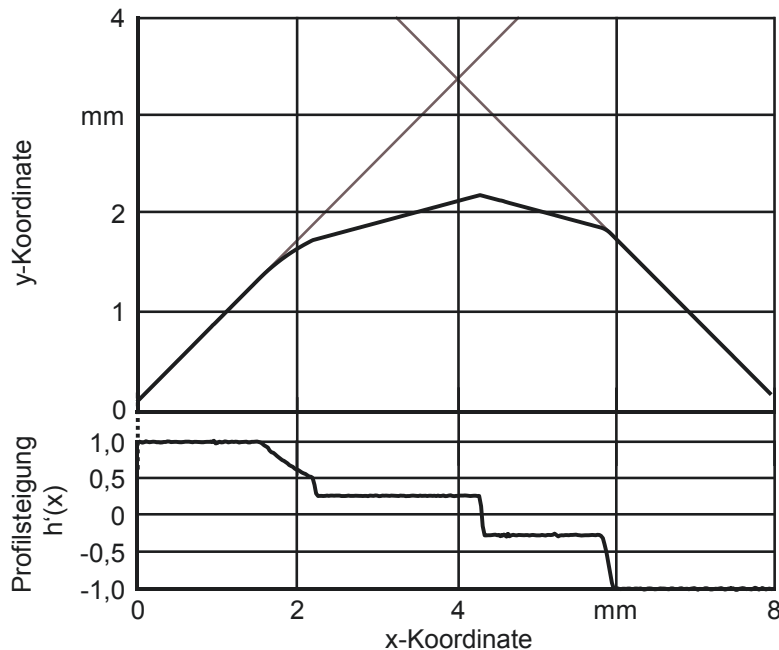


Abb. 7: Komplexe Kante und Profilkennlinie

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurde dargestellt, dass die Profilkennlinie zur Charakterisierung einer Vielzahl von Schneid- und Werkstückkanten eingesetzt werden kann und mit ihr Kanten in der Regel geeigneter beschrieben werden können als mit anderen Methoden. Trotz der zahlreichen Vorteile der Profilkennlinie ist weiteres Verbesserungspotential erkennbar. Die Beschreibung von Kanten mittels Ellipsensegmenten kann durch die Angabe des Winkels zwischen den Halbachsen und den Kantenflanken präzisiert werden. Darüber hinaus kann die Kantenqualifizierung weiter automatisiert werden, sodass die Profilkennlinie ohne Zwischenschritte direkt aus den Messdaten erstellt wird. Außerdem ist die Definition von Kennwerten wünschenswert, um verschiedene Kanten prägnant anhand der jeweiligen Zahlenwerte vergleichen zu können. Diese könnten beispielsweise Radiuskontinuität, Anzahl der Übergangspunkte, Anzahl der Geometrieelemente sowie deren geometrischen Kennwerte wie Radius, Winkel oder Halbachsenlänge sein.

7. QUELLEN

- [6582, 1988] DIN 6582:1988: Begriffe der Zerspantechnik; Ergänzende Begriffe am Werkzeug, am Schneidkeil und an der Schneide. Beuth-Verlag, Berlin, 1988.

- [13715, 2000] DIN ISO 13715:2000: Technische Zeichnungen – Werkstückkanten mit unbestimmter Form – Begriffe und Zeichnungsangaben. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- [Aurich, 2011] Aurich, J. C.; Zimmermann, M.; Leitz, L.: The preparation of cutting edges using a marking laser. *Production Engineering Research and Development* 5 (2011) 1, S. 17–24.
- [Bosch, 2010] Robert Bosch GmbH: Messung von Radien an Werkstückkanten. Bosch-Norm N42AP 621, Gerlingen, Firmenschrift, 2010.
- [Bosch, 2015] Robert Bosch GmbH: Prüfung von Werkstückkanten mit unbestimmter Form. Bosch-Norm N42AP 621, Gerlingen, Firmenschrift, 2015.
- [Cortés, 2009] Cortes, C.; Tikal, F.: Schneidkantenpräparation: Ziele. In: *Schneidkantenpräparation - Ziele, Verfahren, Messmethoden – Berichte aus Industrie und Forschung*. Tikal, F.: Kassel University Press, 2009, S. 3–11.
- [Denkena, 2003] Denkena, B.; Weinert, K.; Friemuth, T.; Spengler, C.; Schulte, M.; Kötter, D.: Kantenpräparation an Hartmetall-Werkzeugen – Einfluss der Prozessparameter beim Strahlen und Bürsten. *VDI-Z Spezial Werkzeuge* 145 (2003), S. 51–54.
- [Denkena, 2007] Denkena, B.; Kramer, N.; Siegel, F.; Kästner, J.: Leistungsoptimierung an der Schneidkante. *VDI Zeitschrift Special Werkzeuge*, Springer Verlag (2007), S. 24–26.
- [Denkena, 2011] Denkena, B.; Böß, V.; Kaddour, R.; Friedrichs, J.; Bassett, E.: Automatisiertes Entgraten mit Industrierobotern – durchgängige CAX-Prozesskette. *wt Werkstattstechnik online* 101 (2011) 9, S. 623–628.
- [Denkena, 2014] Denkena, B.; Biermann, D.: Cutting edge geometries. *CIRP Annals Manufacturing Technology* (2014), S. 631–653.
- [Graf von der Schulenburg, 2008] Graf von der Schulenburg, M.; Mihotovic, V.; Uhlmann, E.: Gezieltes Schneidkantenverrunden mit Diamantschleifmedien. *diamond business* (2008) 3, S. 18–25.
- [Grübler, 2012] Grübler, T.: Anwendung der Bosch-Norm zur Messung von Kantenbrüchen mit Hilfe von optischer Oberflächenmesstechnik. XIII. Internationales Oberflächenkolloquium: 1. IMSAS-Treffen, Hrsg.: Dietzsch, M.; Gröger, S., Universitätsverlag Chemnitz, 2012, S. 48–55.
- [Kedziora, 2012] Kedziora, H.-J.: Auswertestrategien zur Verifikation komplexer Konturen. XIII. Internationales Oberflächenkolloquium: 1. IMSAS-Treffen, Hrsg.: Dietzsch, M.; Gröger, S., Universitätsverlag Chemnitz, 2012, S. 119–126.
- [Richarz, 2008] Richarz, S.; Gebhard, S.; Mihotovic, V.: Feinbearbeitung von Vollhartmetallbohrwerkzeugen. *Futur* 10 (2008) 3, S. 2–3.

- [Risse, 2006] Risse, K.: Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl. Berichte aus der Produktionstechnik. Bd. 15/2006, Hrsg.: Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Schuh, G.; Weck, M.; Brecher, C.; Schmitt, R., Shaker Verlag, Aachen, 2006.
- [Stein, 2010] Stein, S.: HSC-Kantenbearbeitung von Blech. Schriftenreihe des PTW: „Innovation Fertigungstechnik“. Hrsg.: Abele, E., Shaker Verlag, Aachen, 2010.
- [Tang, 1990] Tang, W.: Optische Messung der Schneidkantenschärfe von Schneidwerkzeugen. Kaiserslautern, Universität Kaiserslautern, Dissertation, Selbstverlag, Kaiserslautern, 1990.
- [Tikal, 2009] Tikal, F. (Hrsg.): Schneidkantenpräparation, Ziele, Verfahren, Messmethoden. Kassel University Press, 2009.
- [Uhlmann, 2009a] Uhlmann, E.; Barthelmä, F.; Gröger, M.; Richarz, S.: Entwicklung innovativer Werkzeuge zur Zerspanung harter Kompetenten (Hartspan). Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben; Zeitraum: 01.01.2008 bis 31.12.2009; Programm InnoNet / TU Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb.
- [Uhlmann, 2009b] Uhlmann, E.; Richarz, S.; Mihotovic, V.: Oberflächenvorbehandlung und Kantenpräparation an Hartmetallwerkzeugen. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 1–2, S. 17–24.
- [Uhlmann, 2011a] Uhlmann, E.; König, J.; Dethlefs, A.; Graf von der Schulenburg, M.: Charakterisierung geometrisch bestimmter Schneiden. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 7–8, S. 475–481.
- [Uhlmann, 2011b] Uhlmann, E.; Richarz, S.; Fuentes, J.: Hartdrehen von PM-Schnellarbeitsstahl. Diamond Business (2011) 1, S. 10–19.
- [Uhlmann, 2011c] Uhlmann, E.; Löwenstein, A.; Mahr, F.; Oberschmidt, D.: Schneidkantenpräparation von Mikrofräsern. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 1 - 2, S. 73–80.
- [Uhlmann, 2011d] Uhlmann, E.; Dethlefs, A.: Polieren komplexer Bauteile. WB Werkstatt + Betrieb (2011) 6, S. 28–31.
- [Uhlmann, 2012] Uhlmann, E.; Dethlefs, A.: Erzeugung und Charakterisierung komplexer Kantengeometrien. XIII. Internationales Oberflächenkolloquium: 1. IMSAS-Treffen, Hrsg.: Dietzsch, M.; Gröger, S., Universitätsverlag Chemnitz, 2012, S. 56–62.
- [Wyen, 2012] Wyen, C.-F.; Knapp, W.; Wegener, K.: A new method for the characterisation of rounded cutting edges. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer Verlag (2012), S. 899–914.
- [Yussefian, 2013] Yussefian, N.; Koshy, P.: Parametric characterization of the geometry of honed cutting edges. Precision Engineering (2013), S. 746–752.

- [Zimmer, 2012] Zimmer, M.: Vorgehen bei der Bewertung von Kantenbrüchen und Radien. XIII. Internationales Oberflächenkolloquium: 1. IMSAS-Treffen, Hrsg.: Dietzsch, M.; Gröger, S., Universitätsverlag Chemnitz, 2012, S. 40–47.
- [Zind, 2012] Zind, S.; Dültgen, P.: Kantenspezifikation durch Volumenelemente. XIII. Internationales Oberflächenkolloquium: 1. IMSAS-Treffen, Hrsg.: Dietzsch, M.; Gröger, S., Universitätsverlag Chemnitz, 2012, S. 79–86.

KOMPLEXE GEOMETRIEN MIT NUR EINEM OPTISCHEN MESSSYSTEM VERMESSEN

Carl Bauer¹, Steffen Hahne²

¹Confovis GmbH, Entwicklung, bauer@confovis.com

²Confovis GmbH, Entwicklung, hahne@confovis.com

Abstract: Für Oberflächen mit zufällig verteilten Strukturelementen, wie sie beim Beschichten, Gleitschleifen oder dem Strahlen entstehen, reichen klassische taktile Messverfahren nicht mehr aus. Die Anforderungen bei Beschichtungen, wie Diamant-Schichten, steigen, denn die Morphologie der Schichten muss genau quantifiziert werden, um die tribologischen Eigenschaften der Bauteile zu optimieren. Confovis bietet mit der Kombination aus zwei Messverfahren (Konfokal-Messverfahren und Fokusvariation) die Möglichkeit, derart bearbeitete Oberflächen umfangreich, zuverlässig und rückführbar auf etablierte Normen zu erfassen und auszuwerten.

KEYWORDS: FOKUSVARIATION UND KONFOKALMESSTECHNIK, RAUHEITSMESSUNG, OPTISCHE MESSTECHNIK

1. ANFORDERUNGEN DES MARKTES

Moderne optische Messtechnik, die auf dem konfokalen Arbeitsprinzip oder dem Fokusvariationsverfahren basiert, ermöglicht flächige Untersuchungen, die mit taktilen Messverfahren nicht oder nur mit großem Aufwand möglich sind. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Oberfläche nicht nur eindimensionale Bearbeitungsstrukturen aufweist, wie sie beim Drehen oder Schleifen entstehen. Die Komplexität der Messaufgabe erhöht sich deutlich, wenn zufällig verteilte Strukturelemente auf der Oberfläche vorhanden sind, die beim Läppen, Finishen, Strahlen oder Beschichten entstehen können. Tastschnitte sind nicht geeignet derartige Oberflächen in ihrer Gesamtheit zu erfassen. Bei besonders feinen Oberflächen, die konkave Strukturen kleiner als 3 µm aufweisen, sind die Möglichkeiten einer hochpräzisen lateralen Auflösung bereits aufgrund des Tasterradius begrenzt. Auch herausgebrochene Droplets beschichteter Oberflächen (Abb. 1) haben teilweise so steile Flanken, dass Tastnadeln „einfädeln“ und springen. Damit können sie keine zuverlässigen Messergebnisse liefern.

Die Anforderungen an Messgeräte steigen auf derart unkooperativen Oberflächen mit den konstruktiven Anforderungen an die Rauheits-, Form- und Konturbeschaffenheit. Das betrifft gleichermaßen Funktionsbauteile wie auch Zerspanungswerkzeuge. Folgende Oberflächenbeschaffenheiten stellen hohe Anforderungen an Messgeräte, insbesondere wenn sie in Kombination auftreten:

- Rauheit mit Rz-Werten kleiner 1 µm von polierten, gestrahlten oder gebürsteten Oberflächen
- Kantenradien von kleiner 5 µm an Werkzeugen oder Bauteilen

- PKD, MKD und Diamantwerkzeuge (Abb. 2)
- Spiegelnde Beschichtungen

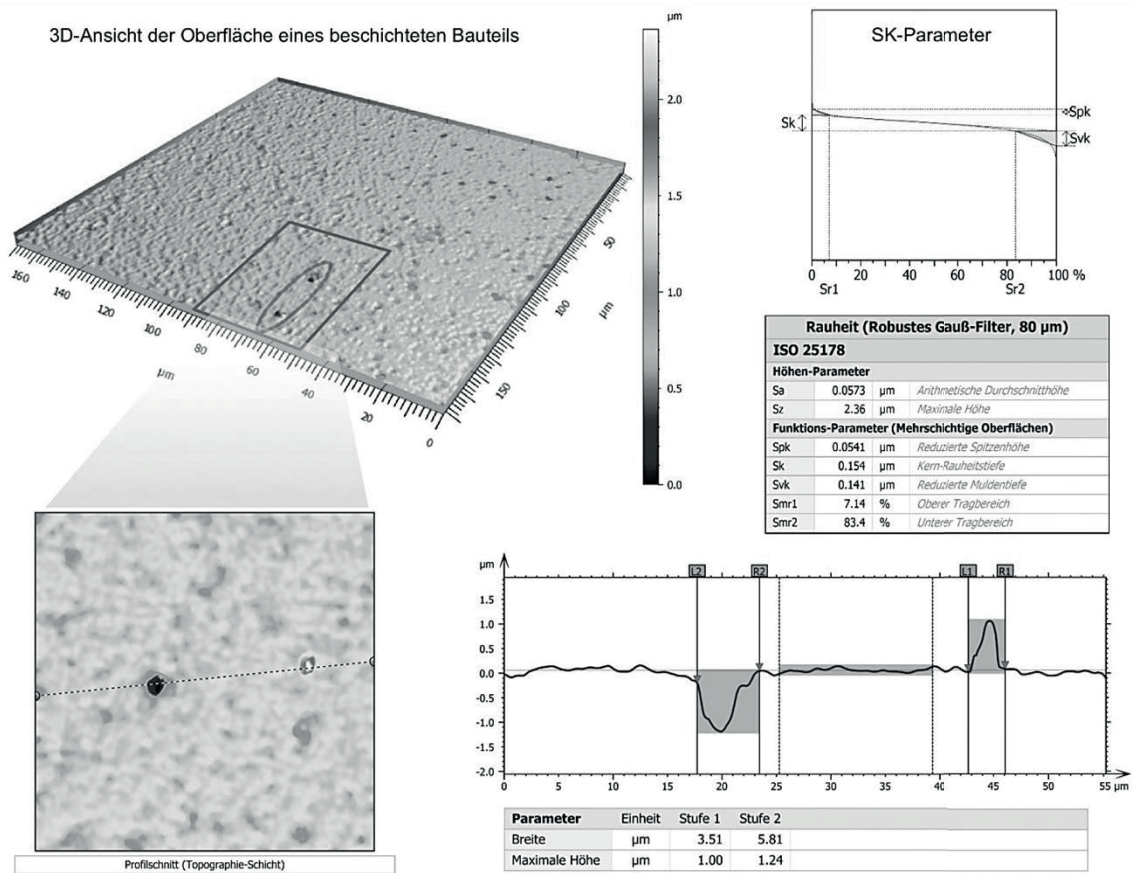


Abb. 1: Messung von beschichteten Oberflächen, die Droplets aufweisen.

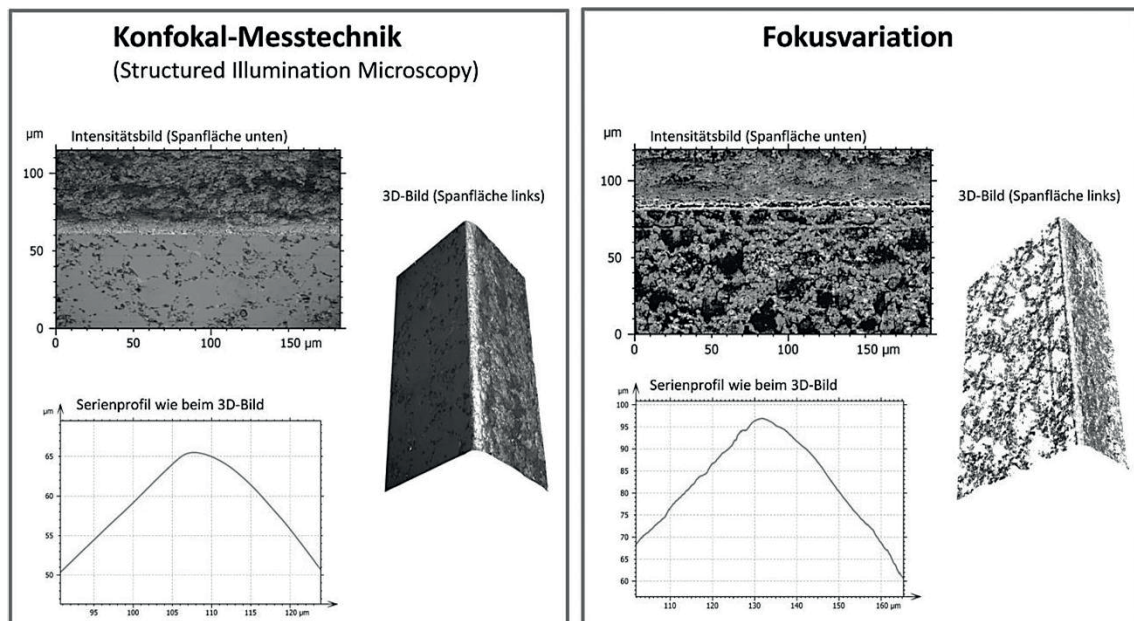


Abb. 2: Konfokal- und Fokusvariationsmessung an PKD-Platte (beschichtet)

2. ERFÜLLEN DER MESSAUFGABE

Die beschriebenen Messaufgaben und die sich ergebenden Anforderungen sind teilweise sehr unterschiedlich. Für die Messtechnik ergibt sich daraus, dass eine hohe Messdatenqualität sichergestellt werden muss, um alle beabsichtigten Analysen zuverlässig und umfangreich durchführen zu können. Nicht jedes Messsystem bzw. Messverfahren ist für jede Messaufgabe geeignet. Für eine auf etablierte Normen rückführbare Rauheitsmessung an beliebigen Strukturen sind hohe laterale und axiale Auflösungen notwendig (kleine Auflösungszelle). Mit entsprechend großer numerischer Apertur und 415 nm Beleuchtungswellenlänge kann durch das konfokale Messverfahren (Structured Illumination Microscopy) eine laterale Auflösung bis 267 nm und eine vertikale Messunsicherheit von 3 nm erreicht werden.

Polierte oder gehobte Oberflächen sowie Oberflächen, die mit funktionalen Beschichtungen versehen wurden, aber auch transparente bzw. teiltransparente Oberflächen bieten wenig oder keinen lateralen Kontrast. Sie sind deshalb mit Messverfahren, die auf der Grundlage diffuser Reflexion beruhen, in den meisten Fällen nicht ausreichend messbar. Für diese Anwendungsfälle eignet sich das konfokale Messverfahren (Structured Illumination Microscopy) wie es Confovis anbietet, weil es nicht auf einen vorhandenen Objektkontrast beruht. Bei der Structured Illumination Microscopy wird ein Gitter phasenverschoben in die Probe projiziert und der Differenzkontrast bestimmt. Auf einem Planspiegel erreicht man auf diese Weise einen Kontrast von 100%.

Bei der Konturbestimmung an Geometrien im Größenbereich von 5 µm bis zu einigen Zehntelmillimetern ist es oft sinnvoll mit geringer vergrößernden Objektiven zu messen. Diese Messaufgaben eignen sich für die Messung mit Fokusvariation, weil durch den Einsatz einer außerhalb des abbildenden optischen Systems liegenden Beleuchtung (Objektiv-Ringlicht) auch mit der vergleichsweise kleinen numerischen Apertur der gering vergrößernden Objektive große Flankenwinkel erfasst werden können.

An Werkzeugen wie Wendeschneidplatten, Bohrern und Fräsern sind in der Regel sowohl Rauheit als auch Kontur in Kombination zu messen. In solchen Fällen ist es sinnvoll, die zur Lösung beider Messaufgaben geeigneten Messverfahren in einem Messgerät zu kombinieren. Dadurch kann ohne Umspannen des zu untersuchenden Objektes die Rauheit sowie die Kontur in einem Koordinatensystem gemessen werden. Die Messdaten der beiden Messverfahren können entweder zusammengeführt oder auch einzeln ausgewertet werden.

3. KONFOKALMESSUNG (STRUCTURED ILLUMINATION MICROSCOPY)

Bei der Messung im patentierten Konfokal-Modus „Structured Illumination Microscopy“ wird die zu untersuchende Probe oder das Objektiv entlang der optischen Achse (z-Achse) bewegt. In definierten Ebenenabständen wird ein

Gitter phasenverschoben auf der Probe abgebildet. Das optische System im Scan-Modul ConfoCam[®] und dem Mikroskop ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die 3D-Informationserfassung in der ConfoCam[®] basiert auf dem konfokalen Messprinzip. Während des Messprozesses werden die beiden LEDs (1) abwechselnd betrieben. Durch die wechselseitige Beleuchtung des Gitters (2) in Transmission und Reflexion entsteht unter Verwendung von Teilerspiegeln (3) in der Objektebene ein Gitter, welches bei jedem Beleuchtungswechsel um 180° phasenverschoben ist. Die beleuchtete Probe (4) wird dann über einen weiteren Strahlengang in den Bildsensor (5) abgebildet. Aus den erzeugten Bilddaten werden die Höheninformationen errechnet.

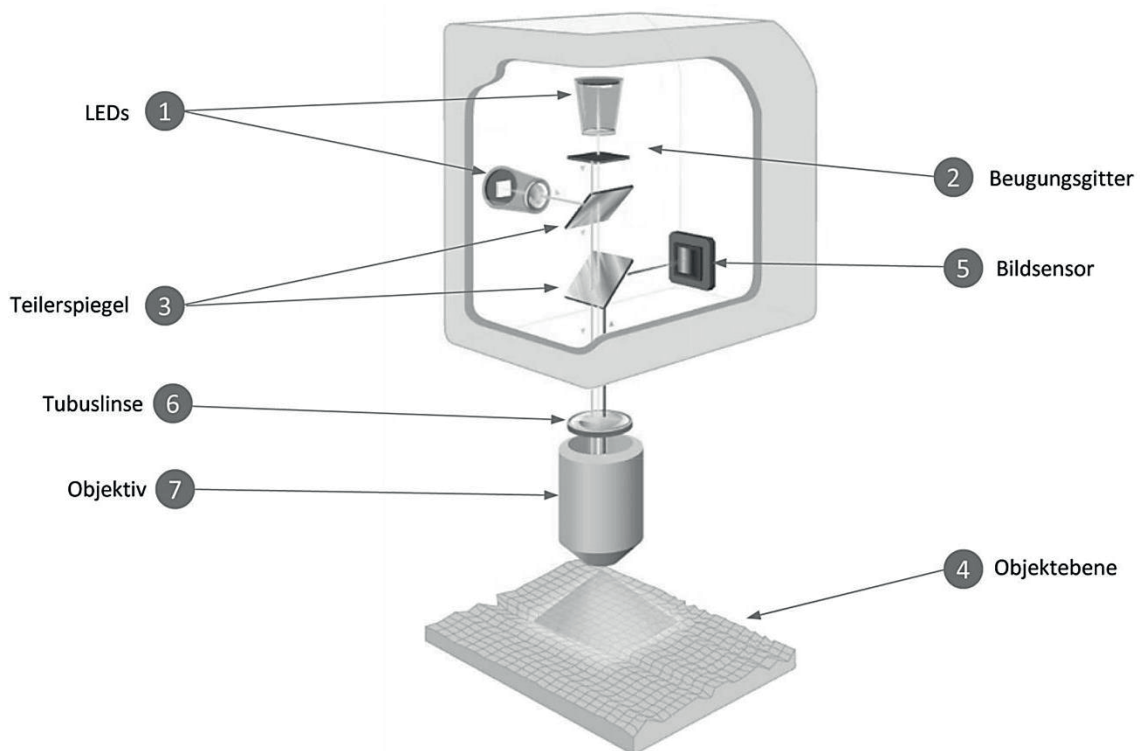


Abb. 3: Optische Elemente des Scan-Moduls ConfoCam[®] und Mikroskop

Nach dem Durchlaufen aller Höhenebenen der Oberfläche wird eine Punktwolke der Oberfläche berechnet. Das Prinzip der Topographiebestimmung wird in Abbildung 4 verdeutlicht.

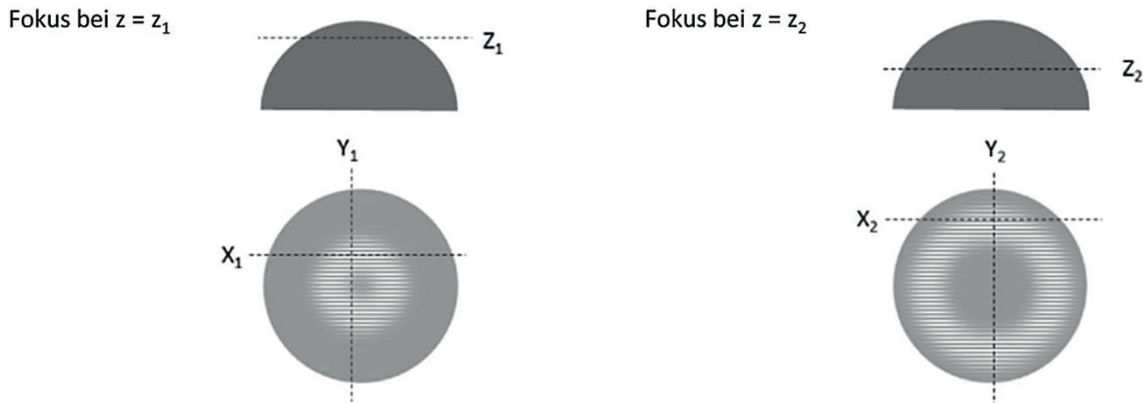


Abb. 4: Prinzip der Topographiebestimmung mit patentierten Konfokal-Messtechnik von Confovis am Beispiel einer Kugelkappe (oben: Schnittansicht, unten: Draufsicht)

Das Gitter mit Phasenlage 0° und 180° wird in der Fokusebene des Objektivs scharf abgebildet und es ergibt sich ein starker Kontrast zwischen den Einzelbildern. Außerhalb der Fokusebene wird das Gitter nicht scharf abgebildet, so dass zwischen den Einzelbildern nur ein sehr geringer Kontrast berechnet wird.

Abbildung 5 zeigt einen typischen Kontrastverlauf für einen Pixel des Bildes, wie er sich nach Durchlaufen des z -Bereiches ergibt. Die z -Position jedes Pixels wird durch die Lage des Maximums des Kontrastverlaufes bestimmt. Man erhält für jeden Bildpunkt eine nur aus dem axialen Kontrastverlauf berechnete Höheninformation.

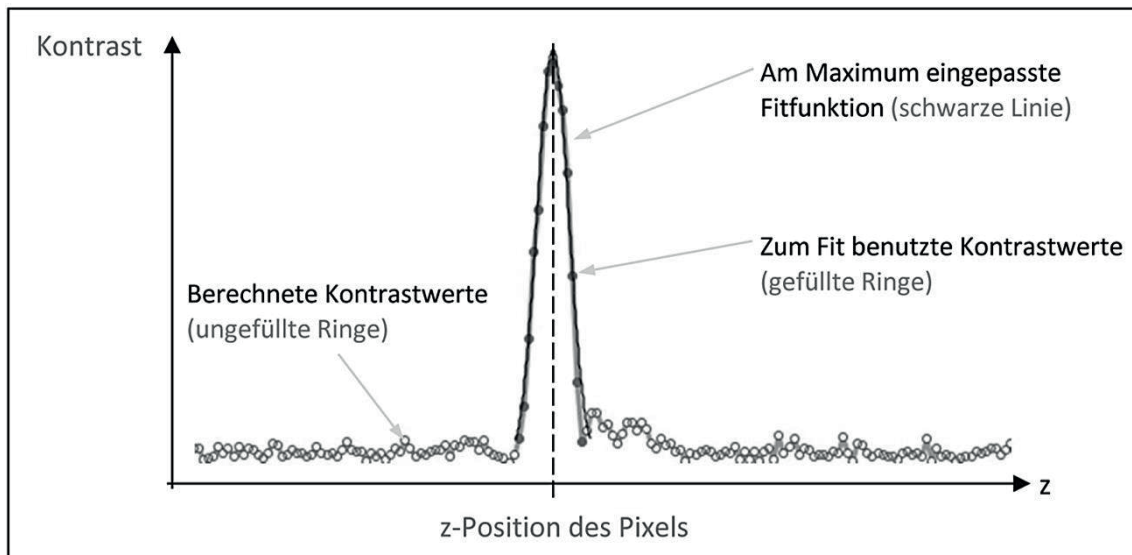


Abb. 5: Kontrastverlauf eines Pixels in Abhängigkeit der z -Position des Fokus und anhand des Kontrastmaximums berechnete z -Position

4. FOKUSVARIATION

Bei der Messung im Modus „Fokusvariation“ wird die Probe mit weißem LED-Licht koaxial und/oder einem LED-Ringlicht am Objektiv beleuchtet und das von der Probe reflektierte Licht von einem Sensor aufgenommen. Die Abbildung hat nur eine geringe Schärfentiefe, deshalb sind nur jene Bereiche der Probe scharf, die sich im Fokus des Objektivs befinden.

Im Messprozess (Abbildung 6) wird die zu untersuchende Probe oder das Objektiv entlang der optischen Achse (z-Achse) bewegt (1). Dabei verändert sich der Abstand zwischen Objektiv und Probe (2). Der Fokus bewegt sich ebenfalls und in jeder Höhe sind gerade jene Bereiche scharf abgebildet, die sich im Fokus befinden (3), während die anderen Bereiche unscharf abgebildet werden.

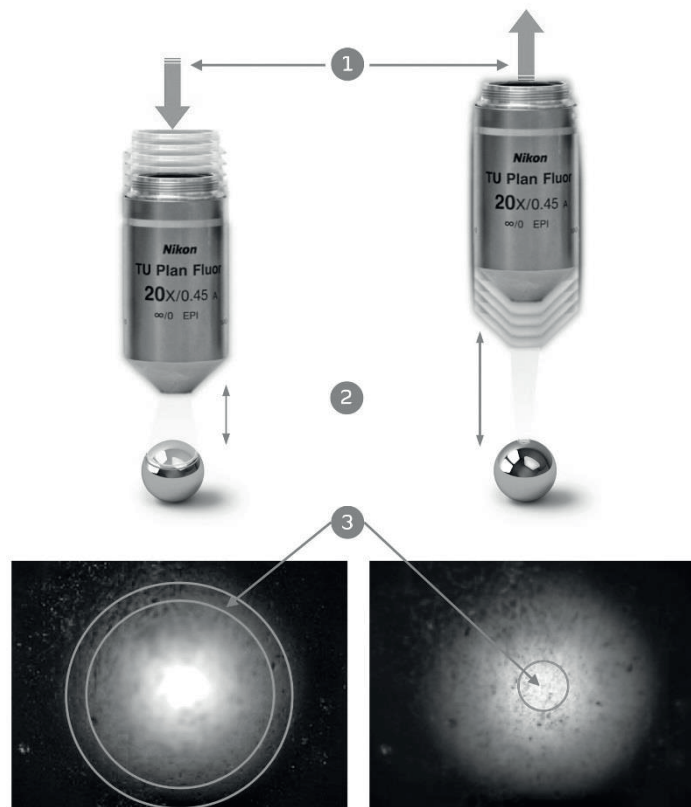


Abb. 6: Prinzip der Fokusvariations-Messung

Die Schärfe der Abbildung in Abhängigkeit von der Höhe ermöglicht die Ermittlung der Höhe z für jeden Punkt auf der xy -Ebene. Diese Höheninformation kann dann für eine topographische Darstellung der gemessenen Oberfläche verwendet werden.

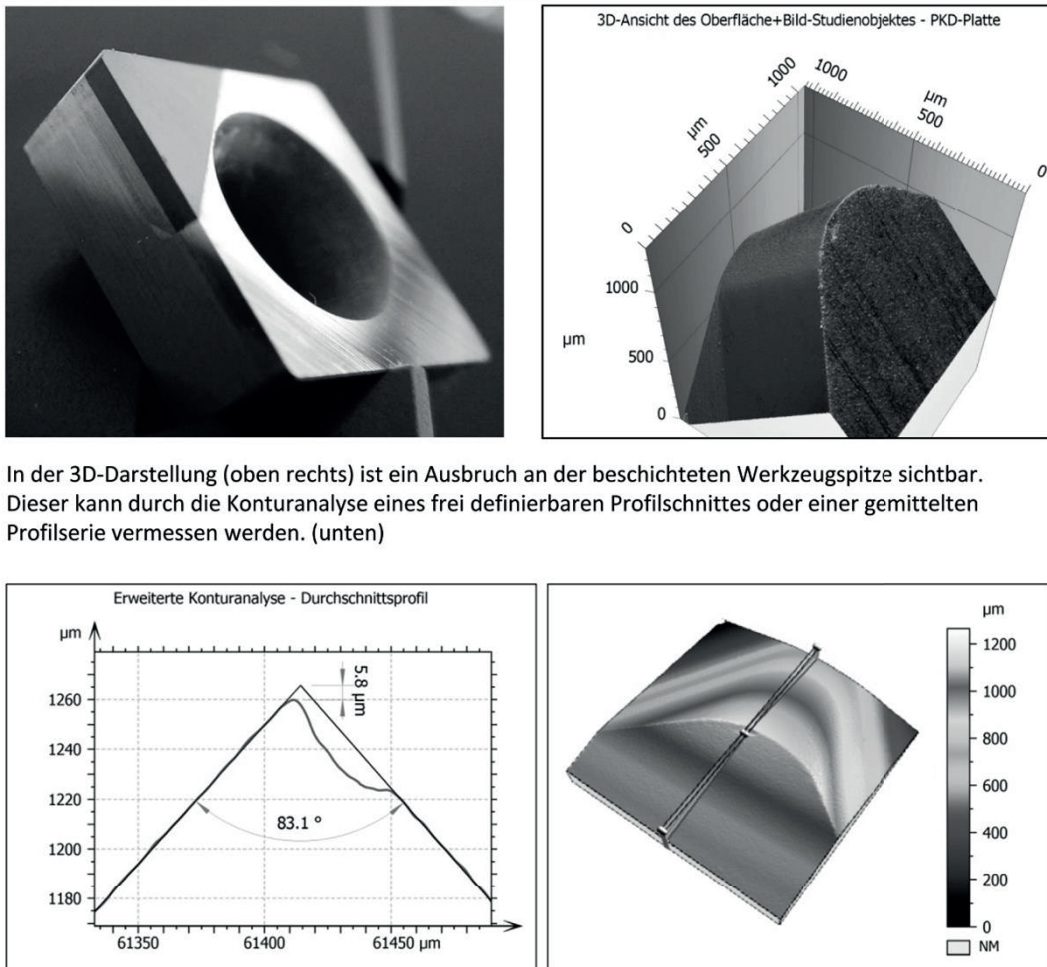


Abb. 7: Messung einer PKD-Wendeschneidplatte mit Fokusvariation

5. MESSDATENAUSWERTUNG

Bei der auf Normen rückführbaren Rauheitsauswertung von Oberflächen hat sich die Software MountainsMap[®] des Herstellers Digital Surf durchgesetzt. Unabhängig von der Generierung der Messdaten kann MountainsMap[®] diverse Formate auswerten und umfangreiche Berichte erstellen. Dem Nutzer stehen auch Qualitätskenngrößen, wie z.B. die Anzahl der nicht gemessenen Punkte in Prozent oder Hybridwerte wie Sdq (mittlerer quadratischer Gradient) zur Verfügung.

Die Korrelation zu taktilen Rauheitsmessungen, wie sie die DIN EN ISO 4287/4288 [2010, 1997] und DIN EN ISO 13565 [1998] vorschreiben, können mit flächig generierten Messungen erreicht werden, indem Einzelprofile oder gemittelte Profile aus den flächigen Werten extrahiert und den mit Tastschnitt ermittelten Profilen gegenübergestellt werden.

So ist es für die Anwender möglich an etablierten Raunormalen, wie an dem superfeinen Halle Raunormal KNT 4070/03 die Korrelation zwischen taktiler und optischer Messung anhand von eindimensionalen Strukturen nachzuweisen (Abbildung 8).

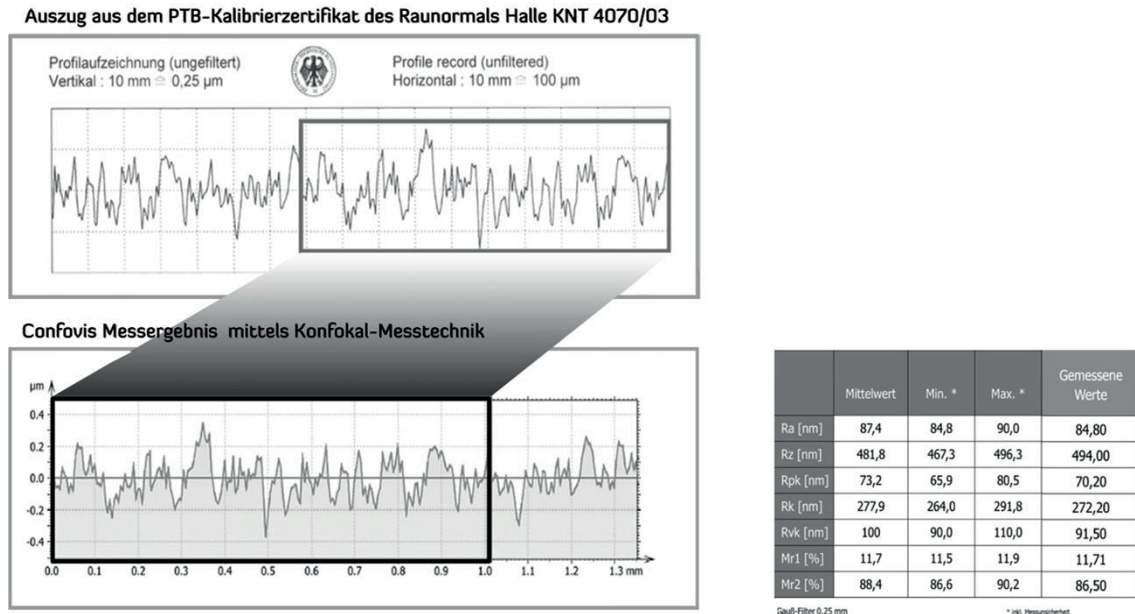


Abb. 8: Bestimmung der Parameter Ra, Rz, Rpk, Rvk, Rk, Mr1, Mr2 am von der PTB zertifizierten superfeinen Halle-Raunormal

Insbesondere geben die Kuppen- und Rillenwerte der DIN EN ISO 13565 [1998] einen Aufschluss über die Qualität der optischen Messung. Im nächsten Schritt ist eine Überleitung zur flächigen Norm DIN EN ISO 25178 [2012] möglich. Vorsicht ist hier jedoch bei der Verifizierung der Böschungswinkel am tatsächlichen Messobjekt geboten. Zusätzlich kann die laterale Auflösung eine Grenze darstellen, wenn es um Droplets und herausgebrochene Droplets an beschichteten Oberflächen geht.

Da optische Messverfahren in Abhängigkeit vom physikalischen Prinzip ihre Grenzen haben, sind zwei Faktoren zu berücksichtigen:

- Beim konfokalen Messverfahren können an Flankenwinkeln die oberhalb des Akzeptanzwinkels des Objektivs liegen, Überschwinger an Kanten auftreten, sogenannte Messartefakte.
- Bei der Fokusvariation entstehen bei Oberflächen mit geringen Kontrastdifferenzen Messpunkte, die nicht der realen Struktur entsprechen und so eine vielfach zu hohe Rauheit suggerieren.

Ein Abgleich zu einem Normal mit einer Oberfläche, die der zumessenden Oberfläche so nah wie möglich kommt, kann hier Klarheit bringen, welches Messverfahren anzuwenden ist. Pauschal lässt sich feststellen, dass das konfokale Verfahren für Oberflächen mit einem Rz-Wert unter 1 μ m besser funktioniert.

Zur Auswertung von Form- und Konturmessungen stehen aktuell keine Normen zur Verfügung. Marktführer in der Auswertung von Schneidkanten ist derzeit die Firma Alicona, die eigene Auswertealgorithmen entwickelt hat. Da Alicona Messung und Auswertung nur kombiniert anbietet, können Messwerte, die mit unterschiedlichen Messverfahren und Messgeräten generiert wurden, nicht miteinander verglichen werden.

Für Werkzeughersteller, Anwender dieser Werkzeuge sowie Beschichtungsdienstleister ist die Charakterisierung von Schneidkanten nach allgemeinen Standards jedoch wichtig. Dementsprechend wurde im Rahmen der Sitzung des VDI/VDE-GMA Fachausschusses 3.41 im Fachbereich Fertigungsmesstechnik am 01.06.2016 beschlossen, das Thema „Charakterisieren und Messen von Schneidkanten“ im VDI aufzugreifen. Als Ergebnis der ersten Sitzung des daraufhin neugebildeten Fachausschusses 3.64 „Charakterisieren und Messen von Schneidkanten“ wurde unter anderem als Zielstellung beschlossen, dass die Vorgehensweise beim Messen sowie die Auswertung der Messung an Schneidkanten in einer VDI-Richtlinie festgelegt werden soll. Die Umsetzung dieser Richtlinie liegt einerseits bei den Herstellern von Messtechnik, andererseits ermöglicht der normative Charakter einer VDI-Richtlinie unabhängigen Dienstleistern die herstellerunabhängige Umsetzung der Auswertung von Messungen an Schneidkanten. Confovis begrüßt als Messgerätehersteller die geplante Standardisierung der Kantenmessung und -auswertung.

6. FAZIT

Die Anforderungen an die Vermessung von technischen Oberflächen auf Werkstücken und Werkzeugen steigen. Auf den Werkstücken fordern besondere funktionale Oberflächen wie spiegelnde Beschichtungen die Messtechnik heraus. An Werkzeugen, insbesondere mit Schneidkanten, erhöhen sich die Anforderungen ebenso. Die Arbeiten an dem Thema „Charakterisieren und Messen von Schneidkanten“ generieren sehr exakte Anforderungen für die Ermittlung z.B. der Ablösepunkte, die eine hohe Messpunktedichte auch für Konturanalysen notwendig macht. Um möglichst alle Anforderungen mit nur einem Messgerät in der höchstmöglichen Genauigkeit und großer Flexibilität erfüllen zu können, ist ein Messgerät mit zwei Messprinzipien wie der Konfokalmessung mit Strukturierter Beleuchtung und Fokusvariation sehr gut geeignet.

7. QUELLEN

- [4287, 2010] DIN EN ISO 4287: 2010: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth-Verlag, Berlin, 2010.
- [4288, 1997] DIN EN ISO 4288: 1998: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren –

- Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth-Verlag, Berlin, 1997.
- [13565, 1998] DIN EN ISO 13565: 1998: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften. Beuth-Verlag, Berlin 1998.
- [25178, 2012] DIN EN ISO 25178: 2012: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft. Beuth-Verlag, Berlin 2012.

KALIBRIERUNG KLEINER RADIEN MITTELS TASTSCHNITTGERÄT

Peter Thomsen-Schmidt, Uwe Brand

PTB Braunschweig und Berlin, AG 5.11, Peter.thomsen-Schmidt@ptb.de

Abstract: Zur Charakterisierung von Schneidkanten und sphärischen Mikro-Formnormalen werden häufig optische Messverfahren verwendet, um schnell und zerstörungsfrei Ergebnisse zu erhalten. Für die Kalibrierung der unterschiedlichen Mikroskope werden taktile Referenzmessungen benötigt. Zur Erledigung dieser Aufgabe wird in der PTB ein hochauflösendes, metrologisches Tastschnittgerät mit einer linearen Taststiftführung und interferometrischem Messsystem eingesetzt. Die Analyse der Profile erfolgt mittels Filterung durch eine kubische Spline Funktion nach DIN EN ISO 16610-22 und krümmungsbasierender Formerkennung. Die Bestimmung des Radius erfolgt unter Verwendung eines konventionellen Kreisfit sowie mittels Krümmungsanalyse. Einen Schwerpunkt der Kalibrierung bildet die Beurteilung der Formfehler der Tastspitze, da diese den größten Beitrag zur Messunsicherheit liefern. Die Charakterisierung der Tastspitze erfolgt durch topographische Profilmessungen an einer kalibrierten Rubinkugel. Als Ergebnis erhält man dabei die Form der Tastspitze inklusive der Formabweichungen der Rubinkugel.

KEYWORDS: TAKTILE MIKROFORMMESSUNG, KRÜMMUNGSANALYSE, RADIENBESTIMMUNG

1. EINLEITUNG

Die taktile Kalibrierung von Mikroformen und kleiner Radien im Bereich zwischen 20 μm und 1 μm stellt sehr hohe Anforderungen an die Eigenschaften des verwendeten Messgerätes. Für derartige Untersuchungen bieten sich konventionelle Tastschnitt- und Mikroformmessgeräte an. In der Regel verfügen diese Geräte über eine Vorschubachse, entlang der der zu untersuchende Prüfling oder die Tastnadel bewegt wird. Der lineare Vorschub erfolgt oft über Spindeln und vorgeschaltete Getriebe was zu Fehlern im Gleichlauf führt, wenn sich der Encoder zur Regelung des Antriebes auf der Achse des Motors befindet. Weiter werden häufig Tastköpfe mit Hebelarmen eingesetzt, die einen sogenannten Bogenfehler aufweisen. Diesen Fehler kann man im Prinzip korrigieren, dazu benötigt man allerdings die genaue Länge des Hebelarmes der die Tastspitze trägt. Zur genauen Bestimmung der Hebellänge ist es wiederum wichtig die Form der Tastspitze zu kennen. Mit derartigen Geräten fällt es daher schwer, eine taktile Radienkalibrierung zu realisieren, die mit der Präzision optischer Formmessgeräte vergleichbar ist. Die taktile Kalibrierung von Radien und Formen stellt jedoch gegenüber den optischen Verfahren der Oberflächenmesstechnik eine unabhängige und mathematisch einfacher zu beschreibende Methode dar. Sie bietet bei ausreichender Präzision die Möglichkeit, systematische Fehler in optischen Geräten zu erkennen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Tastschnittgerät verwendet, welches unter Berücksichtigung metrologischer Gesichtspunkte aufgebaut wurde. Das mit zwei äquivalenten Vorschubachsen ausgerüstete Gerät weist nur noch minimale Gleichlaufschwankungen auf. Es verfügt über einen Tastkopf, der einen linear bewegten Taststift enthält und damit keinen Bogenfehler aufweist [TS, 2008], [TS, 2011]. Besonderen Wert wurde auf die Bestimmung des mittleren Radius der Tastspitze über den vollen Öffnungswinkel von nominell 90° gelegt. Im Rahmen der Messungen an einem Radiennormal wurde zudem eine krümmungsbasierende Auswertetechnik eingesetzt, mit der Formabweichungen erkannt und analysiert werden können. Die Radien des zu kalibrierenden Normals konnten mit einer Unsicherheit von $0,11\text{ }\mu\text{m}$ kalibriert werden [TS, 2016].

2. BESCHREIBUNG DER PROBE

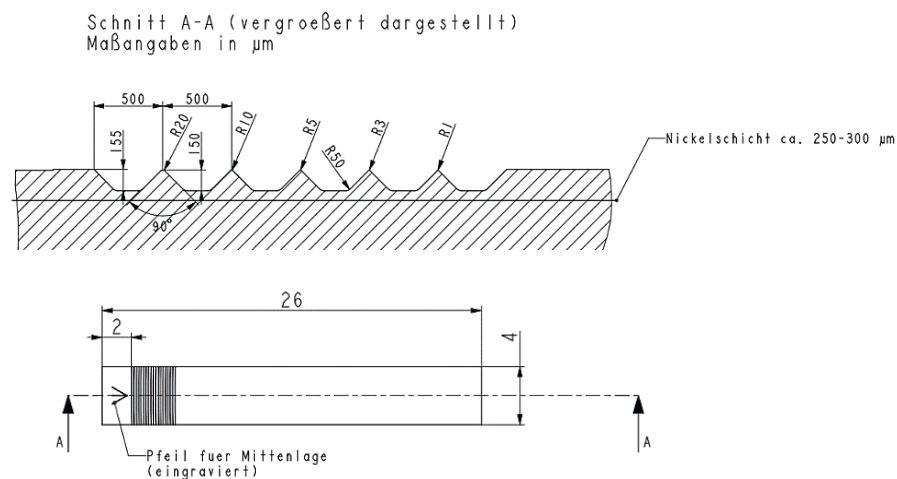


Abb. 1: Schnittzeichnung des verwendeten Radiennormals und Ansicht von oben (Maßangaben in mm, Quelle: Alicona Imaging GmbH)

Die Abbildung 1 zeigt eine Schnittzeichnung der Probe mit Maßangaben. Es handelt es sich um ein Konturnormal der Firma Halle Präzisions-Kalibriernormale GmbH, Ident Nr.: 9030-01 ID 6536, welches zur Charakterisierung von optischen Messgeräten eingesetzt werden soll. Vom gleichen Hersteller gibt es sehr ähnliche Tastspitzenprüfnormale unter der Bezeichnung KNT. Die zu untersuchenden fünf Radenstrukturen wurden in eine $250 - 300\text{ }\mu\text{m}$ dicke Nickelschicht eingebracht. Entsprechend der Schnittzeichnung haben alle 5 Kegelwinkel jeweils einen Sollöffnungswinkel von 90° . Die Spitzen der Kegel haben jeweils einen Abstand von $500\text{ }\mu\text{m}$ zueinander. Die nominellen Radien der Kegelspitzen betragen 20, 10, 5, 3 und $1\text{ }\mu\text{m}$. Die Höhe der einzelnen Kegel ist mit $150\text{ }\mu\text{m}$ angegeben.

3. UNSICHERHEIT DES TASTSCHNITTGERÄTES

Das verwendete Tastschnittgerät ist mit einem luftgelagerten x-y-Tisch zur Probenbewegung ausgerüstet. Der Antrieb beider Achsen erfolgt direkt über Tauchspulen. Die optischen Linearencoder (LIP 481) zur Positionserfassung befinden sich jeweils auf der bewegten Achse und arbeiten mit einer Auflösung von 0,1 nm. Der Abstand der Positionsmarken der Encoder beträgt 2 μm , da die analogen Ausgangssignale manuell eingestellt und nicht nachträglich korrigiert wurden, weist der Gleichlauf der Achsen jeweils eine geringe Modulation auf (Amplitude < 20 nm). Innerhalb des Tastkopfes befindet sich eine luftgelagerte Achse mit einem Permanentmagneten und einem Spiegel am oberen Ende. Am unteren Ende ist die Tastspitze befestigt. Der Permanentmagnet ist stark genug um den Taststift, der ein Gewicht von ca. 1g hat, zu tragen. Der Magnet befindet sich innerhalb einer Spule mit deren Hilfe die Antastkraft des Taststiftes geregelt werden kann. Der Spiegel dient als Reflektor für das Interferometer (Typ RLE, Auflösung 0,1 nm). Das Interferometer dient zur rückgeführten Positionserfassung des Taststiftes, gleichzeitig liefert es das Signal für die Regelung der Antastkraft. Der z-Messbereich beträgt $\pm 120 \mu\text{m}$. Die Steuerung der Antastkraft erfolgt im zentralen Controller (XPS) in Echtzeit. Aufgrund seiner Geometrie kann mit dem Tastkopf sowohl in x- als auch in y-Richtung gemessen werden. Diese Fähigkeit und die Tatsache, dass der Taster keinen Bogenfehler aufweist, erlauben eine relativ einfache Charakterisierung der Form der Tastspitze (nomineller Radius 2 μm , Öffnungswinkel 90°). Dazu werden Profilmessungen an einer kalibrierten Rubinkugel mit einem mittleren Radius von $1,000786 \text{ mm} \pm 50 \text{ nm}$ vorgenommen. Die Profilmessungen erfolgten für beide Achsen des Tastschnittgerätes auf einer Strecke von 800 μm Länge jeweils auf der Äquatorlinie der Rubinkugel. Im Rahmen der Berechnung des Radius der Tastspitze in x- und y-Richtung wurde jeweils der Scherungswinkel der z-Achse zur x-y-Ebene des Tastschnittgerätes ermittelt und berücksichtigt. Der Scherungswinkel für die x-Richtung beträgt $0,363^\circ$, für die y-Richtung liegt er bei $0,063^\circ$. Der mittlere Tastspitzenradius in x-Richtung beträgt 1,63 μm für einen Öffnungswinkel von $88,91^\circ$. In y-Richtung beträgt der mittlere Tastspitzenradius 1,93 μm für einen Öffnungswinkel von $89,91^\circ$.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick der Beiträge einzelner Komponenten des Tastschnittgerätes zur erweiterten Unsicherheit der Messdaten. In der Tabelle werden hierzu drei unterschiedliche Arten der Messung unterschieden. In der einfachen Profilmessung z. B. zur Rauheits- oder Stufenhöhenbestimmung spielt die Form der Tastspitze und die Langzeitstabilität des Gerätes kaum eine Rolle. Aus Gründen der Vollständigkeit wurde die Unsicherheit des x-Encoders hier mitberücksichtigt. Die zweite Konfiguration betrifft die topographische Rauheitsmessung und die dritte die Mikroformmessung mit Berücksichtigung der Form der Tastnadel. Der Druck, der für den Betrieb der Luftlager des x-y-Tisches und des Tastkopfes erforderlich ist, wird mittels spezieller Druckcontroller (MKS641A) auf $6,4 \text{ bar} \pm 1 \text{ mbar}$ geregelt. Der Vordruck beider Lager im Tastkopf beträgt $1,41 \text{ bar} \pm 1 \text{ mbar}$. Die Gleichlaufeigenschaften der x- und y-Achse wurde mit Hilfe eines externen Interferometers (SP 2000) untersucht.

Komponente	Gerät	Beitrag erweiterte Messunsicherheit [nm]		
		Profil	Topo	Form/Radius
x-Encoder / x-Achse	LIP 481 R, XPS	22.91	22.91	22.91
y-Encoder / y-Achse	LIP 481 R, XPS	0.55	22.92	22.92
z-Drift / z-Achse	LIP 481 R, XPS	0.84	0.84	0.84
z-Interferometer / Taststift	RLE 10, XPS	3.57	3.92	3.92
Druck x-Achse / y-Achse	MKS641A, (SP2000)	1.41	1.41	1.41
Temperatur / Granitbrücke	Pt100, (MGC)		4.48	4.48
Spitzenform	Diamantspitze			100
Summe		23.25	32.99	105.30

Tab. 1: Beiträge der Komponenten des Tastschnittgerätes zur erweiterten Unsicherheit für Einzelprofil-, topographische Rauheits- und Mikroformmessungen

4. AUTOMATISCHE PROFILANALYSE

Die Abbildung 2 beschreibt in drei Diagrammen die krümmungsbasierende, automatische Analyse von Einzelprofilmessungen am 20 μm Kegelwinkel des Radiennormals (s. Abb. 1).

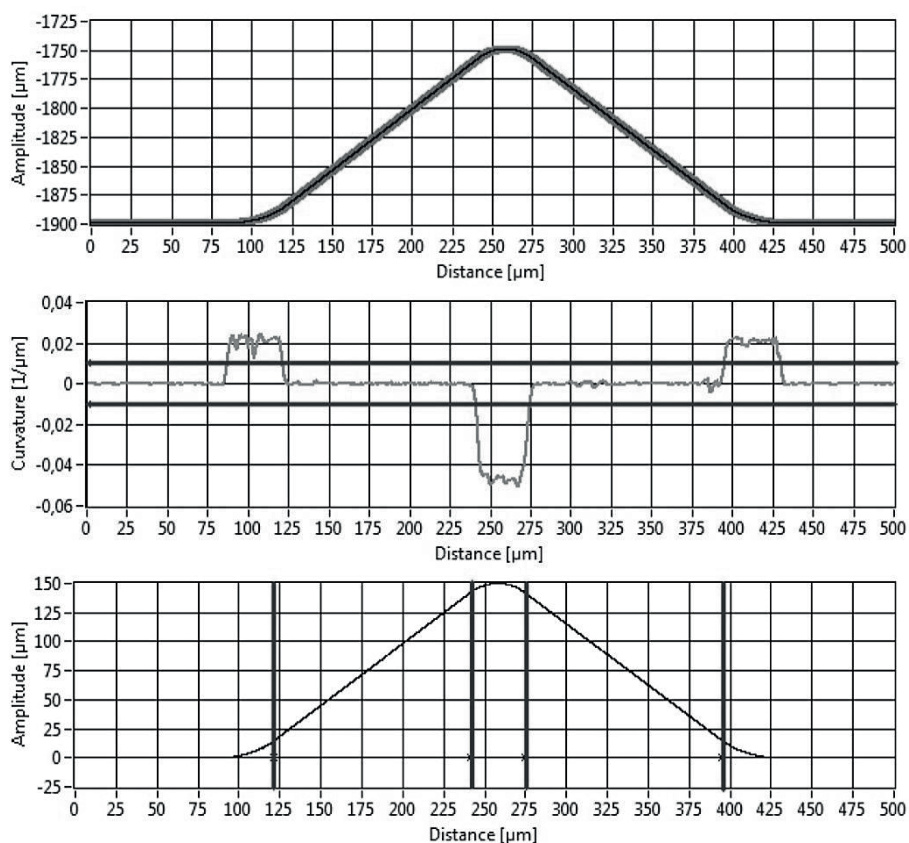


Abb. 2: Arbeitsweise der krümmungsbasierenden Profilerlegung in einzelne Formelemente: Oben: Ausgangsprofil, Mitte: Krümmungsdaten mit oberem und unterem Schwellwert, unten: Ausgerichtetes Profil mit Grenzen der Profilelemente

Die dunkle, schmale Linie im oberen Diagramm der Abbildung 2 zeigt ein gemessenes Profil, dahinter ist eine etwas breitere graue Linie sichtbar. Diese Linie repräsentiert eine kubische Splinefunktion, die an die gemessenen Daten angepasst wurde unter Verwendung einer Filterwellenlänge von $8\text{ }\mu\text{m}$. Die zugrundeliegende Rechenvorschrift für den Spline ist beschrieben in DIN EN ISO 16610-22 [ISO, 2015]. Mittels der Splinefunktion wird eine Tiefpassfilterung der Profildaten vorgenommen. Anschließend wird die Krümmung der Splinefunktion berechnet. Die Krümmung ist im mittleren Diagramm der Abbildung 2 als graue Kurve dargestellt. In das Diagramm sind zusätzlich zwei waagerechte Linien eingetragen. Diese Linien entsprechen Grenzwerten bei deren Über- oder Unterschreiten jeweils Marken innerhalb des Profils gesetzt werden. Dabei wird ausgenutzt, dass ein lineares Element die Krümmung Null hat und ein sphärisches Formelement eine konstante Krümmung aufweist. So legen der erste und der letzte Schnittpunkt der grauen Kurve mit der oberen waagerechten Linie zwei Bereiche am Anfang und am Ende des Profils fest, mit deren Hilfe das gesamte Profil durch Verwendung einer Rotationsoperation ausgerichtet wird. Eine projektive Ausrichtung, wie sie in der Rauheitsmessung üblich ist würde zu einer Verzerrung der zu untersuchenden Formelemente führen.

Im unteren Diagramm der Abbildung 2 ist das ausgerichtete Profil mit vier senkrechten Linien gezeigt. Diese Linien markieren in der Mitte des Profils den sphärischen Bereich, dessen Radius kalibriert werden soll und daran angrenzend die Steigungen, die den Öffnungswinkel der Kegelecke beschreiben. Die zur Ausrichtung des Profils verwendeten Marken wurden in das untere Diagramm nicht eingetragen. Innerhalb des sphärischen Bereiches in der Mitte des Profils wird die Form der Tastspitze im Rahmen der Radiusbestimmung berücksichtigt. Das Intervall für die Untersuchung der Sphärizität wird durch das Maximum der Profilkurve bestimmt. Dazu wird die Sollsehnenlänge aus dem angegebenen Öffnungswinkel und dem Nennradius berechnet. Der Algorithmus zur Entfaltung des Profils verwendet ein Modell der Tastspitze. Das Array mit den berechneten Daten der Tastspitze hat dabei eine Breite von $2,82\text{ }\mu\text{m}$ und wird Punkt für Punkt in einer konstanten Höhe über das gemessene Profil bewegt. Bei jedem Schritt wird untersucht, an welcher Stelle der geringste Abstand der z-Werte des Spitzenarrays zum gemessenen Profil vorliegt. Auf diese Weise findet man jeweils den Berührungspunkt der Tastspitze mit der Oberfläche des Prüflings und subtrahiert an dieser Stelle den Radius der Tastspitze. Das arraybasierende Verfahren ist unempfindlich gegenüber Gräben und Stellen mit zwei Berührungspunkten im Array. Das entfaltete Profil ist anschließend am Anfang und am Ende um $1,41\text{ }\mu\text{m}$ kürzer als das Ausgangsprofil. Diesen Nachteil kann man allerdings ausgleichen, indem man die auszuwertende Profillänge jeweils um die Sollsehnenlänge der zu untersuchenden Kegelecke verlängert.

5. ERGEBNISSE

In erster Linie besteht Interesse an den Radien, dazu wurden jeweils 11 parallele Profile mit einer Länge von 500 μm für jede Radienstruktur aufgenommen. Die Profile haben einen Abstand von 100 μm zueinander, das erste Profil hat einen Abstand von 500 μm zur Mittellinie des Normals. Die Profile der ersten drei Radienstrukturen bestehen aus jeweils 50.000 Daten. Für die Strukturen mit den kleineren Radien von 3 μm und 1 μm bestehen die Profile aus 100.000 Datenpunkten. Während der Messungen wurde die Antastkraft auf maximal 240 μN eingestellt. Im Rahmen der Auswertung wurde innerhalb des oben beschriebenen Sollsegmentes ein Kreisfit zur Radiusberechnung eingesetzt sowie ein krümmungsbasierender Algorithmus. Zur Krümmungsberechnung wurde das gemessene Profil, wie im beschriebenen Fall der Zerlegung, mit einer Splinefunktion gefiltert. Die jeweilige Filterwellenlänge wird dabei an den betrachteten Radius angepasst, indem der Nennradius durch 2,5 dividiert wird. Anschließend wird die Krümmung der berechneten Splinefunktion bestimmt. Für die Krümmungswerte kann danach in einfacher Weise der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt werden. Der Kehrwert des Mittelwertes der Krümmung repräsentiert den mittleren Radius im betrachteten Intervall. Die Standardabweichung erlaubt eine Abschätzung der Radiusschwankungen und man kann leicht die mittleren Koordinaten des Krümmungsmittelpunktes bestimmen, dessen Lage wiederum mit den Koordinaten des Mittelpunktes aus dem Kreisfit verglichen werden kann. Die Tabellen 2 und 3 geben einen Überblick zu den Radiuswerten, die für alle Radienstrukturen nach beiden Verfahren bestimmt wurden. Die Tabelle 2 gibt dabei die Daten für die Messungen in der x-Richtung des Tastschnittgerätes wieder und die Tabelle 3 für die Messung in y-Richtung des Gerätes.

Struktur	$R_{\text{Kreisfit}} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{Krümmung}} [\mu\text{m}]$	Sehnenlänge $[\mu\text{m}]$
Kegelecke 1	19.776 ± 0.009	20.507 ± 0.008	28.149 ± 0.011
Kegelecke 2	9.808 ± 0.015	10.366 ± 0.009	14.443 ± 0.044
Kegelecke 3	4.766 ± 0.005	5.212 ± 0.009	7.322 ± 0.012
Kegelecke 4	2.283 ± 0.005	3.000 ± 0.008	4.241 ± 0.012
Kegelecke 5	0.837 ± 0.023	1.095 ± 0.015	1.547 ± 0.021

Tab. 2: Radien und Sehnenlängen für alle Kegelecken gemessen in x-Richtung

Struktur	$R_{\text{Kreisfit}} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{Krümmung}} [\mu\text{m}]$	Sehnenlänge $[\mu\text{m}]$
Kegelecke 1	19.801 ± 0.007	20.426 ± 0.006	28.279 ± 0.010
Kegelecke 2	9.832 ± 0.009	10.276 ± 0.009	14.334 ± 0.012
Kegelecke 3	4.841 ± 0.020	5.169 ± 0.019	7.262 ± 0.027
Kegelecke 4	2.276 ± 0.006	3.000 ± 0.014	4.242 ± 0.020
Kegelecke 5	0.889 ± 0.013	1.067 ± 0.013	1.507 ± 0.019

Tab. 3: Radien und Sehnenlängen gemessen für alle Kegelecken in y-Richtung

Ein Vergleich der Daten in den Tabellen 2 und 3 zeigt, dass die Radien aus dem Kreisfit eine maximale Differenz von 75 nm für die Radienstruktur 3 aufweisen. Für die Krümmungsdaten liegt die maximale Differenz von 89 nm für die Radienstruktur 2 vor. Die Ergebnisse liefern ein konsistentes Bild im Rahmen der erweiterten Messunsicherheit. Auffällig ist allerdings, dass der Kreisfit systematisch kleinere Radien liefert als die krümmungsbasierte Methode. Zur Analyse des Sachverhaltes sollen die Standardabweichungen der Krümmungsradien betrachtet werden. Indem die Standardabweichung der Krümmung jeweils zum Mittelwert der Krümmung addiert bzw. davon abgezogen wird, erhält man einen oberen und einen unteren Unsicherheitswert für die Radienschwankungen aus dem krümmungsbasierten Verfahren. Die Daten dazu sind in den Tabellen 4 und 5 zusammengefasst.

Struktur	$R_{\text{Krümmung}} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{K-unt}} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{K-oben}} [\mu\text{m}]$
Kegelecke 1	20.507 ± 0.007	18.444 ± 0.022	23.090 ± 0.035
Kegelecke 2	10.366 ± 0.009	9.018 ± 0.040	12.188 ± 0.077
Kegelecke 3	5.212 ± 0.009	4.280 ± 0.011	6.662 ± 0.038
Kegelecke 4	3.000 ± 0.008	1.763 ± 0.017	10.102 ± 0.514
Kegelecke 5	1.095 ± 0.015	0.650 ± 0.021	3.600 ± 0.674

Tab. 4: Mittelwerte der Radien und Sehnenlängen gemessen für alle Kegelecken in y-Richtung

Struktur	$R_{\text{Krümmung}} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{K-unt}} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{K-oben}} [\mu\text{m}]$
Kegelecke 1	20.426 ± 0.006	18.270 ± 0.016	23.159 ± 0.037
Kegelecke 2	10.276 ± 0.009	8.861 ± 0.027	12.229 ± 0.068
Kegelecke 3	5.169 ± 0.019	4.159 ± 0.102	6.844 ± 0.313
Kegelecke 4	3.000 ± 0.014	1.693 ± 0.015	13.294 ± 1.589
Kegelecke 5	1.067 ± 0.013	0.667 ± 0.046	3.032 ± 1.269

Tab. 5: Radien und Sehnenlängen gemessen für alle Kegelecken in y-Richtung

Die berechneten Mittelwerte für die obere und die untere Schwankungsbreite des mittleren Radius sind relativ groß. Auffallend ist, dass der mittlere Radius aus dem Kreisfit in den Tabellen 2 und 3 immer zwischen dem mittleren Radius aus der Krümmung und deren unterem Grenzwert liegt. Weiter fällt auf, dass der obere Grenzwert der Radiusunsicherheit relativ weit vom Mittelwert entfernt liegt. Extrem fällt dieses Verhalten im Fall der Radienstruktur 4 auf. Die beschriebenen Eigenschaften treten in beiden Messrichtungen x und y auf.

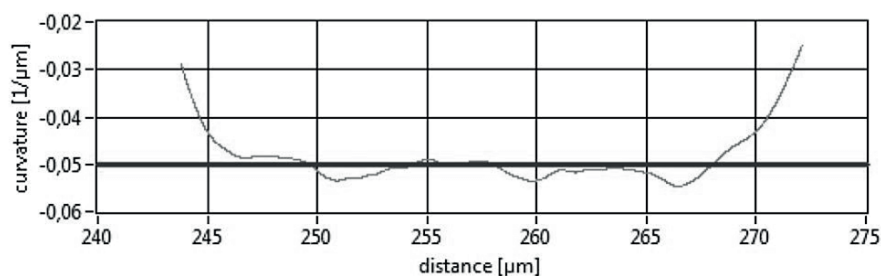


Abb. 3: Krümmung der Radienstruktur 1 aus einer Profilmessung in x-Richtung

Zur Analyse der beschriebenen Krümmungseigenschaften soll die Krümmung der Radienstruktur 1 genauer betrachtet werden. Die Abbildung 3 zeigt die Krümmung (graue Kurve) wie sie aus einem in x-Richtung gemessenen Profil berechnet wurde. Die waagerechte Linie im Diagramm beschreibt den Sollwert der Krümmung im betrachteten Intervall mit der Länge der Sollsehne berechnet für einen Radius von 20 μm und einem Öffnungswinkel von 90°. Es ist klar erkennbar, dass die Krümmungswerte an den Rändern des Intervalls zu klein sind. Offenbar treten am Rand des Intervalls erhebliche Formabweichungen auf. Schränkt man den Öffnungswinkel der betrachteten Radienstruktur auf 60° ein, dann verändern sich die Ergebnisse aus dem Radiusfit und der Krümmungsmethode signifikant, wie den Tabellen 6 und 7 für beide Messrichtungen zu entnehmen ist.

Struktur	R_{Kreisfit} [μm]	$R_{\text{Krümmung}}$ [μm]	$R_{\text{K-unten}}$ [μm]	$R_{\text{K-oben}}$ [μm]
Kegelecke 1	19.755 ± 0.021	19.476 ± 0.009	18.866 ± 0.035	20.127 ± 0.044
Kegelecke 2	9.782 ± 0.051	9.640 ± 0.023	9.053 ± 0.087	10.310 ± 0.078
Kegelecke 3	4.709 ± 0.016	4.689 ± 0.008	4.209 ± 0.025	5.293 ± 0.038
Kegelecke 4	2.179 ± 0.016	2.197 ± 0.006	1.623 ± 0.027	3.405 ± 0.103
Kegelecke 5	0.733 ± 0.028	0.877 ± 0.027	0.574 ± 0.022	1.887 ± 0.236

Tab. 6: Mittlere Radien und deren Grenzwerte gemessen in x-Richtung (Öffnungswinkel 60°)

Struktur	R_{Kreisfit} [μm]	$R_{\text{Krümmung}}$ [μm]	$R_{\text{K-unten}}$ [μm]	$R_{\text{K-oben}}$ [μm]
Kegelecke 1	19.916 ± 0.014	19.463 ± 0.009	18.621 ± 0.039	20.384 ± 0.046
Kegelecke 2	9.923 ± 0.023	9.632 ± 0.016	8.884 ± 0.058	10.520 ± 0.061
Kegelecke 3	4.912 ± 0.052	4.715 ± 0.021	4.042 ± 0.142	5.677 ± 0.268
Kegelecke 4	2.215 ± 0.013	2.160 ± 0.009	1.533 ± 0.020	3.663 ± 0.121
Kegelecke 5	0.849 ± 0.036	0.876 ± 0.020	0.606 ± 0.057	1.710 ± 0.437

Tab. 7: Mittlere Radien und deren Grenzwerte gemessen in y-Richtung (Öffnungswinkel 60°)

Durch die Einschränkung des Öffnungswinkels kommt es für beide Messrichtungen zu einer signifikanten Verringerung der Formabweichungen. Der Kreisfit liefert jetzt nicht mehr systematisch kleinere Radien als das krümmungsbasierende Verfahren. Aus den beiden letzten Spalten der beiden Tabellen 6 und 7 kann man jetzt einen Mittelwert berechnen und die Ergebnisse als Unsicherheit der mittleren Radien für die einzelnen Radienstrukturen bezeichnen.

6. DISKUSSION

Die Untersuchung der sphärischen Strukturen des Radiusnormals aus Abbildung 1 über den vollen nominellen Öffnungswinkel zeigt, dass entsprechend der Abbildung 3 im Randbereich des sphärischen Intervalls erhebliche Formabweichungen auftreten. Die Formabweichungen werden durch das Design der Probe verursacht. Es wurden lineare Formelemente mit der Krümmung null ohne stetigen Übergang mit sphärischen Formelementen

kombiniert, die eine konstante Krümmung aufweisen. Durch die Einschränkung des Öffnungswinkels wurde eine Übergangszone geschaffen, die keinen Einfluss auf die Bestimmung der Radien hat. In der Folge verringerten sich die Standardabweichungen der Krümmungen für alle Kegelecken und es konnte eine bessere Übereinstimmung der Ergebnisse aus dem konventionellen Kreisfit und den mittleren Krümmungswerten beobachtet werden. Bei der Entwicklung von zukünftigen Radiennormalen sollte der Gesichtspunkt der stetigen Formübergänge daher stärker berücksichtigt werden.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden taktile Messungen an einem Mikroformnormal zur Radienkalibrierung durchgeführt. Die Profilmessungen erfolgten in zwei Messrichtungen auf einem topographischen Tastschnittgerät unter Berücksichtigung des Tastspitzenradius. Für beide Messrichtungen konnten im Rahmen der Messunsicherheit übereinstimmende Ergebnisse erzielt werden. Eine krümmungsbasierende Auswertung der Profilmessungen unter Verwendung eines geeigneten kubischen Splinefilters erlaubt die automatische Zerlegung der gemessenen Profile in ihre Bestandteile und ergänzt die konventionelle Methode des Kreisfittes zur Radienbestimmung. Es konnte gezeigt werden, dass beim Design eines Normals stetige Übergänge zwischen den einzelnen Formelementen sinnvoll und wichtig sind für die Begrenzung von Formfehlern.

8. QUELLEN

- [TS, 2008] Thomsen-Schmidt, P.; Krüger-Sehm, R.: Calibration of an electromagnetic force compensation system. Proc. XII Int. Colloq. Surf., Chemnitz, Germany, 28-29 January, 2008, S. 323-327.
- [TS, 2011] Thomsen-Schmidt, P.: Characterization of a traceable profiler instrument for areal roughness measurement. Meas. Sci. Technol., 22 (2011) 094019.
- [TS, 2016] Thomsen-Schmidt, P.; Wolff, H.; Brand, U.: Characterization of a topographical metrological profiler instrument and subsequent calibration of a radii standard. Submitted to Meas. Sci. Technol. (2016).
- [ISO, 2015] ISO 16610-22:2015: Geometrical product specifications (GPS) – Filtration-Part 22: Linear profile filters: Spline filters.

AUTOMATISCHE 3D-AUSWERTUNG DER SCHNEIDKANTENQUALITÄT DURCH FOKUS-VARIATION

Reinhard Danzl¹, Franz Helml²

¹ Alicona, Grambach, Österreich, R&D, Reinhard.Danzl@alicon.com

² Alicona, Grambach, Österreich, R&D, Franz.Helml@alicon.com

Abstract: Ein wesentlicher Schritt bei der Herstellung von Wendeschneidplatten und Schaftwerkzeugen ist die Kantenpräparation, die einen enormen Einfluss auf verschiedene Bearbeitungseigenschaften wie Geschwindigkeit, Standzeit und Qualität hat. Hierbei ist entscheidend, dass der Werkzeug-Rohling vor der Verrundung keine Ausbrüche aufweist bzw. nur so kleine, dass diese durch den Verrundungsprozess eliminiert werden können. Wir stellen ein optisches Oberflächenmessgerät basierend auf Fokus-Variation vor, das solche Ausbrüche automatisch dreidimensional messen und in der Produktion ohne Expertenwissen bedient werden kann. Neben der Ermittlung einer Reihe von Parametern wie Anzahl, Länge und Volumen der Ausbrüche, werden diese auch farblich im gemessenen 3D Modell visualisiert. Die Funktionsweise des Geräts wird anhand verschiedener Werkzeuge demonstriert.

KEYWORDS: SCHNEIDKANTE, SCHARTIGKEIT, QUALITÄT, FOKUS-VARIATION, 3D

1. EINLEITUNG

In den letzten Jahre wurden vermehrt Messmöglichkeiten zur quantitativen Beurteilung der Schneidkantengeometrie (Radius, Keilwinkel, Freiwinkel, $S\alpha$, $S\gamma$,...) von Wendeschneidplatten und Schaftwerkzeugen vorgestellt [Prantl, 2009] [Hainich, 2009]. Ein Bereich der Schneidkanten-Messung, der bis jetzt allerdings nur gering abgedeckt wird, ist die automatische Messung der Schneidkantenqualität und Schartigkeit, obwohl deren Kenntnis an verschiedenen Stellen im Herstellungsprozess sowie während der Verwendung in der Fertigung wesentliche Aufschlüsse über den Zustand der Schneidkante geben kann. Typische Beispiele sind die Aussonderung von Schneiden mit zu hohen Ausbrüchen bevor die Schneidkante präpariert wird [Cortez, 2009], die Aussonderung von Schneiden, die auch nach der Präparation Schäden aufweisen, bzw. die Untersuchung von Schadstellen die während der Verwendung des Werkzeuges auftreten. Zudem ist die Beurteilung von Schneidkantenqualität und Verschleiß schon seit langem Thema im Bereich der Normung [3685, 1993].

Traditionelle Methoden zur Messung der Schneidkantenqualität basieren auf der manuellen Auswertung von hochauflösenden 2D Bildern eines Mikroskops. Während diese Methode geeignet ist, um zum Beispiel die Defektlänge entlang der Span- und Freifläche zu quantifizieren, kann sie keine 3D Information liefern, und damit zum Beispiel nicht die Tiefe eines Oberflächenprofils entlang

der Schneidkante ermitteln. Außerdem ist diese Methode stark vom Bediener abhängig und Licht-Reflexionen an der Schneidkante können das Ergebnis beeinflussen. Im Gegensatz dazu können traditionelle taktile Methoden eine Schneidkante entlang der Schneide abtasten und ein Höhenprofil für die Quantifizierung der Schartigkeit liefern. Eine Aussage über den Zustand entlang der Span- und Freifläche ist derzeit aber nicht möglich.

Wir stellen hier ein Oberflächen-Messgerät basieren auf Fokus-Variation vor, das automatisch die Qualität und die Schartigkeit der Schneidkante messen kann, und eine Reihe von Parametern zur Quantifizierung liefert. Die Methode lässt sich grob in drei Schritte unterteilen, die in Abschnitt 2 im Detail vorgestellt werden. Diese beinhalten:

- die Messung der 3D Daten mit Fokus-Variation;
- die automatische Berechnung der idealen Referenzgeometrie der gemessenen Schneidkante, um daraus die Differenz zwischen gemessenem Datensatz und idealer Geometrie berechnen zu können;
- die Berechnung von Parametern zur Quantifizierung der Schartigkeit und der Größe von Defekten.

2. AUTOMATISCHE 3D AUSWERTUNG DER SCHNEIDKANTENQUALITÄT

2.1 Messen der 3D Daten mittels Fokusvariation

Für die 3D-Messungen, welche die Basis für die automatische Beurteilung der Schneidkantenqualität bilden, wird das Messgerät EdgeMasterX von Alicona verwendet (Bild 1), das auf der Messmethode der Fokus-Variation beruht. Bei einer 2½ D Messung, bei der jedem x/y-Wert ein z-Wert zugeordnet wird, wird die Probe vertikal vom Sensor gescannt. Während des gesamten Vorgangs werden ständig Daten gesammelt. Aufgrund der geringen Schärfentiefe der Optik wird nur ein geringer Teil des Objekts zu einem Zeitpunkt der Messung scharf dargestellt. Durch das Analysieren der scharfen Bereiche während der Messung kann die komplette Oberfläche gemessen werden. Eine detaillierte Beschreibung der Technologie findet sich in [Danzl, 2011] [Leach, 2011]. Zusätzlich zur Höheninformation stellt das System auch Echtfarbinformation für jede Messposition zur Verfügung. Diese Farbinformation ermöglicht oftmals die sofortige Unterscheidung von verschlissenen und unbeschädigten Regionen an der Schneidkante. Das Messgerät wurde speziell auf die Anwendung im Produktionsbereich hin optimiert.



Abb. 1: Links: 3D Messgerät EdgeMasterX zur automatischen Messung der Schneidkantenqualität. Rechts: gemessener 3D Datensatz einer Schneidkante mit Echtfarben und markierten Defekten (oben rechts), sowie Datensatz in dem die Abweichungen zur Referenzgeometrie in Falschfarben dargestellt sind.

2.2 Berechnung der Differenz zur Idealgeometrie

Nachdem der 3D Datensatz der Schneidkante gemessen worden ist, werden im nächsten Schritt die Differenzen zur idealen Schneidkantengeometrie ermittelt, da diese die Basis für die Parameterberechnung bilden. Dabei können zwei unterschiedliche Szenarien unterschieden werden, je nachdem ob für die gemessene Schneidkante ein Referenz CAD Datensatz vorhanden ist oder nicht.

1. Es ist ein CAD Datensatz bzw. eine Referenzmessung einer idealen Schneidkante vorhanden:
 - a. Automatische Ausrichtung der Schneidkante zur Referenzgeometrie
 - b. Berechnung der Differenz der Schneidkante zur Referenzgeometrie
2. Es ist keine Information über die Schneidkantengeometrie vorhanden:
 - a. Automatische Berechnung der Referenzgeometrie
 - b. Berechnung der Differenz der Schneidkante zur Referenzgeometrie

Beide Fälle unterscheiden sich nur durch Punkt a) bei dem in einem Fall die Referenzgeometrie bereits vorhanden ist, und im zweiten Fall, diese erst anhand der gemessenen 3D Daten geschätzt werden muss.

Die Methode zur Ausrichtung bei bekannter Referenzgeometrie (Fall 1a) basiert auf einem Ansatz, der die 3 Rotationsparameter r_x, r_y, r_z und Translationsparameter t_x, t_y, t_z für die rigide Transformation des gemessenen

Datensatzes zum Referenzdatensatz so lange optimiert, bis die Distanz zwischen den Datensätzen minimal ist. D. h. es wird folgende Optimierungsangabe gelöst:

$$\min_{r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z} \sum_{i=1..N} \lambda_i d(p_i, q_i) \quad (1)$$

wobei $d(p_i, q_i)$ die Abstandsfunktion zweier korrespondierender Punkte p_i und q_i der beiden Datensätze darstellt.

Im Fall dass keine Referenzgeometrie der Schneidkante vorhanden ist, wird diese zunächst automatisch aus den gemessenen 3D Daten ermittelt. Als Voraussetzung dafür muss an die gemessene Schneidkante die Anforderung gestellt werden, dass sie nicht entlang der kompletten Länge durch Ausbrüche verändert worden ist, da ansonsten nicht auf den idealen Radius rückgeschlossen werden kann. Die Berechnung der Referenzgeometrie basiert auf folgender Methode:

- a) Automatische Detektion ob die Kante eine Fase besitzt oder nicht
- b) Automatische Detektion der mittleren Schneidkantenverrundung im Bereich ohne Fase
- c) Modellierung der idealen Schneidkanten geometrie

Für die Methode ist es nicht notwendigerweise erforderlich, dass es sich um eine Verrundung handelt, die durch einen einfachen Kreis modelliert werden kann, sondern es können beliebige Korbbögen-artige Verrundungen (z. B: ellipsen-förmige) modelliert werden. Die einzige Anforderung ist, dass diese im Bereich des gemessenen Datensatzes konstant ist (ausgenommen der zu messenden Defekte). Zusätzlich kann die Methode auch Kanten vor der Präparation, also ohne Verrundung modellieren.

In Abbildung 1 ist ein gemessener 3D Datensatz einer Schneidkante dargestellt, in dem zusätzlich die detektierten Defekte eingezeichnet worden sind (rot gefüllt, bzw. weiß umrandet). Zusätzlich wird der Datensatz mit Falschfarben visualisiert, bei denen die Farben den Abstand zur idealen Referenzgeometrie darstellen.

Abbildung 2 visualisiert den gemessene 3D Datensatz aus einer anderen Perspektive (links) sowie die automatisch ermittelte Referenzgeometrie, bei der die Rauheit des 3D Datensatzes sowie die Defekte entfernt wurden. Die Abbildung zeigt, dass nicht nur die Geometrie der Seitenflächen sondern auch die Verrundung modelliert worden ist. Die Differenzen direkt darunter in Abb. 2 zeigen, dass der Abstand zwischen Referenzgeometrie und gemessenem Datensatz in Bereichen ohne Defekt $< 1.5 \mu\text{m}$ ist, was im Prinzip der Rauheit auf dem gemessenen Datensatz entspricht.

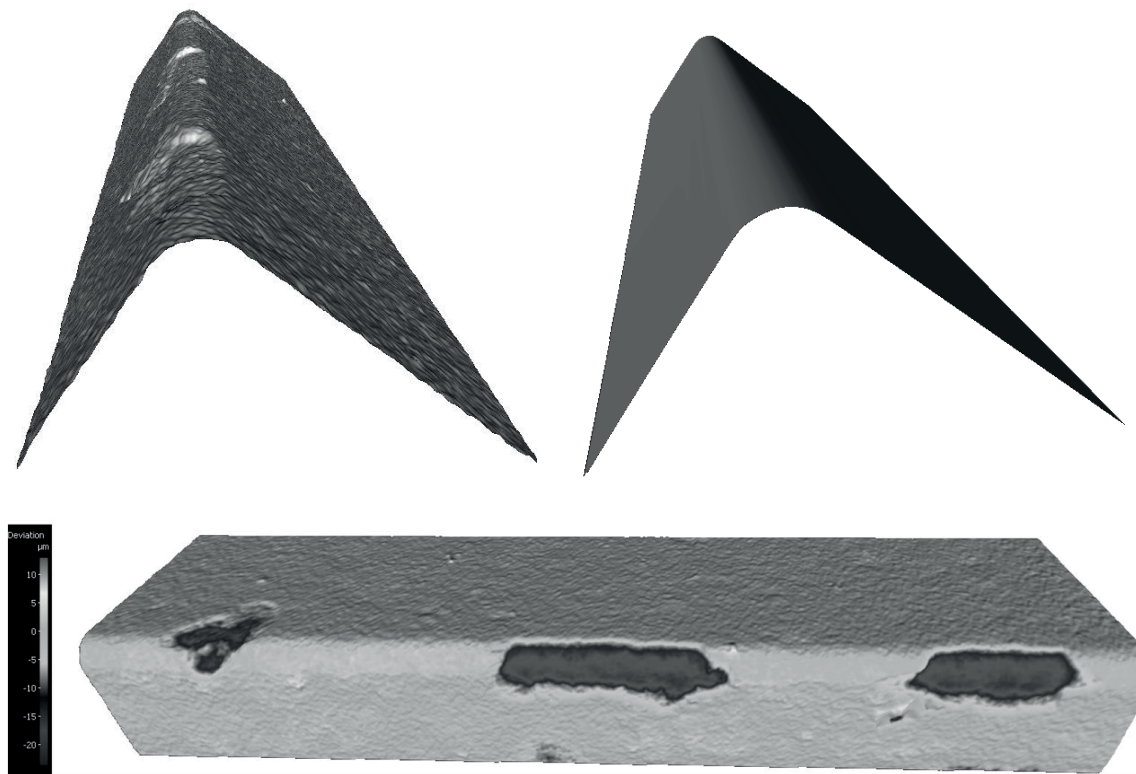


Abb. 2: Oben links: gemessener Datensatz. Oben rechts: automatisch berechnete Referenzkante ohne Defekte aber inklusiver Verrundung. Unten: Differenz der beiden Datensätze. Alle hellen Bereiche haben einen Abstand $< 1.5 \mu\text{m}$.

2.3 Automatisch Berechnung der Parameter

Auf der Basis des gemessenen Datensatzes und der Referenzgeometrie, kann eine Vielzahl an Parametern berechnet werden, die die Qualität der Schneidkante beurteilen. Diese können grob in zwei Klassen unterteilt werden:

1. Schartigkeitsparameter, die auf der Basis eines Profils ermittelt werden, das entlang der Kante extrahiert wird;
2. Parameter, die aus der Differenz des gemessenen Datensatzes zur Referenzgeometrie ermittelt werden.

Für die Ermittlung der Schartigkeitsparameter wird zunächst ein Höhenprofil entlang der Schneidkante extrahiert. Die Position für den Profilpfad entspricht dabei der Stelle, an der sich die exakte Schneidkante im Datensatz der Referenzgeometrie befindet. Anschließend werden aus diesem Profil verschiedene Rauheits-Parameter gemäß [4287, 2010] ermittelt, wobei nur solche berechnet werden, die für die Applikation relevant sind (z. B: P_t , R_a , R_q , R_v , ...).

Weitere relevante Parameter die ermittelt werden können sind in Abbildung 3 dargestellt und umfassen z. B. den Prozentanteil der Kante, der Defekte

aufweist, das mittlere und maximale Defektvolumen, die mittlere und maximale Defektlänge/Tiefe entlang der Kante bzw. entlang der Span- und Freifläche.

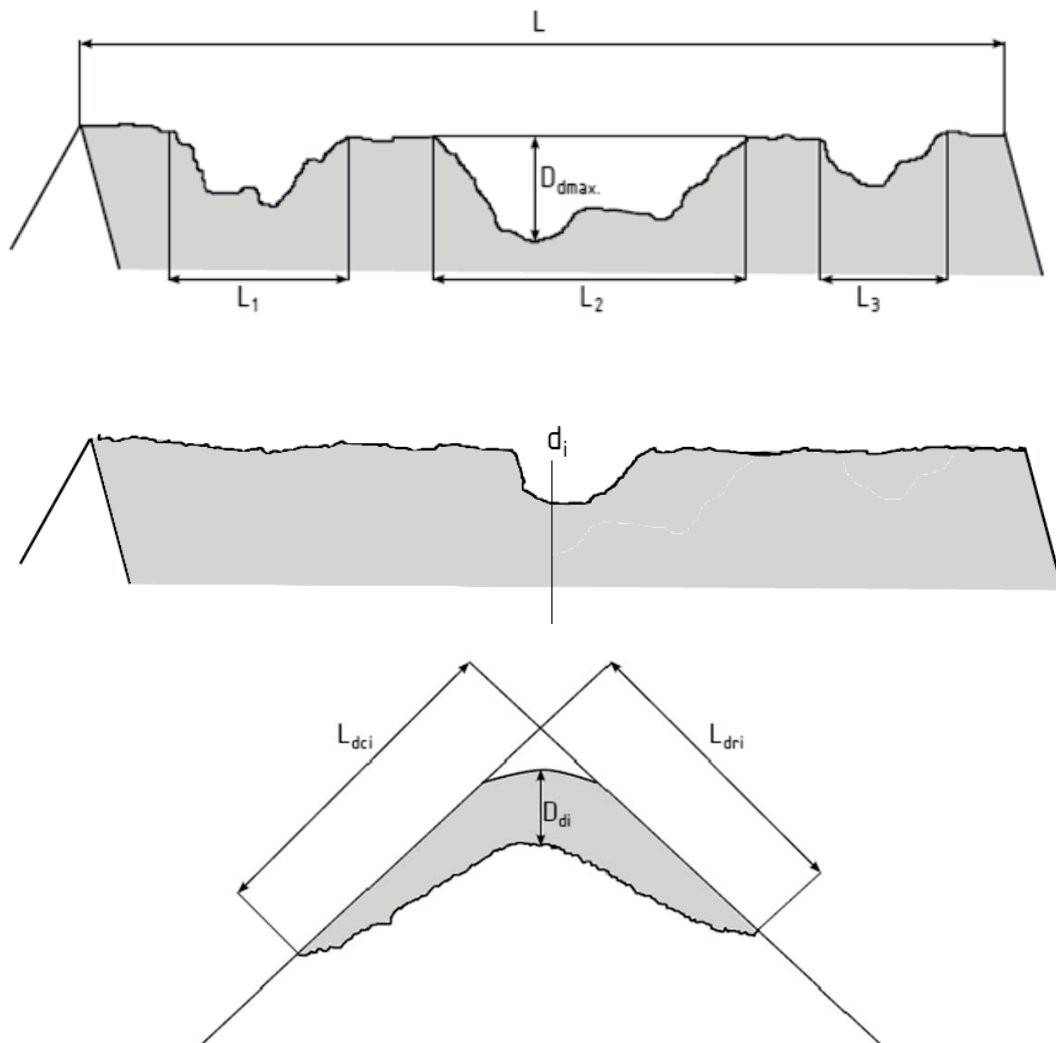


Abb. 3: Übersicht über einige berechnete Parameter zur Beurteilung der Schneidkantenqualität.
 Oben: Parameter, die die Schartigkeit entlang des Schneidkantenprofils beschreiben. Mitte:
 Schematische Schneidkante mit Position eines Schnittprofils. Unten: Schnittprofil der
 Schneidkante an Stelle d_i und Bemaßung der Defektlänge entlang der Frei- bzw. Spanfläche
 bzw. der Defekttiefe.

3. RESULTATE

Um die neue Methode zu evaluieren wurde eine Vielzahl an Experimenten an synthetischen und realen Datensätzen durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse für einen 3D Datensatz einer Wendeschneidplatte präsentiert, bei dem verschiedene Parameter einmal auf manuelle und einmal mithilfe der automatischen Methode ausgewertet worden sind.

In Abbildung 4 sind die Resultate der Schneidkantenmessung graphisch visualisiert. Der gemessene 3D Datensatz zeigt 5 gefunden Defekte, wobei Defekte ab einer Tiefe von $1\mu\text{m}$ als solche erkannt wurden. Im 3D Datensatz der die Abstände zum ermittelten Referenzdatensatz visualisiert (rechts), ist zudem ein Defekt erkennbar, der höher als die Referenzgeometrie ist, also z. B. ein Staubkorn o.ä. zeigt. In Abbildung 5 findet sich das Höhenprofil das entlang der Schneidkante extrahiert worden ist. Zusätzlich zu den Defektparametern, die in Abbildung 7 dargestellt sind, wird auch die Geometrie der Schneidkante bemaßt (Abbildung 6), die auf der Basis von mehreren Profilen berechnet wird, die in Regionen ohne Defekte liegen.

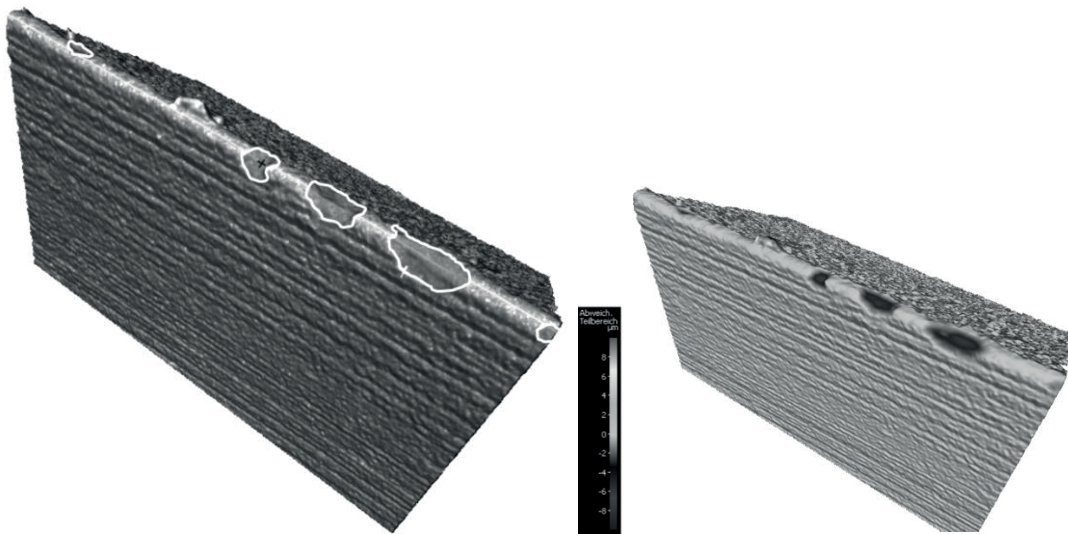


Abb. 4: Gemessener 3D Datensatz mit markierten Defekten (weiß), rechts: Falschfarben, die den Abstand zur Referenzgeometrie zeigen.

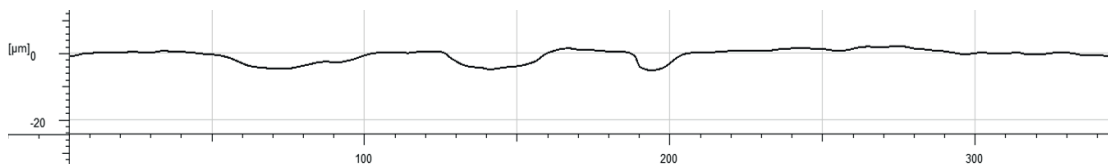


Abb. 5: Höhenprofil das entlang der Schneidkante extrahiert worden ist.

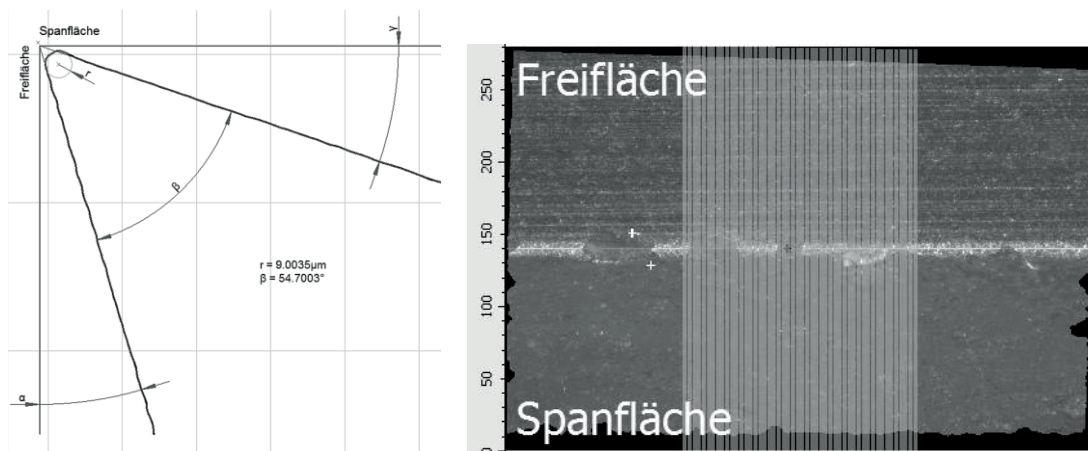


Abb. 6: Mittleres Schneidkantenprofil (links) und Profilpfad für die Profilextraktion (rechts)

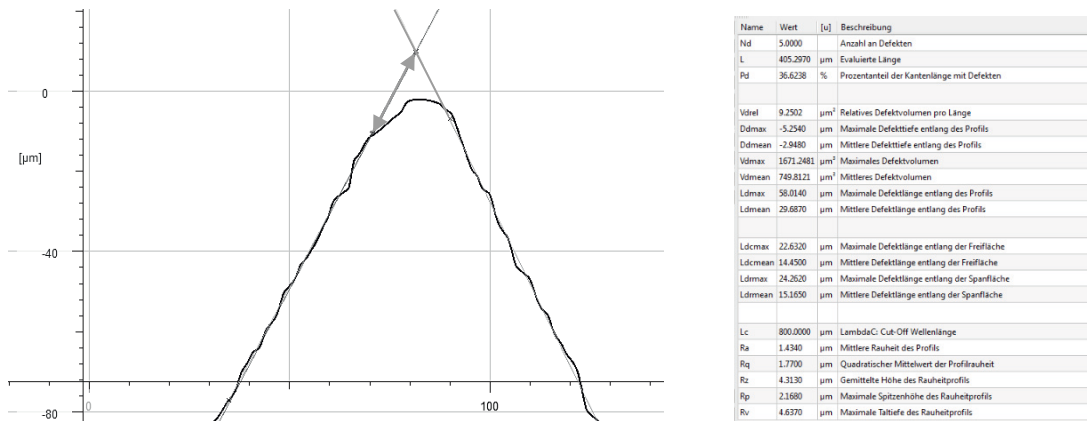


Abb. 7: Links: manuell ausgewertete maximale Defektlänge entlang der Freifläche, rechts: alle ermittelte Schneidkantenparameter

Um sicherzustellen dass die Messresultate korrekt sind wurden alle Parameter soweit möglich auf manuellem Wege nachgemessen. Ein Beispiel dafür ist der max. Defektanstand entlang der Freifläche, dessen manuelle Messung in Abb. 7. (links) dargestellt ist.

In Tabelle 1 sind mehrere automatisch ermittelte Parameter zusammen mit deren Standardabweichung bei 10 Wiederholmessungen dargestellt. Zusätzlich sind bei einigen Parametern, die manuell auswertbar sind, auch die Werte der manuellen Messung hinterlegt. Alle Parameter sind sehr ähnlich zueinander, die Unterschiede basieren hauptsächlich auf Unsicherheiten, die der manuellen Methode aufgrund des Benutzereinflusses zugrunde liegen.

Parameterbezeichnung	Automatisch	Standardabweichung	Manuell
Anzahl der Defekte	5	0	5
Max. Defektlänge entlang der Freifläche	22.63 µm	0.44 µm	22.95 µm
Max. Defektlänge entlang der Spanfläche	24.26 µm	0.95 µm	23.83 µm
Max. Defekttiefe entlang der Kante	5.25 µm	0.08 µm	5.27 µm
Mittlere Defektlänge entlang der Freifläche	14.45 µm	0.31 µm	-
Mittlere Defektlänge entlang der Spanfläche	15.17 µm	0.34 µm	-
Mittlere Defekttiefe entlang der Kante	2.95 µm	0.035 µm	-

Tab. 1: Gegenüberstellung der automatischen und manuellen Berechnung ausgewählter Parameter zur Beurteilung der Schneidkantenqualität sowie der Standardabweichung der automatischen Methode bei 10-maliger Wiederholung

4. ZUSAMMENFASSUNG

Das vorgestellte Messgerät demonstriert die automatische Berechnung von Parametern zur Beurteilung der Schneidkantenqualität. Im Unterschied zu traditionellen Methoden, bei denen auf manuelle Art mikroskopische Bilder ausgewertet worden sind, und daher auch einem starken Benutzereinfluss unterliegen, ist die vorgestellte Methode vollautomatisch und kann auch von ungeschultem Personal in der Produktion verwendet werden. Einer der Schlüsselaspekte bei der Berechnung ist die Methode, die zu einem gemessenen 3D Datensatz die ideale Referenzgeometrie berechnet, um daraus Differenzen ermitteln zu können, die die Basis für die Parameter zur Beurteilung der Qualität bilden. Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen der automatischen Auswertung und manuell ermittelten Parametern.

5. QUELLEN

- [Prantl, 2009] Prantl, M.; Danzl R.; Helml, F.: Optische 3D Messung der Schneidkantenverrundung. F. Tikal (Eds.), Schneidkantenpräparation, Ziele Verfahren und Methoden, Kassel University Press, Kassel, ISBN 978-3-89958-494-3, S. 163–179, 2009.
- [Hainich, 2009] Hainich, R.; Optische Messtechnik von Schneidkanten. In F.Tikal (Eds.), Schneidkantenpräparation, Ziele Verfahren und Methoden. Kassel University Press, Kassel, ISBN 978-3-89958-494-3, S. 146–162, 2009.
- [Cortes, 2009] Cortes, C. J.; Tikal, F.: Schneidkantenpräparation – Ziele. F. Tikal (Eds.), Schneidkantenpräparation, Ziele Verfahren und Methoden, Kassel University Press, Kassel, ISBN 978-3-89958-494-3, S. 3–11, 2009.
- [3685, 1993] ISO 3685: 1993: Tool-life testing with single-point turning tools. Beuth-Verlag, Berlin, 1993.
- [Danzl, 2011] Danzl, R.; Helml, F.; Scherer, S.: Focus variation – A robust technology for high resolution optical 3D surface metrology. J. of Mech. Eng. 57(3), S. 245–256, 2011.
- [Leach, 2011] Leach, R.K: Optical Measurement of Surface Topography. Springer-Verlag, Berlin, 2011.
- [4287, 2010] DIN EN ISO 4287:2010: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth-Verlag, Berlin, 2010.

BESTIMMUNG DER 2D-GEOMETRIE VON SILIZIUM-MIKROTASTERN

Jannick Langfahl-Klabes, Lutz Doering, Uwe Brand

Physikalisch Technische Bundesanstalt, 5.11 - Härte und taktile Antastverfahren,
jannick.langfahl@ptb.de, uwe.brand@ptb.de

Abstract: In der PTB entwickelte Si-Mikrotaster für Rauheitsmessungen in Mikrobohrungen weisen Höhen der Tastspitze bis 200 µm auf. Dies ermöglicht neben der Bestimmung der Oberflächenrauheit auch die Untersuchung von Lage und Form von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis. Da sich die Form einer Tastspitze an Strukturen der Probenoberfläche abbildet und es so zu Form- und Lageabweichungen in den Messungen kommen kann, ist es nötig, eine Methode zur Entfaltung so aufgenommener Profile zu entwickeln. Für die hier untersuchten Mikrotaster gibt es ein solches Verfahren bisher nicht. Zur Ermittlung der Tastspitzengeometrie wird ein Prüfnormal mit rechteckförmigen Rillenstrukturen genutzt, welches Rillenbreiten von 0,3 µm bis 3,0 µm aufweist.

KEYWORDS: MIKROTASTER, SPITZENGEOMETRIE, PRÜFNORMAL

1. EINLEITUNG

1.1 Projektziel

Insbesondere bei der Ermittlung von Rauheitskennwerten von technischen Oberflächen oder bei Formmessungen an Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis kann der Einfluss der Tastspitzengeometrie nicht vernachlässigt werden. Das Ziel des Projektes ist es, ein kürzlich in der PTB entwickeltes Mikrotastspitzenprüfnormal zur Bestimmung der 2D-Geometrie von Silizium-Mikrotastern einzusetzen. Da die Form der verwendeten Tastspitze einen Einfluss auf die gemessenen Profilschnitte hat, ist es nötig, ein Verfahren zu entwickeln, um die Messungen vom Einfluss der Tastspitze zu bereinigen. Außerdem soll die Verfahrensanweisung dazu dienen, den Verschleiß von Mikrotastspitzen schnell und einfach überprüfen zu können. Durch eine Neubestimmung der Spitzenform mit dem Tastspitzenprüfnormal wird es möglich sein, die Tastspitzen über einen längeren Zeitraum in Intervallen überprüfen zu können und den Verschleißzustand der Tastspitzen nachzuverfolgen. Wird eine zu starke Abplattung bzw. Abrundung oder ein Defekt der Spitze beobachtet, muss sie ausgetauscht werden, um bspw. eine Beschädigung der Probenoberfläche frühzeitig zu vermeiden.

1.2 Silizium-Mikrotaster

Die dimensionelle Messtechnik von industriell gefertigten Mikrostrukturen wird heute hauptsächlich von Multisensor-Koordinatenmessgeräten dominiert. Hier

werden Tastkugeln mit kleinsten Durchmessern von bis zu 20 μm eingesetzt [Ehrig, 2007]. Eine Rauheitsmessung ist aber mit solch vergleichsweise großen Tastkugeln nur sehr eingeschränkt möglich. Dies zeigt der Vergleich zur konventionellen Rauheitsmesstechnik mit Profilometern, die sphärische Diamanttastspitzen mit Radien von 2 μm verwenden. Für Topographiemessungen in Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis, wie Mikrobohrungen in Einspritzdüsen oder kritischen Gasdüsen, werden zunehmend piezoresistive Mikrotaster mit Silizium-Tastspitzen eingesetzt [Peiner, 2013], [Xu, 2014].

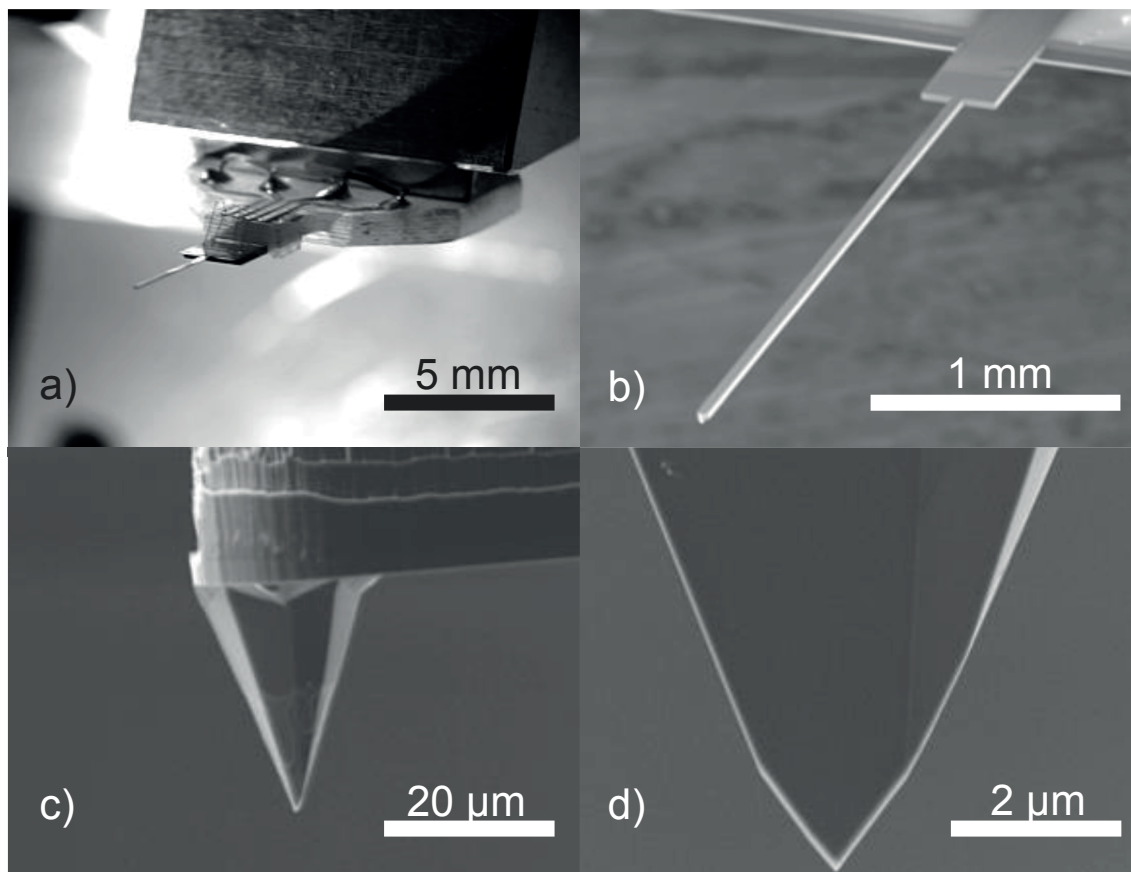


Abb. 1: Silizium-Mikrotaster – a) Im Messgerät eingesetzter Mikrotaster. b), c) und d) REM-Aufnahmen eines 1,5 mm langen Mikrotasters mit Vergrößerungen der Tastspitze

Die Mikrotaster sind kommerziell in drei verschiedenen Ausführungen von der CiS GmbH erhältlich: 1,5 mm, 3 mm und 5 mm Tasterlänge, wobei die Höhe der Tastspitze variiert. Bei den 1,5 mm langen Tastern sind Spitzenhöhen von ca. 25 μm zu erwarten, vgl. Abb. 1 c), bei den 3 mm langen Tastern ca. 75 μm und der 5 mm lange Taster hat etwa 200 μm hohe Tastspitzen. Die eingesetzten Taster ermöglichen eine hohe laterale Auflösung, die im Bereich zwischen der Auflösung von Rasterkraftmikroskopen (AFM) und der von Tastschnittgeräten liegt. Darüber hinaus erreichen diese Mikrotaster eine Tiefenauflösung von 4 nm in einer Bandbreite von 1,6 kHz, [Peiner, 2010]. Eine Besonderheit der Mikrotaster ist ihr Potential für sehr schnelle taktile Oberflächenmessungen. Aktuell können mit den Tastern Scangeschwindigkeiten in der Größenordnung von 10 mm/s erreicht werden.

1.3 Das Mikrotastspitzenprüfnormal

Die taktil gemessene Topographie ist immer mit der Form der Tastspitze gefaltet. Für die präzise Messung der Breite von Mikro- und Nanostrukturen muss daher nach ISO 14660 der Einfluss der Tastspitzenform auf das gemessene Profil korrigiert werden, um die mechanische Oberfläche zu ermitteln. Für sphärische Tastspitzen sind dazu in den letzten Jahren morphologische Filterverfahren in ISO 16610-40 und ISO 16610-41 entwickelt und beschrieben worden, die eine Entfaltung von Tastspitze und Oberflächenprofil erlauben [16610a, 2012], [16610b, 2012].

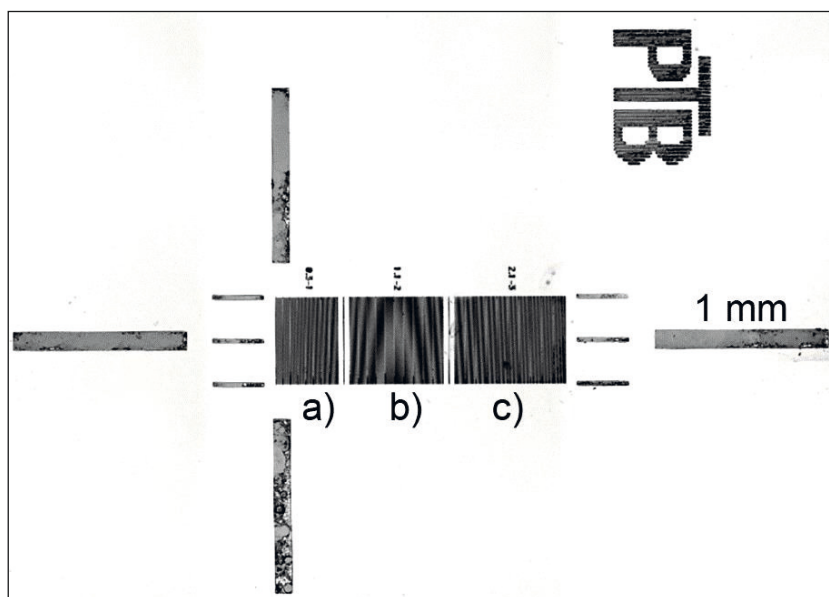


Abb. 2: PTB-Mikrotastspitzenprüfnormal – Das Normal ist in drei Felder aufgeteilt. Es sind Rechteckrillen mit Breiten von 0,3 μm bis 1,0 μm in Feld a), von 1,1 μm bis 2,0 μm in Feld b) und von 2,1 μm bis 3,0 μm in Feld c) zu finden.

Für nicht-sphärische Tastspitzen, wie die pyramidenförmigen Siliziumspitzen von Mikrotastern, vgl. Abb. 6, und AFM-Cantilever existiert bislang kein eigenes Filterverfahren. Eine Voraussetzung für die Entfaltung von Tastspitze und Profil liegt in der Kenntnis der Tastspitzenform. Für AFM wird zurzeit ein Verfahren zur Messung der Tastspitzenform standardisiert [13095, 2014], das auf der Bestimmung der Einsinktiefen an Rechteckrillen unterschiedlicher Breite und der Messung von Kanten und damit auf der direkten Abbildung der Spitzenform basiert. Die Breite der Referenzstrukturen ist angepasst an die zu messenden AFM-Spitzenradien von 10 nm bis 100 nm [Itoh, 2006].

Im Projekt wird analog dazu ein in der PTB prototypisch entwickelter Mikrotastspitzenprüfkörper, vgl. Abb. 2, zur Bestimmung der zweidimensionalen Form der Mikrotastspitzen eingesetzt. Der Prüfkörper besitzt rechteckförmige Rillen, deren Breite von 0,3 μm bis 3 μm in 0,1 μm -Schritten ansteigen, vgl. Abb. 3.

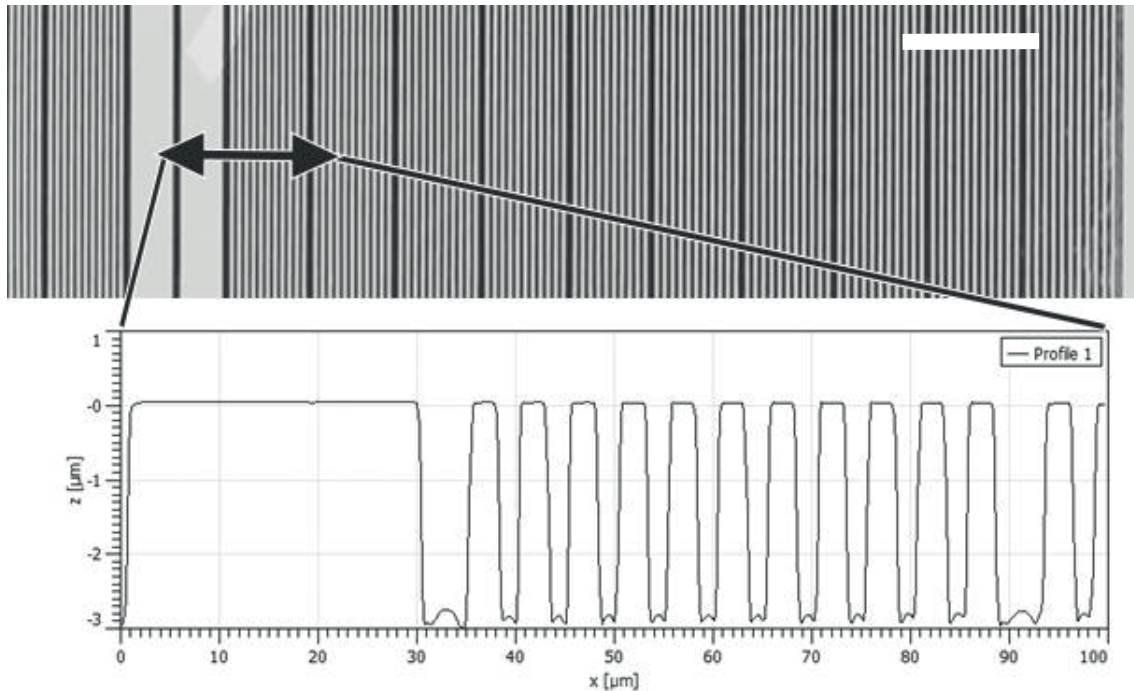


Abb. 3: Profilausschnitt – Konfokales Laserscan-Mikroskop (CLSM)-Bild des mittleren Messfeldes. Die Rechteckrillen haben im gezeigten Ausschnitt eine Breite von 1,1 μm . Der Maßstab entspricht 100 μm .

Das Normal entspricht einem Prüfkörper des Typs B1 nach DIN EN ISO 5436-1 und kann auch zur Bestimmung des Tastspitzenradius nach DIN 32567-3:2014-10 für sphärische Messsonden von Tastschnittgeräten genutzt werden.

2. AUSWERTESTRATEGIE

2.1 Einsinktiefe bei sphärischen Tastspitzen

Durch eine Profilmessung über die Rechteckrillen wird das Eintauchen der Tastspitze in die Rillen gemessen. Erst wenn die Rillen breit genug sind, kann die Spitze in die Geometrie einsinken und eine Änderung im Höhensignal gemessen werden. Auf diese Weise kann in unterschiedlichen Höhen die lokale Breite der Tastspitze bestimmt werden.

Mit der zu prüfenden Tastspitze werden Profilmessungen auf dem Tastspitzennormal durchgeführt. Abb. 4 (oben) zeigt die Messung eines Tencor P17 Tastschnittgerätes mit nominal 4 μm sphärischem Tastspitzendurchmesser und 60° Öffnungswinkel auf dem Prüfnormal. Wertet man die Profiltiefe der unterschiedlich breiten Rechteckrillen aus, erhält man die in Abb. 4 (unten) dargestellte zweidimensionale Form der Tastspitze.

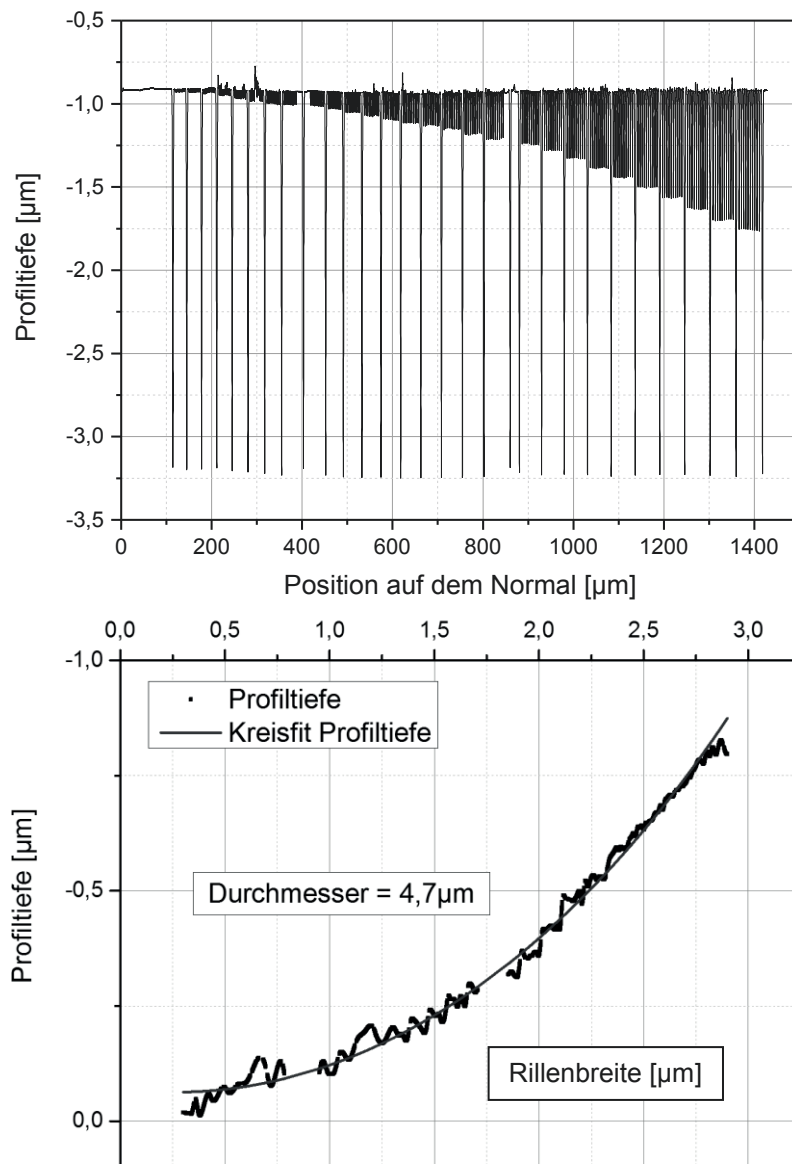


Abb. 4: Einsinktiefe und Tastspitzendurchmesser – Beispielhafte Profilmessung mit einem Tastschnittgerät (Tencor P17) am Tastspitzenprüfnormal (oben) und die Bestimmung des Tastspitzenradius der sphärischen Tastspitze durch einen Kreisfit (unten)

Ein Kreisfit im gekrümmten Bereich des Profils liefert einen Tastspitzendurchmesser von $(4,7 \pm 0,2) \mu\text{m}$. Ist der Durchmesser der sphärischen Tastspitze bekannt, lassen sich mit dieser Tastspitze gemessene Rauheitsprofile mit Hilfe der in ISO 16610-41 beschriebenen Filterverfahren entfalten.

2.2 Einsinktiefe bei nicht-sphärischen Mikrotastspitzen

Für nicht-sphärische Tastspitzen, wie die von Mikrotastern, lässt sich mit diesem Normal ebenfalls die Form der Spitze bestimmen. Durch den anisotropen Ätzprozess bei der Herstellung der Tastspitzen aus Silizium, entsteht die in Abb. 5 (links) gezeigte pyramidale Geometrie mit acht Flächen.

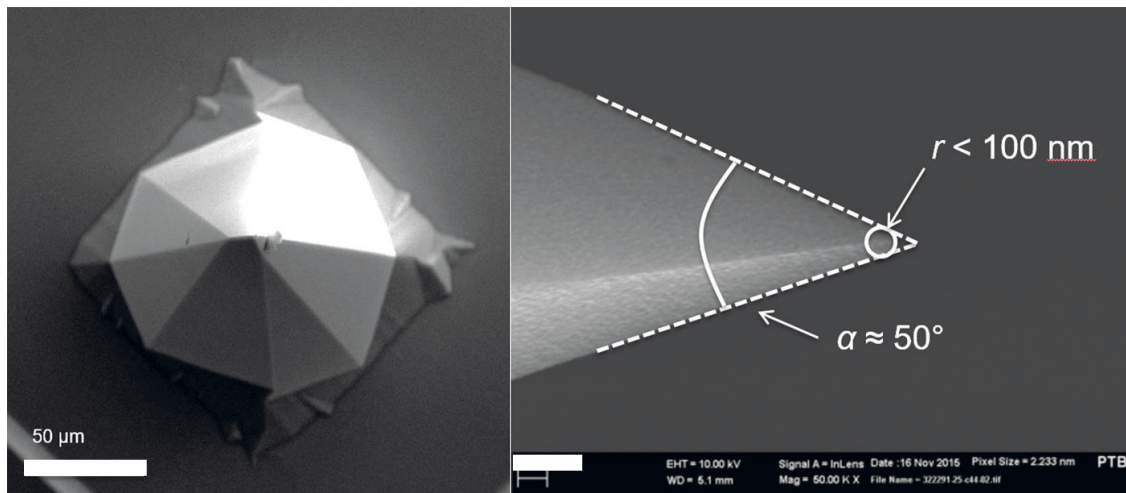


Abb. 5: Pyramidale Spitzengeometrie – In diesen REM-Aufnahmen ist im linken Bild die Draufsicht auf eine Mikrotastspitze gezeigt und im rechten Bild die seitliche Ansicht der Spitze stark vergrößert. Der Maßstab links entspricht 50 µm, der im rechten Bild 200 nm.

Zur indirekten Bestimmung des Tastspitzenradius und des Öffnungswinkels werden ergänzend, abbildende Verfahren wie die Raster-Elektronenmikroskopie genutzt. Abb. 5 (rechts) zeigt die stark vergrößerte Seitenansicht einer Mikrotastspitze. Mit dieser Methode können Öffnungswinkel der Tastspitzen im Bereich von 50° und Spitzenradien kleiner 100 nm an unbenutzten Mikrotastern bestimmt werden.

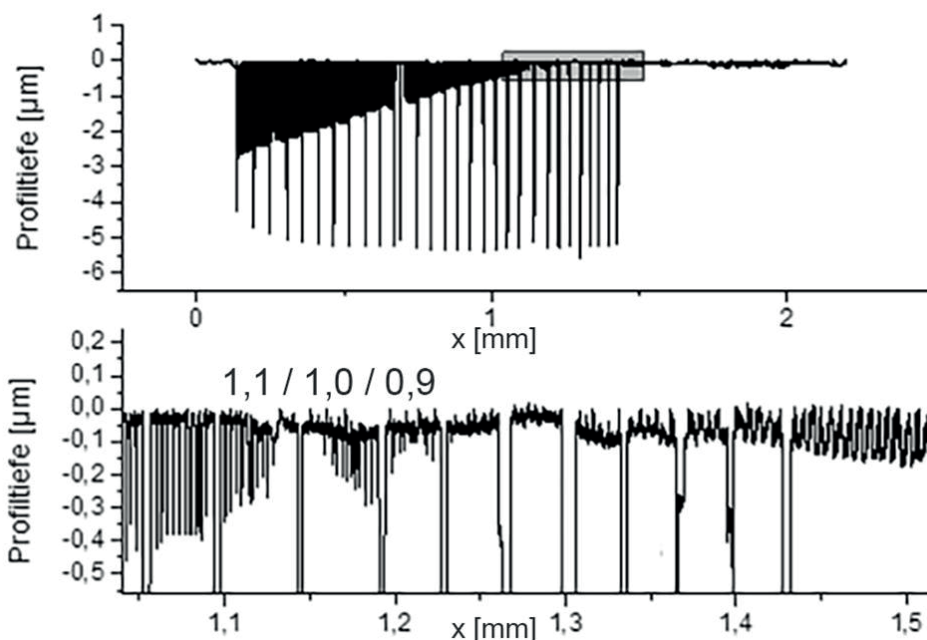


Abb. 6: Einsinktiefe nicht-sphärische Spitze – Beispielhafte Profilmessung mit einem bereits abgenutzten Mikrotaster am Tastspitzenprüfnormal (oben). Der Bereich, ab dem Änderungen im Höhenprofil registriert werden (unten) beginnt bei einer Rillenbreite von 0,9 µm.

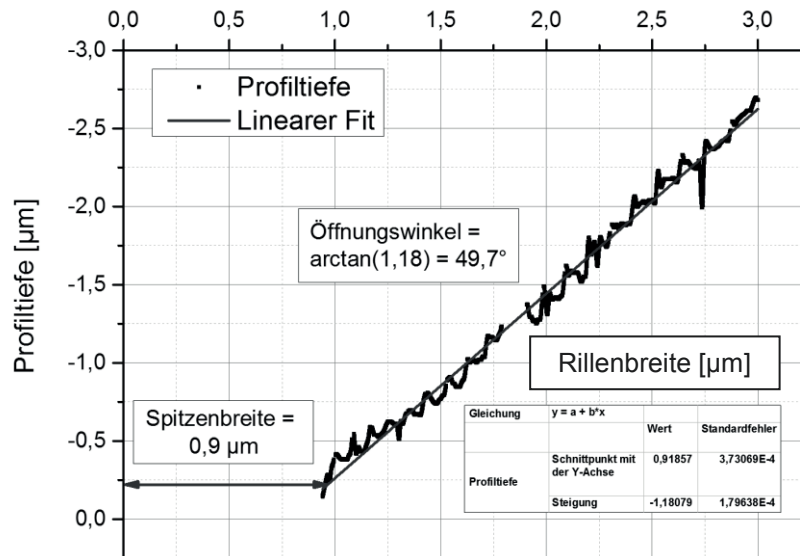


Abb. 7: Spitzenbreite, nicht-sphärische Tastspitze – Die Bestimmung der Spitzenbreite erfolgt direkt durch die Ermittlung der Rillenbreite, ab welcher die Spitze in die Rillen einsinkt. Der Öffnungswinkel der Tastspitze kann durch die Bestimmung der Steigung von Profiltiefe und Rillenbreite berechnet werden.

Führt man die Messungen über das Prüfnorm mit den Si-Mikrotastern durch, kann die Auswertung über die Auftragung der Einsinktiefe gegen die Rillenbreite erfolgen. Die Breite des Spitzendurchmessers kann durch das Rillengebiet, ab dem das erste Mal eine Änderung im Höhenprofil messbar ist, bestimmt werden. Die Steigung des Kurvenverlaufs gibt Zugriff auf den Öffnungswinkel, der an den Mikrotastspitzen typischerweise zu 50° bestimmt werden kann, vgl. Abb. 7.

2.3 Rekonstruktion der Spitzengeometrie an scharfen Kanten

In der Annahme, dass es sich bei den Kanten des Tastspitzenprüfnorms um senkrecht abfallende scharfe Kanten mit zunächst vernachlässigbar kleinem Kantenradius handelt, wurden erste Versuche durchgeführt, die Geometrie der Mikrotastspitzen aus Profilmessungen zu rekonstruieren. Hierzu wurden jeweils die linke und rechte Flanke der sich an den Kanten abbildenden Tastspitze aus den Profilmessungen extrahiert (Abb. 8 oben). Die Geometrie wurde an verschiedenen Rillenbreiten bzw. an den Trennstrukturen zwischen den einzelnen Rillengebietern durchgeführt. Die Breite der Trennrillen beträgt 5 µm und ist aktuell die breiteste Struktur, die genutzt werden kann, um die Tastspitze bis zu einer maximalen Höhe von 3 µm (max. Rillentiefe) zu charakterisieren. In Abb. 8 (unten) sind die zuvor extrahierten Flankenteile zu einer Geometrie der Mikrotastspitze zusammengefügt. Die Darstellung ist nun spiegelverkehrt, die herausgeschnittene linke Flanke befindet sich auf der rechten Seite und die rechte Flanke der Tastspitze dementsprechend auf der linken. Zur besseren Darstellung wurden die einzelnen Geometrieprofile mit einem Offset versehen, da die Einzelprofile ansonsten übereinander liegen, da sie eine hohe Übereinstimmung zeigen.

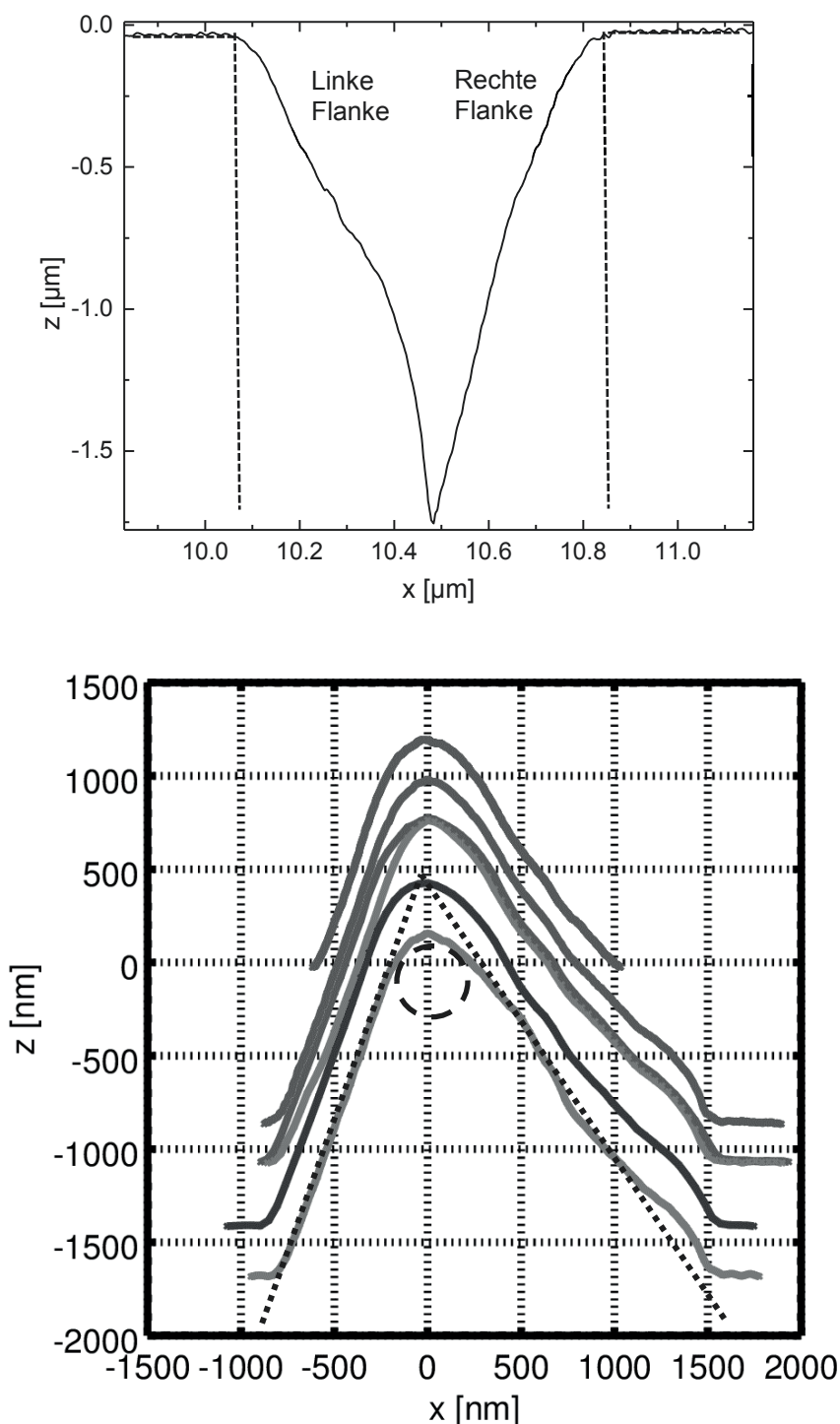


Abb. 8: 2D-Spitzengeometrie – Oben: Das Messprofil zeigt einen Ausschnitt einer Messung mit einem Mikrotaster an einer Rillenstruktur. Die gestrichelte Linie deutet den idealen rechteckigen Profilverlauf an. Unten: Hier sind beispielhaft acht rekonstruierte Profile der sich an den Kanten des Normals abbildenden Mikrotastspitze gezeigt. Der Offset zwischen den Profilen dient zur Veranschaulichung der ansonsten sehr gut übereinander liegenden Profile. Die Geometrie der Spitze wurde an verschiedenen Kanten der Rechteckstruktur extrahiert. Mit dieser Methode wurde der Öffnungswinkel der Tastspitze mit 52° und der Radius mit $0,134 \mu\text{m}$ bestimmt (gestrichelt Linien).

3. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die bisherigen Forschungsergebnisse zeigen, dass ein Tastspitzenprüfnorm mit Rechteckrillen dazu genutzt werden kann, geometrische Parameter von taktilen Messsonden zu bestimmen. Der Radius und der Öffnungswinkel können sowohl bei sphärischen Tastspitzen eines Tastschnittgeräts als auch bei den pyramidal geformten Spitzen der Silizium-Mikrotaster bestimmt werden. Durch diese direkte Methode der Tastspitzenabformung an scharfen Kanten ist es möglich, den Verschleißzustand einer Messsonde, ohne aufwendige Präparationen, wie sie für REM-Aufnahmen nötig sind, während ihrer Lebensdauer zu ermitteln, vgl. Abb. 9.

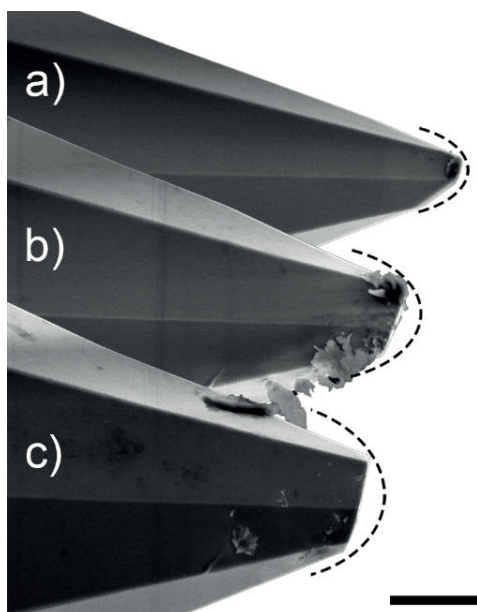


Abb. 9: Veränderung der Spitzenform – REM-Aufnahmen während der Lebensdauer einer Tastspitze: a) zeigt eine unbenutzte, neue Tastspitze. In b) ist die Spitze und daran haftender Abrieb nach einem Verschleißweg von 2 m gezeigt, in c) ist die Tastspitze nach einer Lebensdauer von rund 200 m Messstrecke gezeigt. Der Maßstab entspricht 2 μm .

Durch eine Messung auf dem Tastspitzenprüfnorm kann auch die 2D-Geometrie bestimmt werden, um diese für die Entfaltung von Oberflächentopographien und Rauheitsprofilen zu nutzen. Zum Vergleich von taktilen und abbildenden Methoden sollen die Tastspitzen mit einem REM mit 4-Quadranten BSE Detektor untersucht werden, um eine 3D-Topographie der Spitzenoberfläche zu erstellen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Weiterentwicklung und Verfeinerung der 2D-Auswertestrategie einfließen und helfen das PTB Tastspitzenprüfnorm zu optimieren. Hierbei ist es derzeit noch problematisch, Strukturen, die kleiner als 0,3 μm sind, reproduzierbar unter Erfüllung aller Anforderungen, insbesondere der Rillentiefe und einer geringen Stegbreite, herzustellen. Des Weiteren ist es nötig, weitere Teststrukturen neben den Rechteckrillen zu untersuchen, um die Feinheiten am Apex einer Tastspitze abbilden zu können. Zum Abschluss des Projektes werden die Ergebnisse in einem Entwurf zur Normung des Prüfnorms und der entwickelten Auswertestrategie zusammengefasst.

4. QUELLEN

- [Peiner, 2010] Peiner, E; Doering, L.: Characterization of diesel injectors using piezoresistive sensors. *Sensors*, 2010 IEEE, 2010, Bd. 1, S. 2083–2088.
- [16610a, 2012] DIN EN ISO 16610-40:2012-10: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 40: Morphologische Profilfilter: Grundlegende Konzepte. Beuth-Verlag, Berlin, 2012.
- [16610b, 2012] DIN EN ISO 16610-41:2012-10: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 41: Morphologische Profilfilter: Filter mit Kreisscheibe und horizontaler Strecke. Beuth-Verlag, Berlin, 2012.
- [Ehrig, 2007] Ehrig, W.; Neuschaefer-Rube, U.: Artefacts with rough surfaces for verification of optical microsensors. *SPIE 6616*, 2007, S. 661626–661626–9.
- [Peiner, 2013] Peiner, E; Doering, L.: Nondestructive Evaluation of Diesel Spray Holes Using Piezoresistive Sensors. *IEEE Sens. J.*, Bd. 13, Nr. 2, S. 701–708, 2013.
- [Xu, 2014] Xu, M.; Kirchhoff, J.; Brand, U.: Development of a traceable profilometer for high-aspect-ratio microstructures metrology. *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, Bd. 2, Nr. 2, S. 024002, Apr. 2014.
- [13095, 2014] ISO 13095:2014-07: Chemische Oberflächenanalyse – Rasterkraftmikroskopie – Verfahren zur in situ-Charakterisierung des Schaftprofils von AFM-Sonden zur Messung von Nanostrukturen.
- [Itoh, 2006] Itoh, H.; Fujimoto, T.; Ichimura, S.: Tip characterizer for atomic force microscopy. *Rev. Sci. Instrum.*, Bd. 77, Nr. 10, S. 103704, 2006.

HERAUSFORDERUNGEN DES EINSATZES UNTERSCHIEDLICHER MESSBEZUGSSYSTEME IN DER PROZESSKETTE ALUMINIUM- STRUKTURGUSSBAUTEILEBEARBEITUNG

Severin von Kuepach¹, Matthias Wagensoner², Prof. Dr.-Ing. Sven Roeren³

¹ Hochschule Landshut in Dingolfing, Forschungsschwerpunkt Produktions- und Logistiksysteme, severin.kuepach@haw-landshut.de

² Technologiezentrum Dingolfing GmbH – An-Institut der Hochschule Landshut, matthias.wagensoner@tech-ding.de

³ Hochschule Landshut in Dingolfing, Forschungsschwerpunkt Produktions- und Logistiksysteme, sven.roeren@haw-landshut.de

Abstract: Die Komplexität von Prozessketten zur Herstellung von druckgegossenen Aluminium-Strukturbauteilen nimmt aufgrund entwicklungsseitiger Anforderungen vor allem basierend auf marktseitigen Bedürfnissen an Leichtbaukonzepten stetig zu. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit neuer Vorgehensweisen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und der Stabilität solcher Prozessketten. Unter anderem wird ein durchgängiges aufwandsarm implementierbares Messsystem, das die unterschiedlichen Prozesseigenschaften berücksichtigt, als wesentliches Erfolgskriterium für die weitere Etablierung der Aluminium-Strukturteile-Konzepte gesehen. Die vorliegende Publikation zeigt die wesentlichen Herausforderungen diesbezüglich und stellt mögliche Lösungen zur Konformität unterschiedlicher Messsysteme entlang der Prozesskette dar.

KEYWORDS: ALUMINIUM-STRUKTURGUSS, DRUCKGIEßEN, VERZUG, MESSKONFORMITÄT, MESSSYSTEMATIK

1. AUSGANGSSITUATION

Als eine der größten Herausforderungen in der Automobilindustrie werden derzeit die Einsparung von Treibstoff und die damit im Einklang stehende Reduktion von CO₂-Emissionen gesehen. Neben dem Einsatz von immer effizienter werdenden Antriebssystemen ist vor allem die Gewichtsreduktion des Gesamtfahrzeugs elementarer Baustein, um den Kundenanspruch hinsichtlich Fahrzeugverbrauch und CO₂-Emissionen zu erfüllen. Gegossenes Aluminium wird in der Fahrzeugindustrie seit den 1980er-Jahren im Bereich von Antriebs- und Getriebegehäusen angewendet. Zunehmend werden durch den Trend zur Umsetzung von Leichtbaustrategien verstärkt Karosserie- und Fahrwerkskomponenten aus Aluminium-Legierungen hergestellt.

Durch die Zunahme der Bauteilkomplexität aufgrund steigender Funktionsintegration werden konventionelle Gießverfahren wie das Schwerkraftgießen oder das Niederdruckgießen durch das Druckgießen

abgelöst, mit Hilfe dessen deutlich komplexere Bauteile, etwa mit niedrigen Wandstärken, realisiert werden können.

Mit dem Einsatz von Aluminium-Druckguss-Strukturbauteilen wurde etwa bei der Daimler AG eine Gewichtseinsparung von 19 kg pro Fahrzeug im Zuge eines Modellgenerationssprungs realisiert. Hierzu wurden sechs verschiedene Bauteile in die Fahrzeugkarosserie [Pfitzer, 2016] verbaut.

2. BEDEUTUNG UND KOMPLEXITÄT DER PROZESSKETTE ALUMINIUM-STRUKTURGUSS-BEARBEITUNG

Die sehr hohe geometrische Komplexität der Aluminium-Strukturbauteile wird bedingt und zugleich gefordert durch die Ermöglichung einer hohen Funktionsintegration. Allerdings können weder die erforderliche geometrische Form und Lage, noch die mechanischen Kennwerte oder die Realisierung exakter Anbindungspunkte mit dem Gießprozess alleine dargestellt werden. Daher muss häufig eine Vielzahl weiterer Fertigungsprozesse dem Gießen nachgelagert werden, damit die vollständige Erfüllung der Anforderungen realisiert werden kann. Da diese Prozessschritte bereits für sich genommen jeweils komplexe Systeme darstellen, werden diese üblicherweise bei entsprechend spezialisierten Unternehmen umgesetzt. Dies ermöglicht zwar eine qualitätsbezogen zielgerichtete Abarbeitung unter wirtschaftlichen Randbedingungen, allerdings verursacht eine solche Arbeitsteilung weitere organisatorische und logistische Komplexität und erzeugt weitere Schnittstellen. In Abbildung 1 ist eine übliche Prozesslandschaft für den Umfang eines druckgegossenen Aluminium-Strukturbauteils dargestellt.

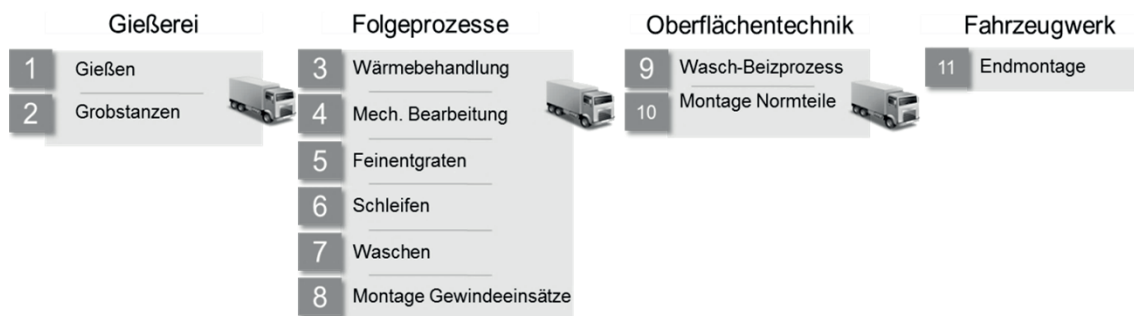


Abb. 1: Schematischer Überblick zu einer möglichen Prozessaufteilung im Rahmen einer Prozesskette zur Bearbeitung von Aluminium-Strukturbauteilen mit Darstellung der logistischen Schnittstellen unterschiedlicher spezialisierter Unternehmen

Diese Darstellung zeigt die Komplexität, die sich durch die Anzahl unterschiedlicher Unternehmen, durch die Logistikkette sowie durch die technologischen Eigenschaften der einzelnen Prozesse ergibt. Fokussiert auf Letzteres soll im Folgenden am Beispiel von Verzugsphänomenen entlang der Prozesskette gezeigt werden, welche Herausforderungen zur Begegnung der Komplexität aktuell bestehen und welche Stellhebel zur Beeinflussung der Verzugssituation der Bauteile in unterschiedlichen Bearbeitungsstadien existieren.

3. RELEVANZ DER MAßHALTIGKEIT UND GRUNDSÄTZLICHE VERZUGSPHÄNOMENE

Druckgegossene Komponenten im Automobilbau sind hinsichtlich maßlicher Toleranzen und stofflicher Eigenschaften zum einen hinsichtlich des späteren Betriebseinsatzes, zum anderen im Zusammenhang mit der Verbaubarkeit im Montagewerk zu bewerten. Je nach Fügestrategie sind die einzelnen Komponenten für eine Anwendung, etwa von Kleb- oder Schweißverfahren, zu qualifizieren. Dies bedingt neben der Qualifizierung der gegossenen Oberfläche, etwa durch Vermeidung oder Eliminieren so genannter Blister, also Schäden durch Ausgasungen bei der Wärmebehandlung [Wagensoner, 2016], auch die Einhaltung der durch die Montageprozesse geforderten Maßhaltigkeit. Grundsätzlich wird die Maßhaltigkeit durch Verzugsphänomene beeinflusst, die entlang der gesamten Prozesskette zu beobachten sind. Vor allem eine komplexe Überlagerung des initial durch das Gießen verursachten Eigenspannungszustandes mit einwirkenden Lasten entlang der einzelnen Prozessschritte kann festgestellt werden [Fent, 2001]. In Summe streben die im Bauteil befindlichen Spannungen einen Gleichgewichtszustand an, der durch sämtliche Einwirkungen entlang der Prozesskette verändert wird. Dies resultiert in einer kumulierten und sich überlagernden Verformungsausprägung bei jeder relevanten Einwirkung.

Im Grundsatz können drei unterschiedliche Phänomene beobachtet werden, die das Gleichgewicht des Eigenspannungszustandes und damit die Maßhaltigkeit des Bauteils entlang der Prozesskette beeinflussen. Einerseits kann etwa durch eine Wärmebehandlung der innere Spannungszustand verändert werden, andererseits kann durch zusätzliche äußere Belastung sowohl reversibel (elastisch) als auch nicht reversibel (plastisch) auf das Bauteil eingewirkt werden. Außerdem spielt eine Veränderung der Bauteilkörper in relevantem Umfang, etwa bei der mechanischen Bearbeitung, hinsichtlich der Veränderung des Eigenspannungszustandes eine spezifische Rolle, da das Kräftegleichgewicht mit der Kubatur und Masse des Körpers in unmittelbarem Zusammenhang steht. Diese drei ursächlichen Verzugsphänomene nach dem Druckgießprozess werden in der folgenden Tabelle zusammenfassend dargestellt.

Prozessschritt	Veränderung innerer Spannungszustand	Relevante äußere Belastung	Veränderung Körpermasse
Grobstanzen	ja	ja	ja
Wärmebehandlung (Spannungsarmglühen und Auslagern)	ja	nein	nein
Richtprozess	ja	ja	nein
Mechanische Bearbeitung (Fräsen, Bohren, Gewindeformen)	nein	nein	ja
Oberflächenputzen	nein	nein	ja, nicht relevant
Waschen	nein	nein	nein
Elemente Montage	nein	nein	nein
Waschbeiz-Passivierung	nein	nein	nein
Normteilemontage	nein	nein	nein
Verbau im Montagewerk	ja / je nach Fügeprozess)	ja / je nach Fügeprozess)	ja

Tab. 1: Geometrische Veränderungen der Bauteile entlang der Prozesskette

Diese Darstellung zeigt das multifaktorielle Einflussgebiet auf die Verzugsausprägung der Komponenten entlang der Prozesskette nach dem Gießen. Ergänzt wird diese Komplexität durch den individuellen, initialen Eigenspannungszustand unmittelbar nach dem Druckgießverfahren. Diese individuelle Ausprägung der Spannungen beim Druckgießen kann durch das unterschiedliche Verzugsverhalten von Bauteilen einer Gießcharge bei identischen Parametern einer nach dem Gießen positionieren Wärmebehandlung gezeigt werden [Dragulin, 2013].

Der Argumentation der komplexen Überlagerung der einzelnen Phänomene, gepaart mit der bauteilindividuellen Gießhistorie, vor allem vor dem bereits umgesetzten industriellen Anwendungsfall, folgend wird deutlich, welche immense Bedeutung die kontinuierliche Messung der Maßhaltigkeit und ein durchgängiges Messkonzept entlang der einzelnen Prozessschritte hat.

4. HERANGEHENSWEISE ZUR MESSUNG DER VERZUGSPHÄNOMENE ENTLANG DER PROZESSKETTE

Aus den zuvor dargestellten Zusammenhängen wird deutlich, welche Bedeutung ein durchgängiges Messkonzept zur Sicherstellung der Verbaubarkeit der bearbeiteten Aluminium-Druckgusskomponenten hat. Darüber hinaus kann ein fundiertes Wissen zu Ursache-Wirkungsphänomenen entlang der Prozesskette durch die Sammlung und die Analyse von Messdaten generiert werden.

Wesentliche Zielsetzung eines Messkonzepts für die Maßhaltigkeit der Bauteile entlang der einzelnen Prozesse ist es, eine Vergleichbarkeit der einzelnen aufgenommenen Daten zu erhalten. Diese Zielsetzung steht allerdings im Konflikt mit der Struktur des Bauteils entlang der Bearbeitung, da etwa die zu erstellende Endkontur, inklusive eines zentralen Ankerpunktes, zu Beginn der Prozesskette noch nicht zur Verfügung steht. So wird etwa das in der Automobilbranche übliche RPS (Referenzpunktsystem) explizit an einer mechanisch zu bearbeitenden Bohrung orientiert. Eine solche Situation ist an einem fiktiven Bauteil in Abbildung 2 im Zusammenhang mit einer Messlehre der Firma KES dargestellt.

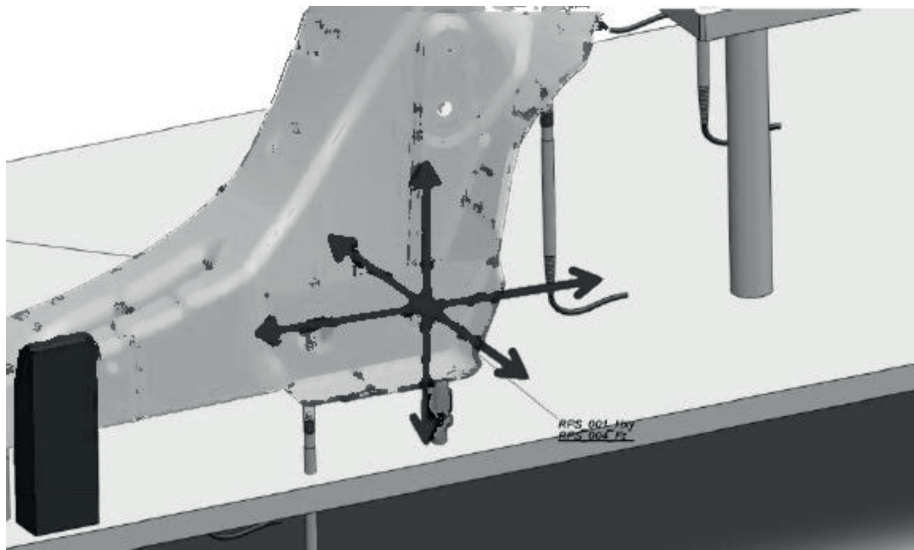


Abb. 2: Darstellung einer Positionierung einer RPS-Bohrung in einer Messlehre eines fiktiven Aluminium-Strukturbauteils

Eine initiale Herausforderung besteht in der exakten Positionierung der RPS-Bohrung während der mechanischen Bearbeitung. Als Referenzsystem kann die so genannte Rohbau-Messung dienen, welche die Ausmaße des gegossenen Bauteils etwa im Rahmen einer 3D-Koordinatenmessung identifiziert. Diese Art der Vermessung kann aufgrund der unterschiedlichen Systematik zur RPS-Messung und auch der noch zu erwartenden oben dargestellten Verzugsphänomene allenfalls als Indiz für eine spätere Maßhaltigkeit, jedoch nicht als gesicherte Verbaubarkeit dienen.

Um diesem Dilemma der unterschiedlichen Messsysteme zu begegnen, ist eine Überführung der Daten zwischen den einzelnen Systemen bzw. eine Validierung der Konformität unerlässlich. Denn beide Systeme, sowohl die Rohbauteilmessung als auch die RPS-Messung, sind die wesentliche Basis zur Sicherstellung der jeweiligen Prozessergebnisse. Dieser Konformitätsnachweis kann etwa durch eine erneute Messung nach Einbringen der RPS-Bohrung unter identischen Referenzen der Rohbaumessung erfolgen. Sicherzustellen ist dabei allerdings, dass keine weiteren relevanten Verzugsphänomene die Geometrie des Bauteils zwischen diesen beiden Messungen so verändert haben, dass die Übertragbarkeit der Messergebnisse bzw. der Bauteilgestalt nicht gegeben ist.

Daher ist davon abzuraten, dass die beiden Messungen so positioniert werden, dass ein erheblich verzugsrelevanter Prozessschritt, etwa eine Wärmebehandlung, zwischen diesen beiden Messvorgängen liegt. Im Idealfall befindet sich zwischen den beiden Messungen ausschließlich das Einbringen der RPS-Bohrung. Somit kann die Konformität der Messsysteme und eine durchgängige Nutzung der Daten gewährleistet werden.

5. FAZIT

Die vorliegende Publikation zeigt die Herausforderungen der Messung von Verzugsphänomenen entlang der komplexen Prozesskette zur Bearbeitung von druckgegossenen Aluminium-Strukturbauteilen in der Automobilherstellung. Dabei wird deutlich, welches multifaktorielle Einflussgebiet entlang der Prozesskette auf die Bauteile wirkt. Um die Stabilität einer solchen Prozesskette vor dem Hintergrund der industriellen Fertigung weiterhin zu erhöhen, sind vergleichbare Messdaten zum Verzugsverhalten zu erheben. Derzeit werden Untersuchungen angestellt, um die Konformität unterschiedlicher Messsysteme zu validieren. Weitere Forschungsergebnisse zur Verringerung des Messaufwandes und zur Überführung der Erkenntnisse zur Erhöhung der Prozessstabilität sind derzeit am Technologiezentrum Produktions- und Logistiksysteme PULS der Hochschule Landshut in Dingolfing vorgesehen.

6. QUELLEN

- [Pfitzer, 2016] Pfitzer, M.: Einsatz von Aluminium-Strukturbauteilen in weltweiten Fahrzeugprojekten bei Mercedes Benz. Konferenzbeitrag: VDI Fachtagung „Gießen von Fahrwerks und Karosseriekomponenten“, Kassel 17.02. – 18.02.2016, VDI-Verlag 2016.
- [Roeren, 2016] Roeren S., Wagensohn M.: Prozessstabilisierung durch automatisierte Erkennung von Oberflächenfehlern in der Gesamtprozesskette AL-Druckgussbearbeitung. Konferenzbeitrag: VDI Fachtagung „Gießen von Fahrwerks und Karosseriekomponenten“. Kassel 17.02. – 18.02.2016, VDI-Verlag 2016.
- [Fent, 2001] Fent A.: Einfluss der Wärmebehandlung auf den Spannungszustand von Gussteilen. Dissertation, TU München, 2001.
- [Dragulin, 2013] Dragulin D., Belte M.: Experimental results – Infrared heat transfer for thin-walled aluminium castings. Aluminium Journal, 9/2013.

PROZESSSTABILISIERUNG, EFFIZIENZSTEIGERUNG UND TECHNOLOGIEWEITERENTWICKLUNG DURCH AUTOMATISIERTE OBERFLÄCHENFEHLERKENNUNG IM RAHMEN DER GESAMTPROZESSKETTE ALUMINIUM-STRUKTURBAUTEILE – EINFÜHRUNG EINES WÜRFELMODELLS ZUR EINORDNUNG VON ERKENNTNISSEN

Matthias Wagensonner¹, Severin von Kuepach², Prof. Dr.-Ing. Sven Roeren³

¹ Technologiezentrum Dingolfing GmbH – An-Institut der Hochschule Landshut, matthias.wagensonner@tech-ding.de

² Hochschule Landshut in Dingolfing, Forschungsschwerpunkt Produktions- und Logistiksysteme, severin.kuepach@haw-landshut.de

³ Hochschule Landshut in Dingolfing, Forschungsschwerpunkt Produktions- und Logistiksysteme, sven.roeren@haw-landshut.de

Abstract: Die Zielsetzung einer effizienten Fertigung mit zunehmend wachsenden Leichtbauanforderungen verlangt eine ganzheitliche Betrachtung von Produkteigenschaften und Prozessbestandteilen. Die Gesamtprozesskette Aluminium-Strukturbauteile beinhaltet komplexe technologische Prozessschritte mit vielen Einstellparametern wie Druckgießen, Wärmebehandlung oder Richten sowie vielschichtiger Zusammenhänge hinsichtlich Verursacher- und Entdeckerprozessschritt bezogen auf Qualitätsregelkreise. Diese Veröffentlichung zeigt eine Methodik zur Identifizierung, Validierung und Nutzung von Wirkketten bei komplexen, multifaktoriellen Ursachegebieten und Prozesszusammenhängen. Die daraus entstehenden Ergebnissen lassen sich auf bereits existierende Prozessketten, sowie vorgelagert in der Serienplanung und Forschung anwenden und zielen auf Prozessstabilisierung, Effizienzsteigerung und Technologieweiterentwicklung.

KEYWORDS: ALUMINIUM-STRUKTURBAUTEILE, DRUCKGUSS, BLISTER, KOMPLEXITÄT, PROZESSVERBESSERUNG

1. AUSGANGSLAGER UND BESCHREIBUNG DER HERAUSFORDERUNGEN

Der prognostizierte Absatz von Aluminium-Strukturbauteilen erfährt aktuell und in den kommenden Jahren ein starkes Wachstum. Dieses Wachstum wird voraussichtlich in allen relevanten Märkten geschehen, sodass in der Reaktion darauf von einer deutlichen Zunahme von Produktionskapazitäten sowohl in Europa als auch in NAFTA und Asien auszugehen ist. [Zangerle, 2016]

Aufgrund möglicher Funktionsintegration bieten Aluminium-Strukturbauteile gegenüber klassischen Lösungen aus Stahl oder Aluminium Vorteile hinsichtlich der wachsenden Anforderungen an Bauteileigenschaften und Komplexität. [Hennings, 2016]

Der gesellschaftliche und politische Druck zur Erfüllung der Emissionsvorgaben für Fahrzeughersteller führt zu einer stetigen Zunahme der Funktionsintegration, um in Relation dazu Gewichtseinsparungspotenziale zu bergen. Dies bestimmt im Wesentlichen die relevanten Entwicklungs- und Forschungsumfänge bei den Fahrzeugherstellern. Dadurch entstehen komplexe Prozessketten und zwangsläufig höhere Anforderungen hinsichtlich Prozessstabilität und Abstimmung zwischen den einzelnen Prozessschritten.

Die Einsetzbarkeit der Strukturbauteile und die Realisierung dezidierter Funktionen und Anforderungen bedingen einen teilweisen hohen Aufwand an Nachbearbeitung nach dem eigentlichen Kernprozess „Druckgießen“. Mechanische Bearbeitung und der Einsatz von Schleifprozessen ermöglicht es, dass Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit erreicht werden. Für die Anbindungen weiterer Bauelemente können zudem noch Drahtgewindeeinsätze oder Gewinde eingebracht werden. Abhängig von Legierungsart und späterem Einsatzort erfolgt eine Wärmebehandlung zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Diese setzt sich in der Regel aus den Teilprozessschritten Lösungsglügen, Abschrecken und Auslagern zusammen. Ein zusätzlich möglicher Richtprozess dient zur Einhaltung spezifizierter Toleranzen an festgelegten Positionen, welche für den späteren Verbau in nachfolgenden Prozessen, etwa im Karosseriebau, von Bedeutung sind. Bei der abschließenden Oberflächenbeschichtung wird je nach Hersteller eine kathodische Tauchlackierungsbeschichtung oder Beizpassivierung als Oberflächenschutz und Vorbereitung für nachfolgende Prozesse, etwa zur Sicherstellung benötigter Adhäsionskräfte beim Kleben, durchgeführt.

Diese Prozesse ergeben den Betrachtungsgegenstand des vorliegenden Berichtes und werden in Abbildung 1 zusammenfassend dargestellt.

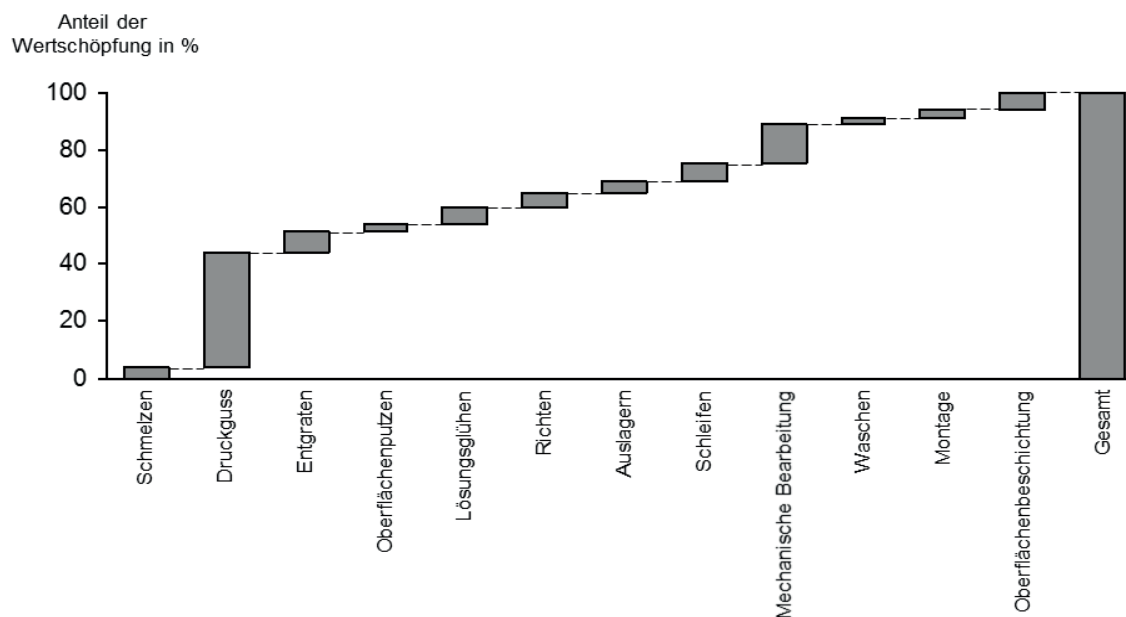


Abb. 1: Schematische Darstellung der Wertschöpfungsanteile einer typischen Prozesskette Aluminium-Strukturbauteile (Darstellung auf Basis von Erkenntnissen des Arbeitskreises AFG am Technologiezentrum PULS der Hochschule Landshut in Dingolfing)

Durch die Ausreizung der produktspezifischen Eigenschaften der Bauteile, etwa hinsichtlich Festigkeitswerte oder Maßhaltigkeit ergibt sich eine deutliche Zunahme der Komplexität an Qualitätskriterien und Anforderungen der beschriebenen Teilprozesse in der Produktion. Diese Komplexität wird etwa deutlich, wenn man das Verzugsverhalten in Abhängigkeit von der Eigenspannungssituation während der Wärmebehandlung betrachtet, welches in hohem Umfang durch das Ergebnis des urformenden Gießprozesses beeinflusst wird.

Eine weitere potenzielle Qualitätsbeeinträchtigung über mehrere Prozessschritte hinweg besteht in der Ausbildung von so genannten „Blistern“, die während einer Wärmebehandlung sichtbar werden. In Zusammenhang mit Druckguss wird unter Blister die Aufwölbung der Gussstückoberfläche unter dem Expansionsdruck einer eingeschlossenen Gas- beziehungsweise Luftblase verstanden (siehe Abb. 2). [Brunhuber/ Hasse, 1997]

Ein Blister ist ein makroskopischer Fehler auf einer Aluminiumdruckgussoberfläche und besitzt in der Regel die Form einer abgerundeten Blase. Es ist bewiesen, dass die Blasenbildung durch Gaseinschlüsse während des Gießprozesses und/oder durch Ausscheidungen eines ungelösten Gases eines Festmetalls entsteht. [Verran et al., 2006]

Ersteres passiert typischer Weise während des Druckgießprozesses, wenn flüssiges, turbulentes Metall mit hoher Geschwindigkeit in die Form geschossen wird, dabei werden Gase im flüssigen Metall eingeschlossen. Bei Aluminiumlegierungen sind es dabei hauptsächlich Stickstoff, Kohlendioxid und Wasserstoff. [Toda et. al., 2014]

Blister treten gewöhnlicher Weise während der Wärmebehandlung auf, da sich dabei die eingeschlossenen Gase im festen Bauteil aufgrund der ansteigenden Temperatur und der damit verbundenen Abnahme der Materialfestigkeit ausdehnen.

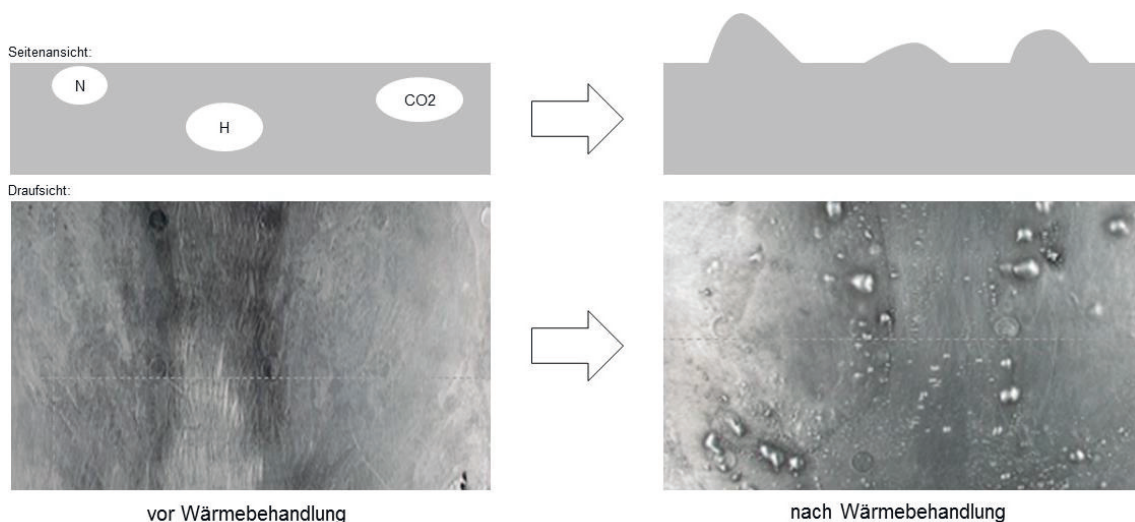


Abb. 2: Grafische Darstellung Blisterentstehung

Derzeit erfolgt die Qualitätskontrolle der Bauteile nach der Wärmebehandlung meist manuell durch eine Sichtkontrolle der einzelnen Werker. Die Bewertung und Klassifizierung von (potenziellen) Fehlstellen ist daher stark subjektiv beeinflusst. Dadurch können Ergebnisse zur Verbesserung der vorherigen Prozesse nur begrenzt genutzt werden und die Identifizierung von Wirkketten zwischen den Prozessen lässt sich nicht effizient und faktenbasiert darstellen.

Im Folgenden soll das konzeptionelle Vorgehen des Forschungsprojekts „automatisierte Blistererkennung von aluminiumgegossenen Strukturbauteilen“ am Technologiezentrum Produktions- und Logistiksysteme der Hochschule Landshut in Dingolfing beschrieben werden, anschließend werden noch Wirkgrößen, auf welche sich die industrielle Anwendung der entwickelten Methodik auswirkt.

2. KONZEPTIONELLES VORGEHEN

Die zuvor beschriebene Komplexität der Prozesskette Aluminium-Strukturbauteile erfordert eine Beschreibung zur Einordnung von Erkenntnissen und Weiterentwicklungen. Dadurch kann das System an sich stabilisiert werden und die Auswirkung von Veränderungen einzelner Stellhebel auf die relevanten Messgrößen in unterschiedlichen Abstraktionsebenen dargestellt werden.

Die Form eines Würfels wurde gewählt, da hierbei die Vernetzung unterschiedlicher Abstraktionsebenen in Bereichen der einzelnen Prozessreifegrade, Erkenntnisreifegrade und der Größe des Betrachtungsraumes dargestellt werden können.

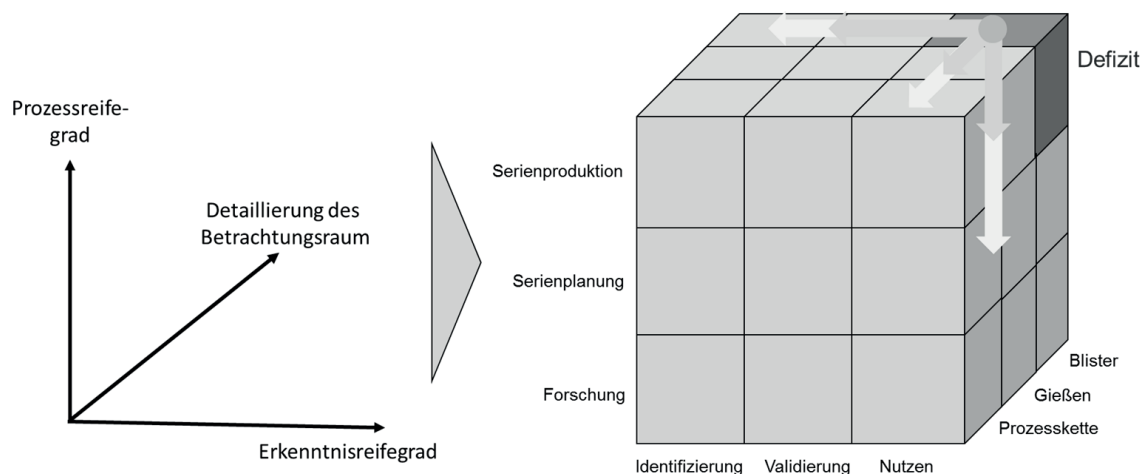


Abb. 3: Würfelmodell: Wirkkettenidentifizierung in der Prozesskette Aluminium-Strukturbauteile und deren Anwendung in den Themenfeldern Serienproduktion, Serienplanung, und Forschung

Diese Art der Darstellung impliziert einerseits, dass die drei Dimensionen unabhängig voneinander beschreibbar und deren Ausprägungen eigenständig zu beschreiben sind. Andererseits zeigen sich so mögliche Interaktionen, etwa die Identifizierung von Blistern in einer laufenden Serienproduktion und eine Verbindung zu Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette.

Folglich kann das Ziel der am Technologiezentrum Produktions- und Logistiksysteme der Hochschule Landshut in Dingolfing entwickelten Methodik, nämlich die Identifizierung, Validierung und Nutzung von Wirkketten zwischen dem Kernprozess Druckgießen und Blisterentstehung in der Gesamtprozesskette Aluminium-Strukturbauteile im Rahmen dieses Würfels eingeordnet werden. Ebenfalls ist damit die Anwendung auf die Themenfelder Forschung, Serienplanung und Serienproduktion erklärbar und zeigt in unterschiedlichen Abstraktionsebenen den Nutzen dieser Vorgehensweise.

Auf Basis dieser Überlegungen lässt sich mit Hilfe des Würfelmodells eine konkrete Vorgehensweise zur faktenbasierten Identifizierung von Wirkketten in einem multifaktoriellen Ursachengebiet und deren Nutzung in der Serienproduktion, -planung und Forschung aufzeigen, welche im Folgenden erläutert wird.

Wesentlicher Ausgangspunkt einer objektivierten Fehlererkennung liegt in einem klar spezifizierten Raum möglicher Merkmalsausprägungen. Dafür muss eine einheitliche und transparent anwendbare Klassifizierung von Anforderungen aber auch von gemessenen Größen etabliert sein, um Algorithmen zur Fehlererkennung und zur Vergleichbarkeit von Messergebnissen realisieren zu können. Im Rahmen eines dafür gegründeten automobilen Arbeitskreises mit den Vertretern der wesentlichen OEMs und Lieferanten wurden im April 2016 branchenweite Standards zur Beschreibung von Blistern definiert.

Auf Basis der Anforderungen hinsichtlich Fehlererkennung und Klassifizierung sowie weitere Rahmenbedingungen sind in diesem Zusammenhang verschiedene Konzepte zur automatischen Oberflächenfehlererkennung ausgearbeitet und bewertet worden. Anschließend sind diese konstruktiv und softwaretechnisch ausgearbeitet worden und in die Erstellung einer Pilotanlage für weitere Tests eingeflossen. Nach vorheriger Validierung der Messmethodik anhand von praxisnahen Einsätzen sind erste Bauteilserien umgesetzt und dadurch die Funktion der Methodik nachgewiesen worden.

Zusammenfassend ist die Vorgehensweise in Abbildung 4 dargestellt.

Im Folgenden soll dann am Beispiel von Blistern verstärkt die Auswirkung der Methode auf die industriell relevanten Wirkgrößen, vor allem eine Reduktion der Kosten und Erhöhung der Prozessstabilität, beschrieben werden.

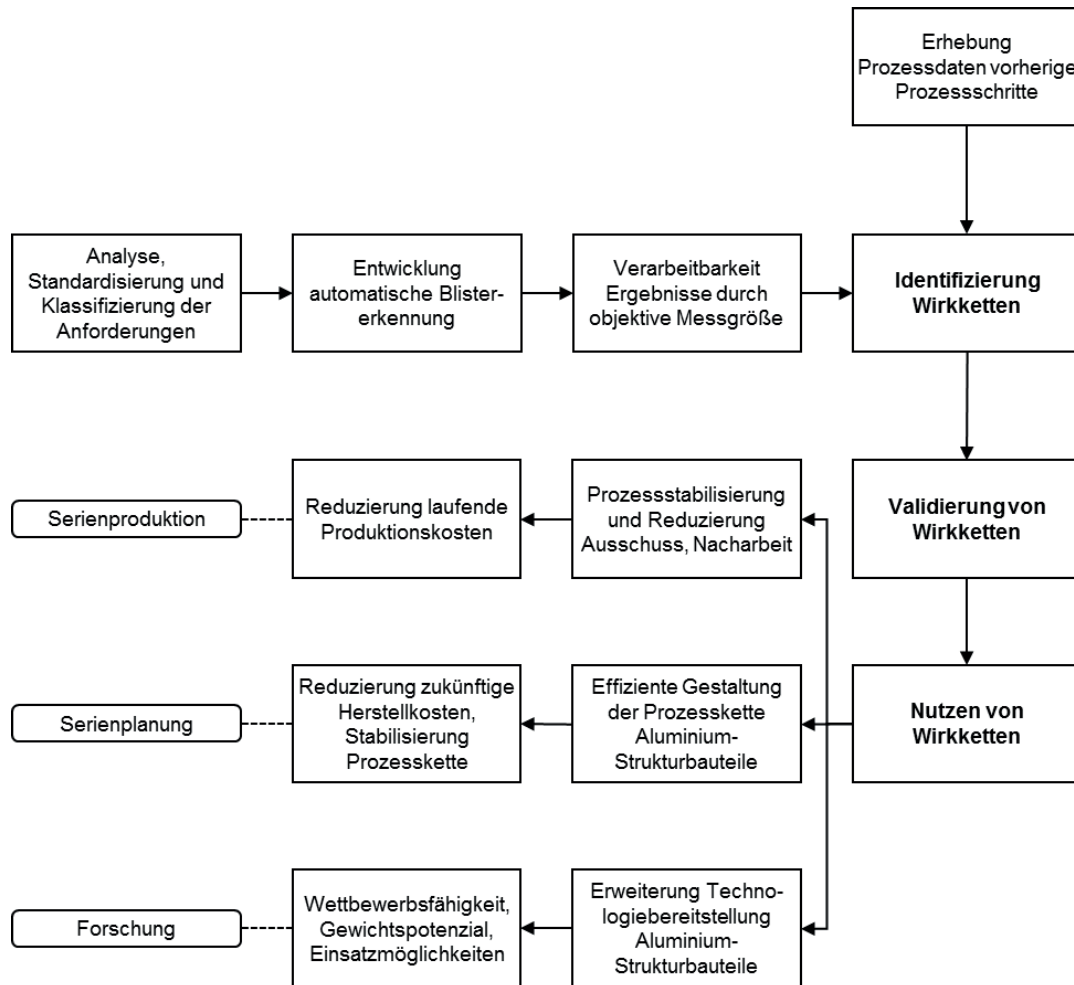


Abb. 4: Vorgehensweise zur Prozessstabilisierung, Effizienzsteigerung und Technologieerweiterung durch automatisierte Oberflächenfehlererkennung in der Gesamtprozesskette Aluminium-Strukturbauteile

3. NUTZENDARSTELLUNG DER ANWENDUNG DES WÜRFELMODELLS AM BEISPIEL BLISTERERKENNUNG UND -BEWERTUNG

Bezugnehmend auf das in Abbildung 3 dargestellte Würfelmodell wirkt die industrielle Anwendung der entwickelten Methodik auf alle beschriebenen Bereiche des Prozessreifegrads, nämlich der Serienproduktion, der Serienplanung und der Forschung. Im Folgenden werden diese Gedanken näher ausgeführt.

Wirkung auf die Serienproduktion

Die faktenbasierte Identifizierung von Wirkketten durch eine objektivierte Messgröße im Bereich der Serienproduktion wirkt sich direkt positiv auf die Prozessüberwachung, Prozessstabilisierung und vor allem Prozesseffizienz aus. In einer laufenden Serienproduktion lässt sich durch das Verständnis der Blisterentstehung das Niveau der fehlerbehafteten Teile reduzieren. Auch in der unmittelbaren Vorbereitung der Serienproduktion und einer so genannten Anlaufproduktion kann das Einstiegsniveau mit dem Kenntnis um diese Zusammenhänge verbessert werden.

Weiterhin entsteht durch die Möglichkeit einer automatisierten Umsetzung der Blisterdetektion der Effekt einer deutlich erhöhten Prozesssicherheit.

Wirkung auf die Serienplanung

Im Wesentlichen wirken die gewonnenen Erkenntnisse während der Planungs- und Industrialisierungsphase auf die Gewinnung von Planungssicherheit. Damit ist gemeint, dass planungsseitige Annahmen, wie bspw. die Ausschussquote, fundierter getroffen werden können. Je exakter Anforderungen und Informationen im Vorfeld verfügbar sind, desto optimierter lässt sich ein Wertstrom gestalten, was sich letztendlich auf Investitions- und Betriebskosten auswirkt.

Wirkung auf die Forschung

Die Anwendung von Erkenntnissen hinsichtlich der Entstehung von Blistern lässt eine weitere Ausreizung der aktuell angewendeten Technologien im Rahmen der Prozesskette Aluminium-Druckguss zu. Dies ermöglicht die weitere Reduzierung des Gewichts, die Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten oder die Gestaltung von noch komplexeren Bauteilen gemäß der oben beschriebenen Zielsetzungen zur Anwendung dieser Prozesskette. Letztendlich wirken sich all diese Faktoren positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit der Technologie Aluminium-Strukturbauteile gegenüber Stahl, CFK und andere Aluminium-Technologien aus.

Mit dem im Rahmen der vorliegenden Publikation vorgestellten Würfelmodell zur Einordnung der Erkenntnisse wird es ermöglicht, die Zusammenhänge der komplexen Wirkungsmechanismen im Rahmen der Blisterdetektion bei Aluminium-Druckguss in unterschiedlichen Abstraktionsebenen darzustellen. Dadurch wird deutlich, welcher Nutzen mit einer automatisierten, prozesssicheren Detektion von Blistern unmittelbar für die Serienproduktion aber auch mittelbar für Planungs- und Forschungsumfänge verbunden ist.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Aluminium-Strukturbauteile gewinnen in der Automobilindustrie in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung. Zukünftige Gewichts- und Kostenziele erfordern eine ständige Optimierung und Weiterentwicklung der Technologie. Die in dieser Prozesskette entstehende Komplexität erfordert eine Möglichkeit zur Einordnung von Erkenntnissen und Weiterentwicklungen. In diesem Manuskript wird ein Ansatz zur Einordnung von Erkenntnissen unterschiedlicher Reife in verschiedenen Abstraktionsebenen in Form eines Würfelmodells dargestellt. Aus diesem Würfelmodell kann anschließend eine Vorgehensweise zur Identifizierung, Validierung und Nutzung von Wirkketten in den Bereichen Serienproduktion, Serienplanung und Forschung abgeleitet werden. Grundlage für die Identifizierung von Wirkketten ist eine exakte Definition und objektive Erfassung der Stell- und Messgrößen. Durch vollständige Transparenz über Wirkketten zwischen allen Haupt- und Teilprozessen kann schließlich ein Optimum bezogen auf Prozessstabilisierung, Effizienzsteigerung und Technologieweiterentwicklung erreicht werden.

5. QUELLEN

- [Zangerle, 2016] Zangerle, S. W.: Karosserie Strukturgussbauteile im globalen Automotive-Markt. Konferenzbeitrag VDI-Fachtagung „Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten“, Kassel 17.02.-18.02.2016, VDI-Verlag, 2016.
- [Hennings, 2016] Zangerle, S. W.: Chancen und Herausforderungen bei der Fertigung von Strukturguss-Komponenten in globalisierten Märkten. Konferenzbeitrag VDI-Fachtagung „Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten“, Kassel 17.02.-18.02.2016, VDI-Verlag, 2016.
- [Brunhuber/ Hasse, 1997] Brunhuber, E.; Hasse, S.: Gießerei Lexikon, Schiele & Schön Verlag, 1997.
- [Verran et al., 2006] Verran, G. O. et al.: Influence of injection parameters on defects formation in die casting. International Journal of Materials Processing Technology, 2006.
- [Toda et. al., 2014] Toda, H. et al.: Formation behavior of blister in cast aluminium alloy. International Journal of Cast Metals Research 27 (6), 2014.

