

Sophie Gröger, Marco Weißgerber (Hrsg.)

Sächsisches Geometriesymposium 2020



Sophie Gröger, Marco Weißgerber (Hrsg.)

# **SÄCHSISCHES GEOMETRIESYMPIOSIUM 2020**

Tolerierung | Fertigung | Messtechnik | Daten

**Tagungsband**



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

**Universitätsverlag Chemnitz  
2020**

## Impressum

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Titelgrafik: Sven Fiebig  
Satz/Layout: Marco Weißgerber

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

readbox unipress  
in der readbox publishing GmbH  
Rheinische Straße 171  
44147 Dortmund  
<https://www.readbox.net/unipress>

ISBN 978-3-96100-109-5

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-367750>

## **PROGRAMMKOMITEE**

**Prof. Dr.-Ing. habil. Sophie Gröger**

Professur Fertigungsmesstechnik  
Technische Universität Chemnitz

**Prof. Dr.-Ing. Marco Gerlach**

Professur Digitales Fertigungs- und Qualitätsmonitoring  
Hochschule Mittweida

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Rosenbaum**

Professur Fertigungsmesstechnik / Qualitätsmanagement  
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

**Prof. Dr.-Ing. Teresa Werner**

Professur Qualitätsmanagement / Fertigungsmesstechnik  
Westsächsische Hochschule Zwickau

**Prof. Dr. sc. ETH Alexander Hasse**

Professur Maschinenelemente und Produktentwicklung  
Technische Universität Chemnitz

**Prof. Dr.-Ing. Matthias Putz**

Professur Werkzeugmaschinenkonstruktion und Umformtechnik  
Technische Universität Chemnitz

**Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig**

Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik  
Technische Universität Kaiserslautern

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Schubert**

Professur Mikrofertigungstechnik  
Technische Universität Chemnitz

**Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch**

Institut für Produktionsmesstechnik  
Technische Universität Braunschweig

Alle schriftlichen Vollbeiträge des Sächsischen Geometriesymposiums haben ein Peer-Review-Verfahren durchlaufen und wurden durch die Mitglieder des Programmkomitees begutachtet. Ausgenommene Beiträge sind entsprechend gesondert gekennzeichnet (\*).

---



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Keynote: Geometrie als interdisziplinärer Träger funktions- und fertigungsspezifischer Informationen*</b> Gröger, S.	<b>1</b>
<b>Übersetzung von Formabweichungen in Abweichungen der funktionsbestimmenden Parameter am zylindrischen Gleitlager</b> Ebermann, M.; Prase, B.; Hasse, A.	<b>11</b>
<b>Besonderheiten der Maßänderungen von Kunststoffbauteilen im Vergleich zu Metallen</b> Falke, A.; Osswald, T. A.	<b>25</b>
<b>Stabile und reproduzierbare Beschreibung der Kantengestalt im Strömungsschleifen</b> Uhlmann, E.; Roßkamp, S.	<b>39</b>
<b>Herausforderungen bei der funktionsorientierten Tolerierung von Blechbauteilen</b> Bohn, M.	<b>53</b>
<b>Simulationsbasierte Optimierung von Einstellparametern für die Messung mittels Röntgentomografie</b> Christoph, R.; Weise, H.; Kachelrieß, M.	<b>61</b>
<b>Erweiterte Vorgehensweise zur Fusion fokusvariierend und konfokal extrahierter Messdaten</b> Segel, F.; Weißgerber, M.; Gröger, S.	<b>71</b>
<b>Vertical Focus Probing zur 3D Mikrogeometriemessung bei Stanzwerkzeugen</b> Zangl, K.; Danzl, R.; Helmli, F.	<b>73</b>
<b>Methode zur Bewertung der Flexibilität von Prozessen</b> Schmidt, M.	<b>83</b>
<b>ISO GPS-System als prozessübergreifende Sprache im Produktentstehungsprozess</b> Schuldt, J.; Hofmann, R.; Gröger, S.	<b>93</b>
<b>Keynote: Digitalisierung und Geometriemessung in der Produktion im Wandel der Zeit*</b> Imkamp, D.; Schönberg, B.	<b>103</b>

---

---

<b>Fahrsicherheit und Komfort: Geometrieanforderungen im Fahrwerk</b> Mayer, R.; Körner, F.	<b>113</b>
<b>Zwei-Photonen Laserlithografie zur individuellen Herstellung von Normalen für die optische Rauheitsmesstechnik</b> Seewig, J.; Eifler, M.; Hering, J.; v. Freymann, G.	<b>125</b>
<b>Umfassende Texturanalyse an additiv gefertigten Bauteilen</b> Konrad L. Hoffmeier, Carl Bauer, Steffen Hahne	<b>135</b>
<b>Geometrische Oberflächencharakterisierung von durch spanende Verfahren hergestellten Mikrostrukturen</b> Funke, R.; Börner, R.; Schubert, A.	<b>143</b>
<b>Bestimmung der Formabweichung über ein sensorisches Werkzeug während der Glattwalzbearbeitung mit Hilfe eines Virtuellen Zwillings</b> Posdlich, M.; Winkler, S.; Stöckmann, R.; Schumann, M.; Klimant, P.; Witt, M.; Putz, M.	<b>155</b>
<b>Holistische Abbildung der Gestaltänderung infolge des Strömungsschleifens</b> Hofmann, R.; Uhlmann, E.; Gröger, S.; Roßkamp, S.	<b>167</b>
<b>Auswirkung verschiedener Erfassungsstrategien auf die Messergebnisse</b> Werner, T.	<b>169</b>
<b>Studie über morphologische Effekte bei der taktilen Messung von Blisks unter Verwendung digitaler Twins</b> Schmidt, A.; Schmitt, R. H.; Peterek, M.	<b>171</b>
<b>Spezifische Scanning-Antastabweichungen auf taktilen 3D-Koordinatenmessgeräten</b> Weißgerber, M.; Fiebig, S.; Gröger, S.	<b>183</b>

---

# GEOMETRIE ALS INTERDISZIPLINÄRER TRÄGER FUNKTIONS- UND FERTIGUNGSSPEZIFISCHER INFORMATIONEN

**Sophie Gröger**

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

---

*Abstract: Geometrische Eigenschaften sind sowohl für die Erzeugung von Funktionen als auch für die Kommunikation zwischen den am Produktentstehungsprozess beteiligten Disziplinen ein wesentlicher Erfolgsfaktor. Mit der Spezifikation geometrischer Eigenschaften nach dem internationalen System der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) werden funktionsorientierte Eigenschaften an einem 3D Modell des Bauteils beschreibbar. Die Bewertung der zur Herstellung dieser Bauteile genutzten Fertigungsverfahren werden bisher ebenfalls sehr wesentlich über die Qualität der erzeugten geometrischen Eigenschaften bewertet. Ausgehend von heutigen Vorgehensweisen zur geometrischen Beschreibung, werden funktions- als auch fertigungsprozessspezifische Geometrieeigenschaften betrachtet. Die für den Austausch notwendigen Informationsflüsse werden kurz dargestellt. Der zur Optimierung von Produkten, Spezifikationsprozessen und Fertigungsverfahren notwendige Rückfluss der Messdaten wird für einen wissensbasierten Optimierungsprozess aufgezeigt.*

**KEYWORDS: GEOMETRISCHE PRODUKTSPEZIFIKATION, FUNKTION, FERTIGUNG, MESSTECHNIK, MESSDATEN, GPS-SYSTEM, PRODUKTLEBENSZYKLUS**

---

## 1. EINLEITUNG

Die Aufgabe der Fertigungsmesstechnik ist die Bereitstellung von Informationen über Produkte und Prozesse in der Produktionstechnik. [Roadmap, 2011] Mit dem Fortschreiten der Digitalisierung, veränderten Entwicklungsmethoden, reduzierten Entwicklungs- und Produktionszeiten sowie neuen Fertigungstechnologien werden an die Geometriebeschreibungen, die Charakterisierung dieser Fertigungstechnologien und Messstrategien sowie die Bereitstellung von Messdaten neue Herausforderungen gestellt.

Die Produktentwicklung stellt sich immer dem gleichen Ziel, dass am Ende ein funktionsfähiges Produkt mit geringstmöglichem Einsatz von Ressourcen in erforderlicher Qualität vorliegt. Mit der Spezifikation geometrischer Eigenschaften wird diese Funktion in eine disziplinübergreifende und eindeutige Beschreibung übertragen. Die zur Herstellung verfügbaren Fertigungstechnologien müssen folglich geometriebezogen ausgewählt und charakterisiert werden. Über die Messung und Auswertung dieser Daten wird die Verknüpfung der Fachbereiche erreicht. Die Qualität dieser Messdaten geht dabei direkt mit der Qualifizierung von Messverfahren und der Entwicklung von Strategien zur Auswahl messtechnischer Kriterien einher. Eine zielgerichtete Bereitstellung der notwendigen Informationen und die Definition von Prozessen stellt den durch die Messung erzeugbaren Mehrwert sicher.

## 2. GEOMETRISCHE SPEZIFIKATION

Mit dem internationalen System der Geometrischen Produktspezifikation und Verifikation (GPS) existieren Regeln und Konzepte als Werkzeugkasten für die geometrische Beschreibung funktionaler Eigenschaften und deren messtechnischer Bewertung. [14638, 2015] Es wird zwischen Rauheit, Maß-, Form- und Lagetoleranzen unterschieden. [1101, 2017; 1302, 2002; 4760, 1982]

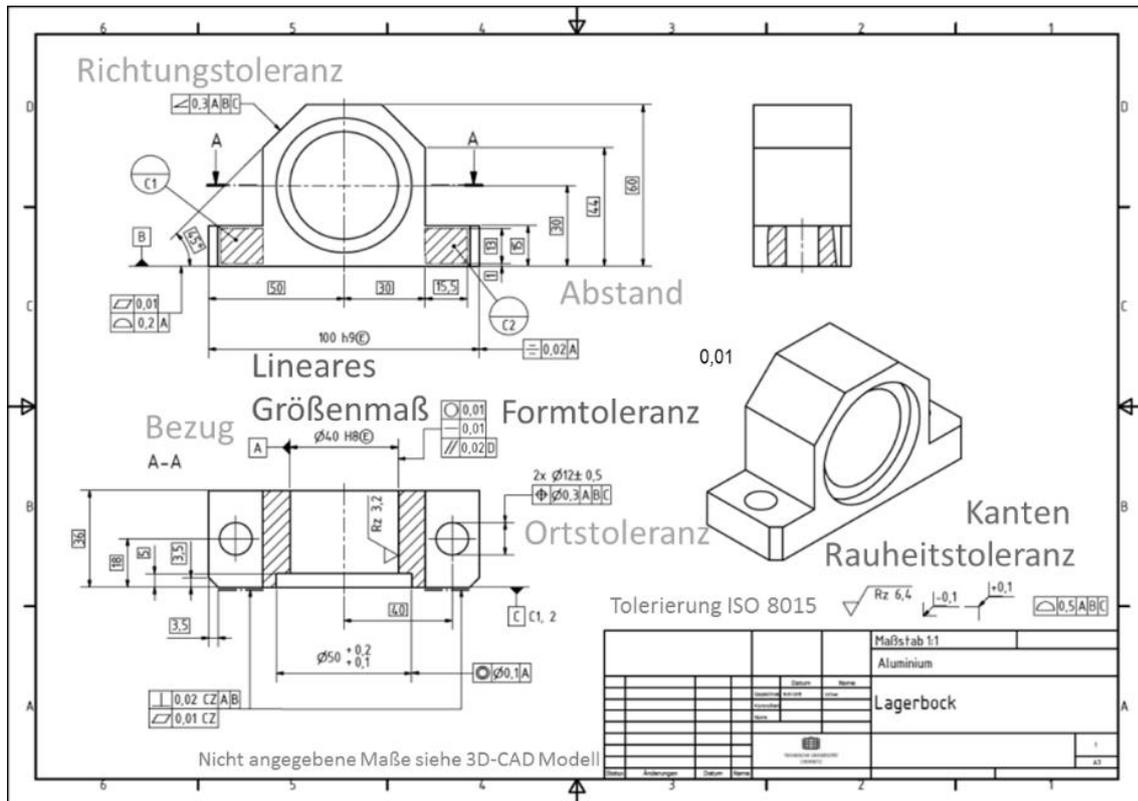


Abb. 1: Arten der geometrischen Toleranzen am Beispiel Lagerbock

Abbildung 1 zeigt eine technische Zeichnung. Die verschiedenen Arten der Tolerierung wurden dabei angewendet und gekennzeichnet. Es wird deutlich, dass umfangreiches Wissen zur Erstellung und Interpretation erforderlich ist, um selbst einfache Geometrien vollständig und eindeutig zu beschreiben.

Die Abbildung der Geometrie hat sich im Lauf der Zeit maßgeblich gewandelt (siehe Abbildung 2). Die traditionelle 2D Darstellung wird immer stärker von der 3D Modellierung der Geometrie abgelöst. Damit ist auch die Spezifikation der geometrischen Eigenschaften direkt am 3D Modell möglich.

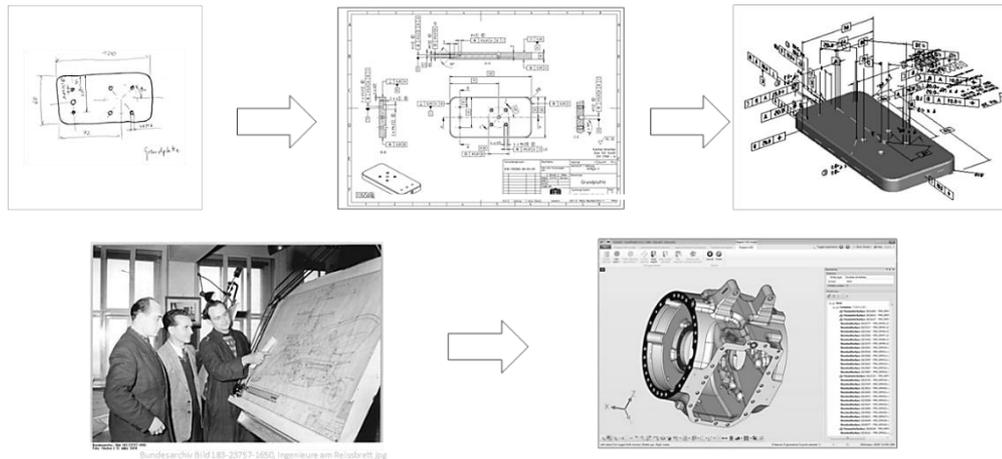


Abb. 2: Geometrische Spezifikation im Wandel der Zeit

Diese Entwicklung ist Voraussetzung, um Spezifikationsdaten, die bisher in der Zeichnung nur unzureichend informationstechnisch nutzbar waren, für nachfolgende Prozesse verarbeiten zu können.

### 3. INFORMATIONSAUSTAUSCH IM PRODUKTLEBENSZYKLUS

Aus Daten werden, wenn sie in Kontext gesetzt werden, Informationen. [Knappe, 1999] In Bezug auf geometrische Eigenschaften werden somit z. B. die Spezifikation, Verfahrensparameter und Messdaten zu Informationen bezüglich der Produkte und Prozesse entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Für kontinuierlichen Informationsfluss muss also gewährleistet sein, dass alle Disziplinen einen Austausch erlauben.

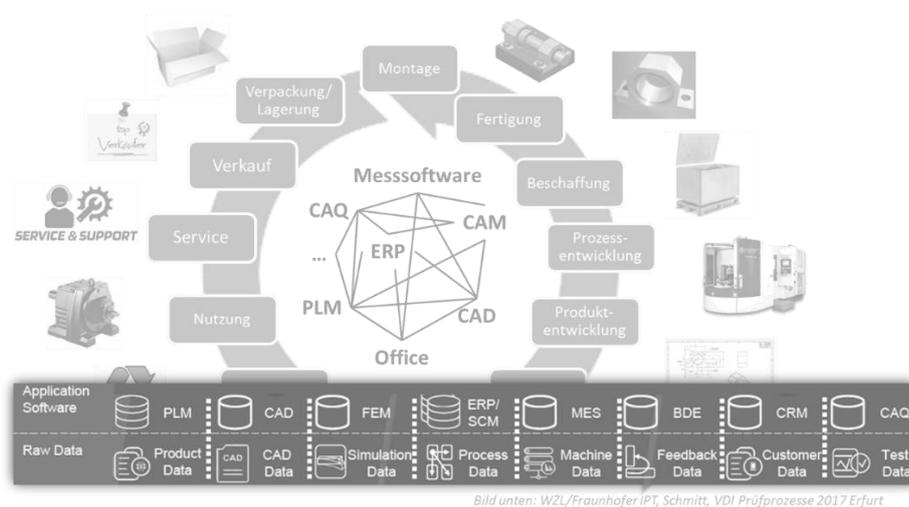


Bild unten: WZL/Fraunhofer IPT, Schmitt, VDI Prüfprozesse 2017 Erfurt

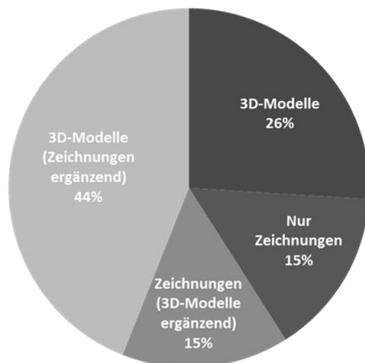
Abb. 3: Software und Datenflüsse im Produktlebenszyklus

Mit der beispielhaften Zuordnung verschiedener Software und damit verbundener Daten (Abbildung 3) wird deutlich, dass einerseits eine große Vielfalt existiert, z. B. Entwicklung, Fertigung, Messtechnik oder Unternehmensprozessmanagement, andererseits aber kaum oder nur unzureichender

Austausch der Daten auf Grund unterschiedlicher Formate zwischen den Systemen möglich ist.

Zur Art des Datenaustausches in und zwischen Unternehmen hat beispielsweise eine Umfrage die in Abbildung 4 gezeigten Ergebnisse geliefert. Dabei wird deutlich, dass bisher noch ein sehr großer Anteil der Unternehmen auf Basis der Zeichnungen kommuniziert und 3D Modelle stärker in die Programmierung der Maschinen eingebunden sind.

Welche Art des Datenaustausches wird genutzt?



Wo wird das 3D-Modell im Unternehmen genutzt?

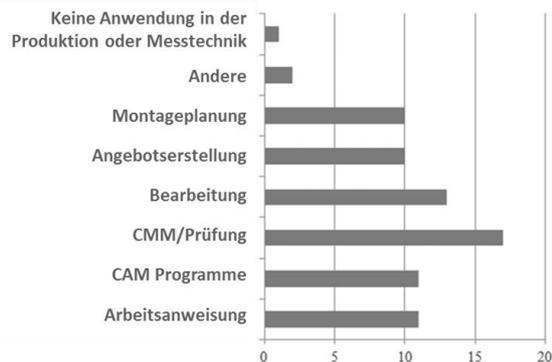


Abb. 4: Datenaustausch in den Unternehmen [nach Ruemler, 2017]

Aktuelle Entwicklungen zur modellbasierten Spezifikation (vgl. Abbildung 5) [z. B. Cicconi, 2016] und den damit angestrebten Konzepten zu modellbasierten durchgängigen Produktionsweisen zielen auf die Unterstützung durchgängiger Informationsflüsse ab.

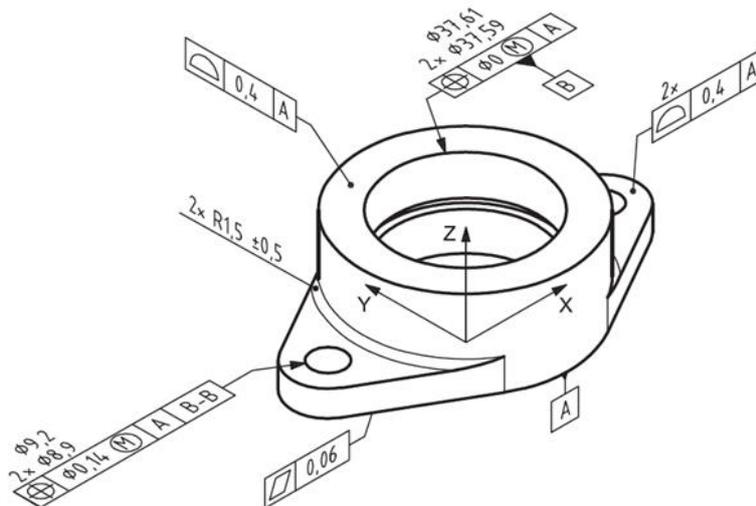


Abb. 5: Auszug aus der ISO 16792 zur modellbasierten Spezifikation [16792, 2015]

#### 4. FUNKTIONS- UND PROZESSSPEZIFISCHE GEOMETRIEEIGENSCHAFTEN

Die im Abschnitt 2 beschriebenen Geometrieigenschaften sollen sowohl die Funktionen der Bauteile als auch fertigungsprozessspezifische Eigenschaften abbilden. Die im GPS-System beschriebenen Eigenschaften sind dabei auf die in der DIN 4760 beschriebenen Ordnungen (Abbildung 6) zurückzuführen. Die Abbildung verdeutlicht in der letzten Spalte, dass die geometrischen Eigenschaften den Entstehungsursachen zugeordnet werden.

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

Abb. 6: Ordnungen der Gestaltabweichungen nach DIN 4760 [4760, 1982]

Nachfolgend wird detaillierter zwischen funktions- und prozessspezifischen Eigenschaften unterschieden.

##### 4.1 Funktionseigenschaften

Die Funktionseigenschaften lassen sich den verschiedenen Maschinenelementen [Decker, 2014] und den in der Abbildung 7 dargestellten Eigenschaften zuordnen.

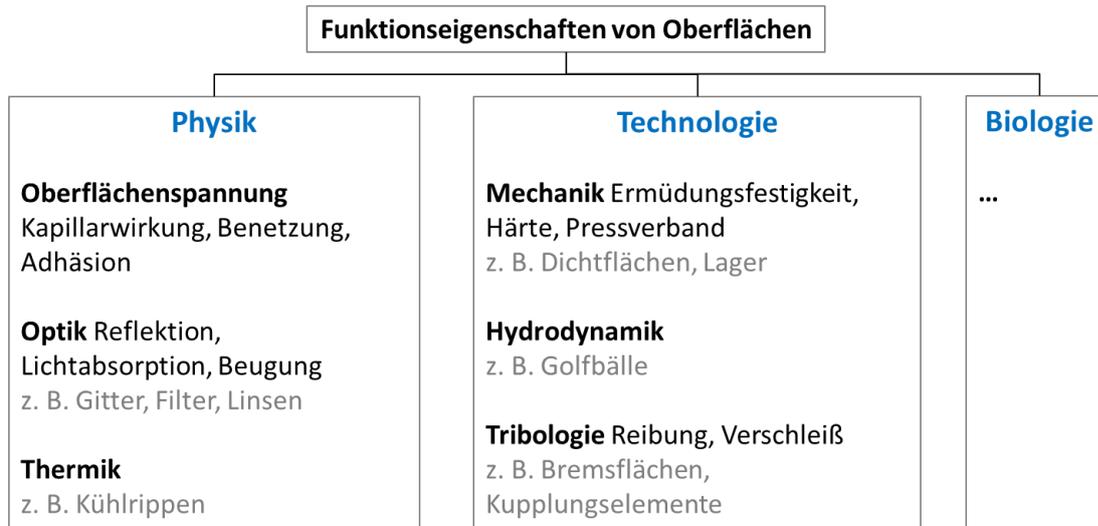


Abb. 7: Funktionseigenschaften von Oberflächen [nach Bruzz, 2008]

Die Beschreibung der Funktionen ist heute noch nicht ausreichend und kann einerseits durch eine verbesserte Nutzung des GPS-Systems und den darin enthaltenen Werkzeugen erfolgen, aber gleichzeitig auch neue Beschreibungskonzepte erfordern. Voraussetzung ist für beides ein Verständnis der funktionskritischen Eigenschaften der Geometrie.

Die in der Abbildung 1 dargestellte technische Zeichnung erfüllt die Anforderung an eine funktionsorientierte Spezifikation. Sowohl das Bezugssystem als auch die Begrenzung der Abweichungen der einzelnen Geometrielemente sind für die geforderte Funktion der Fügbarkeit eines Lagers, der Aufnahme einer Welle und der Montage in einer Baugruppe festgelegt. Die Überlagerung der Messdaten mit dem 3D Modell erlaubt eine Auswertung, z. B. der Position der Bohrung gegenüber dem Bezugssystem.

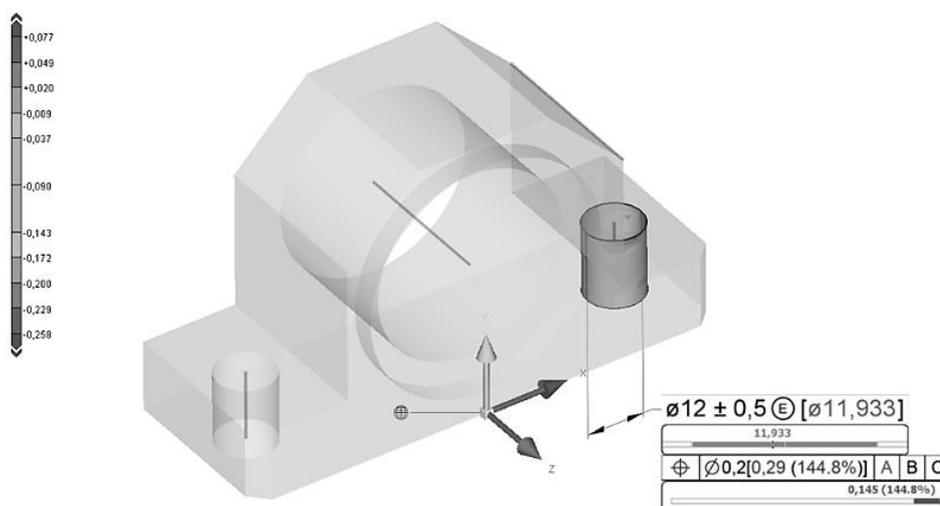


Abb. 8: Darstellung funktionsrelevanter Abweichungen am 3D Modell

## 4.2 Prozessspezifische Eigenschaften

Im Gegensatz zur funktionalen Beschreibungen sind die prozessspezifischen Eigenschaften die Abbildung der technologiebedingten Grenzen der Erzeugung idealer Bauteile. Mit der Entwicklung neuer und Erweiterung bestehender Fertigungsverfahren besteht auch hier die Notwendigkeit, die bestehenden Betrachtungskonzepte bezüglich der Geometriebewertung zu überdenken. Beispielhaft soll das an der Auswertung der Messdaten nicht in Verbindung zum Funktionsbezugssystem, sondern Maschinenkoordinatensystem der Werkzeugmaschine verdeutlicht werden. Die Bohrung (Abbildung 8) in Bezug zum Maschinenkoordinatensystem ausgewertet, ermöglicht eine aus den Messdaten abgeleitete Korrektur der Maschinenachspoition (Abbildung 9). Die in der Abbildung integrierte Tabelle zeigt für die Achse der Bohrung sowohl Koordinaten- als auch Winkelabweichungen.

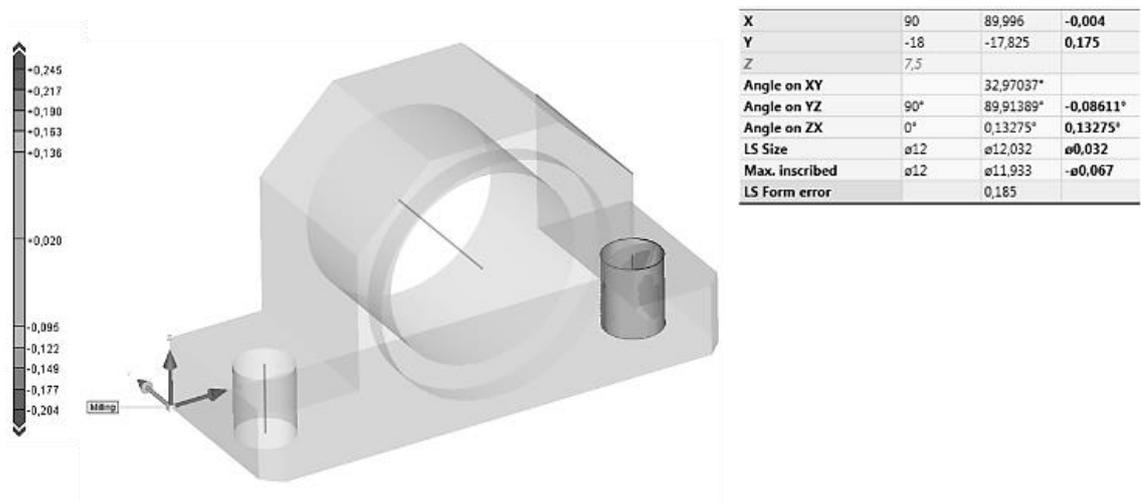


Abb. 9: Darstellung prozessrelevanter Korrekturdaten

Der Rückfluss und die Verknüpfung der geometriebezogenen Informationen sind wesentliche Voraussetzungen für einen wissensbasierten Optimierungsprozess, der auch durch Simulationen von prozessspezifischen Abweichungen (Abbildung 10) begleitet wird. Zentrale Erfolgsfaktoren für diesen Optimierungsprozess werden die Auflösung bestehender Schnittstellenprobleme und die Definition der einzelnen Prozessschritte sein.

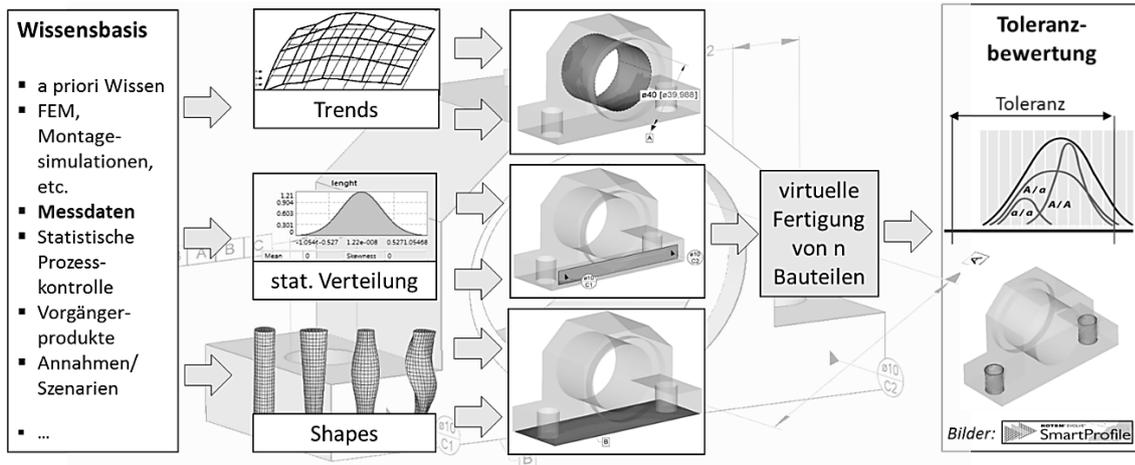


Abb. 10: Simulation prozessspezifischer Abweichungen

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Geometrie ist als Informationsträger sowohl für funktions- als auch prozessspezifische Eigenschaften etabliert. Mit dem bestehen GPS-System ist ein umfangreicher Werkzeugkasten zur Beschreibung geometrischer Eigenschaften vorhanden, der einerseits vollumfänglich genutzt und zugleich aber auch durch neue Konzepte erweitert werden muss.

Der für den geometriebezogenen Informationsfluss anstehende Wechsel von der technischen Zeichnung zur modellbasierten Spezifikation ist aktuell eingeleitet. Softwaresysteme, die in diesen Informationsfluss eingebunden sind, müssen dementsprechend an die Verarbeitung der 3D Modelle und mitgelieferten Informationen angepasst werden.

Eine globale und disziplinübergreifende Kommunikation bezüglich Geometrie mit der international genormten Sprache des GPS-Systems, bestehend aus Regeln und Zeichen, kann einen wichtigen Beitrag für die Optimierung der Produkte und Prozesse leisten.

## 6. QUELLEN

- [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.
- [Cicconi, 2016] Cicconi, P., Raffaelli, R., Germani, M.: An approach to support model based definition by PMI annotations. Computer-Aided Design and Applications, Volume 14, 2016, 526-534.
- [Decker, 2014] Decker, K H. Maschinenelemente: Funktion, Gestaltung und Berechnung. Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG, 2014.

- [Knappe, 1999] Kappe, F.: Aufbau und Nutzung von Wissenspotentialen in verteilten Organisationen. In Tagungsband zur Online '99, Düsseldorf, 1999.
- [Roadmap, 2011] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) Hrsg.: Fertigungsmesstechnik. 2020, Technologie-Roadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion. VDI Verein, Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf April 2011 ISBN 978-3-00.
- [Ruemler, 2017] Ruemler, S. P., Zimmerman, K. E., Hartman, N. W., Hedberg, T., Jr., and Barnard Feeny, A.: "Promoting Model-Based Definition to Establish a Complete Product Definition." ASME. J. Manuf. Sci. Eng. May 2017; 139(5): 051008. <https://doi.org/10.1115/1.4034625>.
- [1101, 2017] DIN EN ISO 1101:2017-09 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Beuth-Verlag, Berlin, 2017.
- [1302, 2002] DIN EN ISO 1302:2002-06 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation. Beuth-Verlag, Berlin, 2002.
- [4760, 1982] DIN 4760:1982-06 Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem. Beuth-Verlag, Berlin, 1982.
- [14638, 2015] DIN EN ISO 14638:2015-12 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Matrix-Modell. Beuth-Verlag, Berlin, 2015.
- [16792, 2015] ISO 16792:2015-12, Technische Produktdokumentation – Verfahren für digitale Produktdefinitionsdaten. Beuth-Verlag, Berlin, 2015.



# ÜBERSETZUNG VON FORMABWEICHUNGEN IN ABWEICHUNGEN DER FUNKTIONSBESTIMMENDEN PARAMETER AM ZYLINDRISCHEN GLEITLAGER

**Marko Ebermann, Björn Prase, Alexander Hasse**

TU Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik, Professur Maschinenelemente und Produktentwicklung, marko.ebermann@mb.tu-chemnitz.de

*Abstract: Zylindrische hydrodynamische Gleitlager sind aufgrund ihrer einfachen Geometrie sehr präzise und unkompliziert herstellbar. Die Eigenschaften solcher Lager werden durch den konvergenten Schmierpalt eingestellt, der sich zwischen Welle und Lager ausbildet. Wird diese empfindliche Schmierpaltgeometrie durch geometrische Abweichungen verändert, verändern sich folglich auch die typischen funktionsbeschreibenden Betriebseigenschaften (BE) des hydrodynamischen Gleitlagers, wie beispielsweise die minimale Schmierpalthöhe, die Temperatur im Schmierpalt oder der maximale Schmierfilmdruck. Da die geometrischen Abweichungen sehr vielfältig in Erscheinung treten, wird in dieser Arbeit maßgeblich der Einfluss der Rundheitsabweichung aufgezeigt. Ausgangspunkt der Untersuchungen sind Messprotokolle von Gleitlagern aus Turboladern von Schiffsdieselmotoren, die das Profil des dreiseitigen Gleichdicks als charakteristische Form zeigen. Es wird dementsprechend davon ausgegangen, dass Rundheitsabweichungen in die Änderung der BE übersetzt werden können. Ziel ist es Matrizen zu generieren, aus denen sich für einen eingeschränkten Wertebereich Rundheitsabweichungen den Änderungen der BE zuordnen lassen. Um dies zu erreichen wurden hydrodynamische Simulationen mit Parametervariationen hinsichtlich Geometrie und BE durchgeführt. Die erforschten Zusammenhänge von Geometrie und BE werden schlussendlich in einer Toleranzauswahlmatrix abgebildet. Mit dieser können Konstrukteure geometrische Abweichungen am Gleitlager funktional definieren und die Qualitätssicherung kann Abweichungen betriebspunktorientiert interpretieren.*

**KEYWORDS:** JOURNAL BEARING, PLAIN BEARING, SHAPE DEVIATION, FUNCTIONAL TOLERANCING

## NOMENKLATUR

$\alpha[^\circ], \beta[^\circ]$	Laufvariable/Winkel	$\omega[rad]$	Winkelgeschwindigkeit
$l[mm]$	Länge	$\psi[-]$	Relatives Lagerspiel
$B[mm]$	Lagerbreite	$\bar{p}[MPa]$	Spezifische Lagerbelastung
$c_{22} \left[ \frac{kN}{mm} \right]$	radiale Schmierfilmsteifigkeit	$p_{max}[MPa]$	max. Schmierfilmdruck
$d[mm]$	Nenndurchmesser Welle/Lager	$Q \left[ \frac{mm^3}{s} \right]$	Volumenstrom
$d_B[mm]$	Lagerdurchmesser	$Rm[mm]$	mittlerer Radius
$d_j[mm]$	Wellendurchmesser	$t_1[\mu m]$	Rundheitsabweichung
$e[mm]$	Exzentrizität	$t_2[\mu m]$	Geradheitsabweichung
$F_r[N]$	Radialkraft	$t_3[\mu m]$	Parallelitätsabweichung
$h_{min}, h_0[\mu m]$	Minimale Schmierpalthöhe	$t_Z[\mu m]$	Zylinderformabweichung
$n \left[ \frac{1}{min} \right]$	Drehzahl	$T_{max}[^\circ C]$	Maximale Schmierfilmtemp.

## 1. EINLEITUNG

Die GPS Grundnorm ISO 8015 [8015, 2011] verlangt nach dem Grundsatz der Funktionalität. Dem entsprechend müssen die Geometrie und deren Abweichung an der Funktion des Bauteils ausgerichtet sein. Die Umsetzung des Grundsatzes ist vor allem in physikalisch komplexen Systemen eher schwierig, da die Zusammenhänge zwischen Geometrie und physikalischer Eigenschaft (Funktion) nicht sofort erkennbar sind. Aus diesem Grund werden Bauteile häufig nach dem „trial and error“-Prinzip toleriert, da im Konstruktionsprozess eine detaillierte Toleranzbetrachtung nur in kritischen Fällen durchgeführt wird. Hätte der Konstrukteur ein Werkzeug, welches ihn bei der funktionalen Tolerierung unterstützt, könnten die häufig zu eng gewählten „Angsttoleranzen“ beseitigt werden und Kosten durch aufgeweitete Toleranzgrenzen optimiert werden. Diese Arbeit zeigt am Beispiel des hydrodynamischen zylindrischen Gleitlagers (HZGL) wie geometrische Abweichungen in Abweichungen von der Nennfunktion übersetzt werden können.

### 1.1 Aufbau und Funktionsweise des HZGL

Gleitlager werden überall dort eingesetzt, wo klassische Wälzlager an ihre Grenzen stoßen. Vor allem in Bereichen mit hohen Umfangsgeschwindigkeiten und starker Rotordynamik finden diese Maschinenelemente Anwendung. Je nach Anforderung (Steifigkeit, radiale Belastung) kommen unterschiedlich profilierte Gleitlagerformen zum Einsatz. Die einfachste Bauform ist das HZGL, dessen Funktion aufgrund des Unterschieds zwischen Wellendurchmesser  $d_j$  und dem Lagerdurchmesser  $d_B$  sowie einer Relativbewegung (Rotation  $\omega$ ) zwischen Welle und Lager realisiert wird. Der so entstandene konvergente Spalt (Abb. 1) sorgt durch die Relativbewegung unter Einsatz eines Fluides (hier Öl) für eine Erhöhung des Schmierespaltdruckes  $p$  in der Lastzone und zu einem Anheben der Welle bis zu einem Gleichgewichtszustand, bei dem sich die minimale Schmierespalthöhe  $h_{min}$  unter der Belastung  $F_r$  einstellt. Die Belastung des HZGL wird durch die spezifische Lagerlast  $\bar{p}$  ausgedrückt, welche entsprechend Formel (1) definiert ist

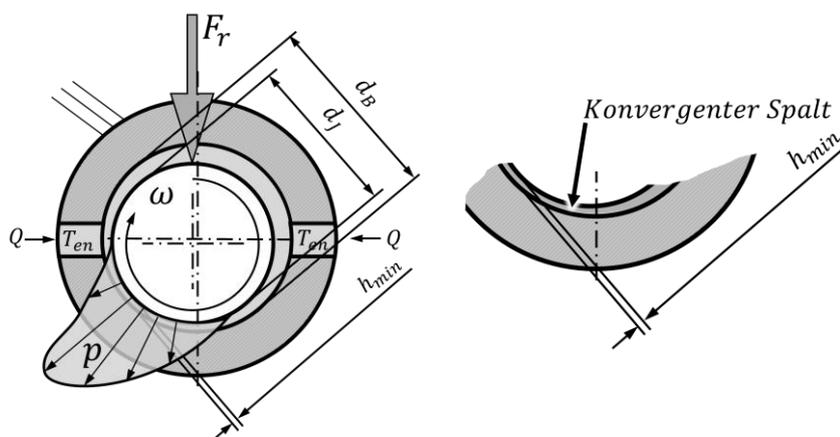


Abb. 1: links: Aufbau und Parameter eines HZGL, rechts: Schmierespaltgeometrie mit konvergentem Spalt



Formfehler einen erheblichen Einfluss auf die minimale Schmierpalhöhe  $h_{min}$  und damit auch auf die Belastbarkeit hat.

Rasheed [Rash, 1998] geht weiter und untersucht Welligkeiten in Umfangs- und in axialer Richtung. Seine Ergebnisse zeigen, dass eine Verbesserung der Tragfähigkeit des Lagers mit zunehmender Umfangswellenanzahl und der Erhöhung der Amplituden bis zu einem gewissen Wert einhergeht. In seinen Untersuchungen kann dieser positive Effekt bis zu einer Wellenanzahl von neun erreicht werden. Zwar wird der Orientierungswinkel  $\varphi$  der Wellen wie in Abb. 3 beschrieben, aber eine detaillierte Betrachtung/Variation des Winkels in der Lastzone (der Bereich der Lauffläche, in dem sich der charakteristische Druckberg ausbildet; vgl. Abb. 1) an einer Einzelwelle wurde nicht realisiert. Zudem wird nicht deutlich, welche konkrete Orientierung  $\varphi$  der Welligkeiten angenommen wurde.

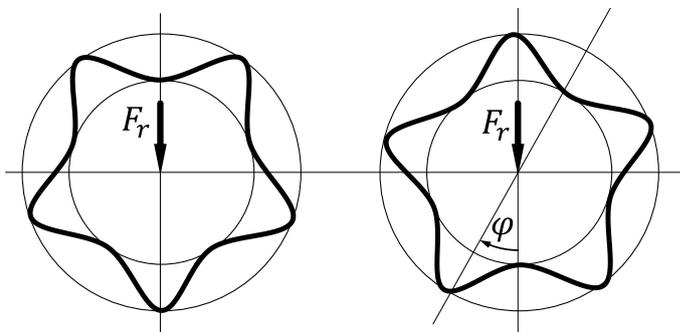


Abb. 3: Orientierung  $\varphi$  einer Formabweichung auf der zylindrischen Lauffläche, die mit gleichmäßigen Wellen am Umfang ausgeprägt ist

Die in der Literatur dargestellten Ergebnisse sind für den Konstrukteur nur mit erhöhtem Interpretationsaufwand anwendbar, da eine Übertragung auf die Geometrische Produktspezifikation (GPS) einen großen Interpretationsspielraum zulässt. Dieser Sachverhalt ist nicht zuletzt auch in den unvollständigen Beschreibungsmöglichkeiten des GPS-Systems begründet. Der Orientierungswinkel  $\varphi$  in Abb. 3 kann beispielsweise nicht mit den Beschreibungsmöglichkeiten des GPS-Systems dargestellt werden. Im weiteren Verlauf dieses Papers werden Formabweichungen am Gleitlager näher betrachtet, da vor allem Rauheiten durch das Einlaufverhalten von Gleitlagern eine untergeordnete Rolle spielen, wie [Mei, 2013] gezeigt hat.

Für Formabweichungen stehen zur Beschreibung zylindrischer Flächen im Wesentlichen die in DIN EN ISO 1101 [1101, 2017] dargestellten Rundheits-, Geradheits- und Parallelitätsabweichungen zur Verfügung. Zudem existieren Empfehlungen für die Tolerierung nach ISO 1101 von Wellen, Bundeln und Spurscheiben für Gleitlager in ISO 12129-2 [12129-2, 2019]. Die dort angegebenen Toleranzempfehlungen beziehen sich auf die minimale Schmierpalhöhe des nominellen Lagers und nicht auf den tatsächlichen Betriebszustand. Entsprechend ist nicht auszuschließen, dass trotz eingehaltener Spezifikation ein Lagerschaden auftritt, da kritische Betriebszustände nur indirekt über die minimale Schmierpalhöhe dargestellt sind.

## 2. HYPOTHESE UND ZIELE

Mit den vorangestellten Betrachtungen der Literatur kann festgestellt werden, dass die direkte praktische Anwendung bestehender Forschungsergebnisse bezüglich der Direktvergabe funktionaler geometrischer Spezifikationen an HZGL nicht unmittelbar möglich ist. Um diese Lücke zu füllen und dem Konstrukteur eine betriebseigenchaftsbezogene Lösung der Formtolerierung für HZGL zur Verfügung zu stellen, soll die im folgenden formulierte Hypothese und deren Teilziele den Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen darstellen:

Formabweichungen an HZGL können in Abweichungen der genannten charakteristischen nominellen BE übersetzt werden.

Dabei werden zunächst nur die kritischen Arten von Formabweichungen betrachtet. Anhand dieser wird eine Methode aufgezeigt, wie beliebige Formabweichungen in die Änderung der BE des HZGL übersetzt werden können. Die Ergebnisse der ausgewählten Formabweichung werden anschließend in einer Toleranzauswahlmatrix (TAM) dargestellt und durch Versuche am Prüfstand validiert.

## 3. METHODEN UND VORGEHENSWEISE

### 3.1 Auswahl der Formabweichung

Um eine generelle Vorgehensweise für die Übersetzung von Formabweichungen in Abweichungen der BE an HZGL zu identifizieren, fiel die Entscheidung zunächst auf das dreiseitige Gleichdick. Damit wird die Rundheitsabweichung zwar nur rudimentär betrachtet, jedoch wird ein sehr häufig auftretender Formfehler in der Gleitlager-Fertigung berücksichtigt. Hintergrund ist die Fertigung von HZGL-Laufflächen mittels Drehen und die damit erforderliche Einspannung im Dreibackenfutter entsprechend der schematischen Darstellung in Abb. 4.

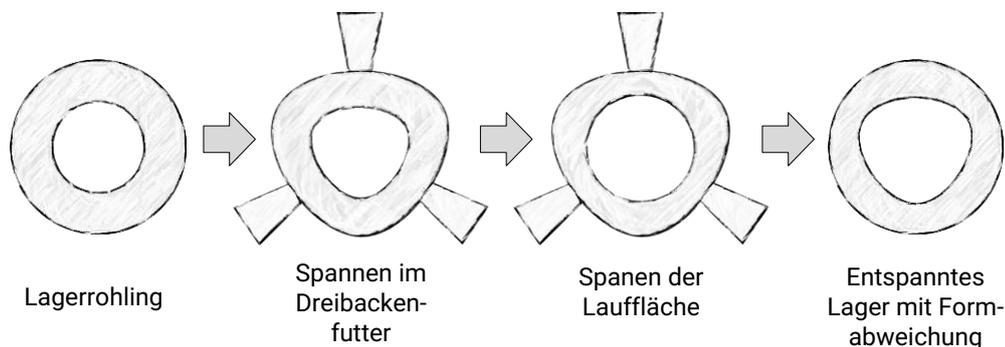


Abb. 4: Schematische Darstellung zur Entstehung der Gleichdickkontur durch den Drehprozess

Für die folgenden Untersuchungen wurde das dreiseitige Gleichdick durch ein H3-Polygon nach DIN 32711-1 [DIN 32711-1, 2009] angenähert und wird mit den Formeln (3) und (4) beschrieben:

$$x(\alpha) = [Rm - e * \cos(3\alpha)] * \cos(\alpha) - 3 * e * \sin(3\alpha) * \sin(\alpha) \quad (3)$$

$$y(\alpha) = [Rm - e * \cos(3\alpha)] * \sin(\alpha) + 3 * e * \sin(3\alpha) * \cos(\alpha) \quad (4)$$

mit  $0 < \alpha \leq 360^\circ$

Ergänzend wurden auch die kegelige Formabweichung (Parallelität der Mantellinien) und die Kombination aus Kegel und Gleichdick untersucht. Ebenfalls wurden beispielhaft wie in [Rash, 1998] mehrseitige Polygone untersucht, um die Vergleichbarkeit zur bestehenden Literatur herstellen zu können.

### 3.2 Methode für das Übersetzen der Formabweichung in Änderungen der Betriebseigenschaften

#### 3.2.1. Hydrodynamische Simulation mit ALP3T

Grundlegend wird der Einfluss der Formabweichungen auf die BE des HZGL durch hydrodynamische Simulation mit Programm ALP3T ermittelt. Dieses löst für ein vorgegebenes Verformungsfeld (Netz) die Reynolds Differentialgleichung in jedem der Netzpunkte. Thermische und elastische Verformungseffekte, die auf das Lager und die Welle selbst wirken, werden dabei nicht berücksichtigt. Die Auflösung des Netzes beträgt 256 Punkte in Umfangs- und 32 Punkte in axialer Richtung. Für die Definition der Formabweichung bzw. des Verformungsfeldes wird jedem der Punkte eine radiale Verschiebung zugeordnet. Wird eine Rundheitsabweichung  $t_1$  von  $4\mu\text{m}$  in Form eines prismatischen Gleichdickes vorgegeben, so reicht der Wertebereich der radialen Verschiebungen (ausgehend vom nominellen Zylinder mit definiertem  $\psi$ ) von  $-2\mu\text{m}$  bis  $+2\mu\text{m}$  entsprechend Abb. 5.

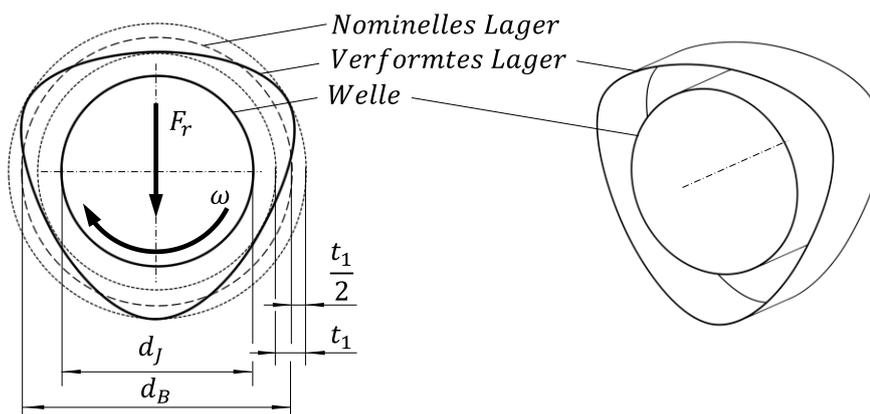


Abb. 5: Darstellung der Rundheitstoleranz  $t_1$  symmetrisch um den Nenndurchmesser  $d_B$

Für jede durchgeführte Simulation werden die Betriebsparameter Schmierfilmsteifigkeit in Lastrichtung ( $c_{22}$ ), maximaler Schmierfilmdruck ( $p_{max}$ ), maximale Schmierfilmtemperatur ( $T_{max}$ ) und die minimale Schmierfilthöhe ( $h_{min}$ ) ausgewertet und mit den BE des nominellen Lagers in das Verhältnis gesetzt, so dass die Änderung der BE prozentual ausgedrückt werden kann.

### 3.2.2. Parametervariation

Da sich die Geometrie der Lagerschale bei Rundheitsabweichungen am Umfang ändert und nicht bekannt ist, in welcher Einbaulage sich das Lager im Einsatz tatsächlich befindet, ist eine Rotation der Rundheitsabweichung relativ zur Lastrichtung von  $F_r$  um den Winkel  $\varphi$  (vgl. Abb. 3) erforderlich. Für das dreiseitige Gleichdick bedeutet das bei dem vordefinierten ALP3T-Modell eine erforderliche Rotation von  $\varphi = 120^\circ$ , da sich die Geometrie drei Mal am Umfang wiederholt. Entsprechend der Netzauflösung ergeben sich 84 Simulationen pro untersuchter Gleichdick-Formabweichung, was einem Inkrement von  $\varphi = 1,4^\circ$  entspricht. Für jede Orientierung wurde die Formabweichung von  $0\mu\text{m} - 19,5\mu\text{m}$  in  $0,5\mu\text{m}$ -Schritten variiert. Dabei wurde immer von einem nominellen relativen Lagerspiel  $\psi$  von 2‰ und einem  $B/d$ -Verhältnis von 0,5 ausgegangen.

Da sich die minimale Schmierfilmhöhe, und damit auch die Schmierspaltgeometrie, nicht nur in Abhängigkeit der Formabweichung ändern, sind zudem weitere Parameter zu variieren. Dazu gehören die Drehzahl  $n$ , die Belastung  $\bar{p}$  und der Lager-/Wellendurchmesser  $d$ . Eine Zusammenfassung der Parametervariation zeigt Tab. 1.

	Rundheitsabweichung ( $i = 1$ ) (dreiseitiges Gleichdick) $n, \bar{p}, t_i, d, \varphi$	Parallelitätsabweichung ( $i = 3$ ) (Kegel) $n, \bar{p}, t_i, d$	Kombination ( $i = 1,3$ )(Gleichdick + Kegel) $n, \bar{p}, t_i, d, \varphi$
$n \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$	2000 – 10000; $\Delta 2000$		2000; 6000; 10000
$\bar{p} [\text{MPa}]$	0,9; 1,8; 2,7		
$t_i [\mu\text{m}]$	0 – 19,5; $\Delta 0,5$		
$d [\text{mm}]$	30, 70, 110		
$\varphi [^\circ]$	0 – 120; $\Delta 1,4$	-	0 – 120; $\Delta 1,4$

Tab. 1: Vollständige Auflistung der Parameterstufung und -variation

Entsprechend Tab. 1 ergeben sich 304.200 Simulationspunkte, die mit einem automatisierten Rechenverfahren gelöst wurden.

### 3.2.3. Ergebnisauswertung und Interpretation

Mit der beschriebenen Änderung der Orientierung der Rundheitsabweichung (Gleichdick) ergibt sich für die minimale Schmierspalthöhe  $h_{min}$  der folgende in Abb. 6 dargestellte dreidimensionale Verlauf. Die Darstellungen in Abb. 6 und Abb. 7 beziehen sich auf ein 30 mm-Lager unter einer Last von  $\bar{p} = 0,9\text{MPa}$  bei einer Drehzahl  $n = 10.000 \frac{1}{\text{min}}$ .

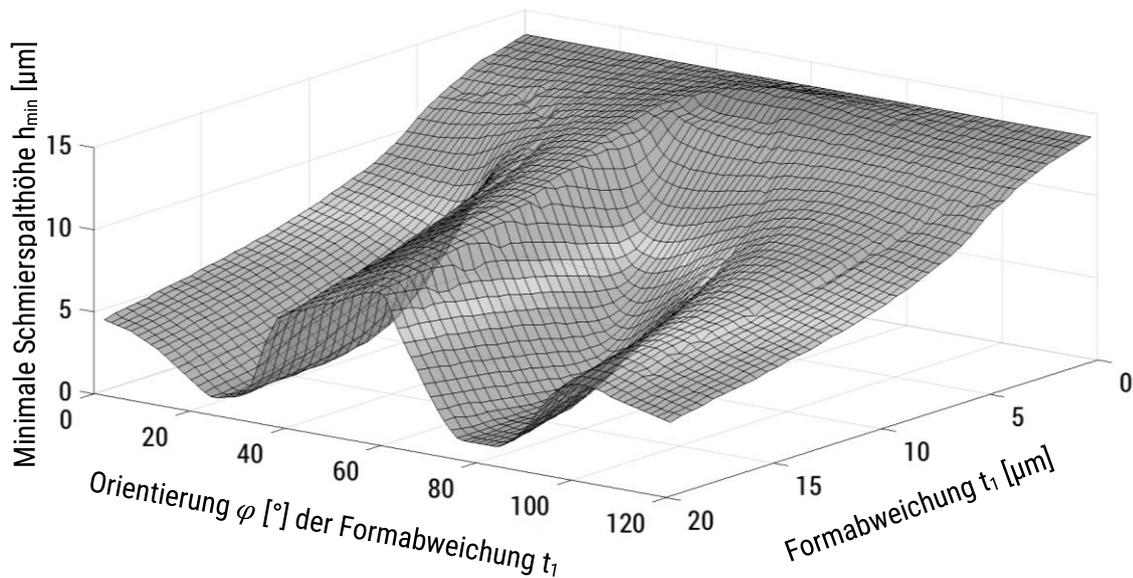


Abb. 6: Durch Simulation ermittelte minimale Schmierspalthöhe  $h_{min}$  in Abhängigkeit der Orientierung  $\varphi$  der Formabweichung  $t_1$

Es ist deutlich erkennbar, dass die Gleichdick-Formabweichung bis zu einem Rundheitswert von etwa  $5 \mu m$  einen geringen Einfluss auf  $h_{min}$  hat und im Verlauf der Orientierung keine wesentlichen Änderungen auftreten. Mit steigendem Betrag von  $t_1$  prägt sich jedoch eine starke Schwankung von  $h_{min}$  im Verlauf der Orientierung aus. Wird  $h_{min} < 5 \mu m$ , so ist von einem Versagen des HZGL auszugehen, da sich  $h_{min}$  dann bereits im Bereich der maximalen Rautiefe befinden kann und eine Berührung von Welle und Lager nicht auszuschließen ist.

Bei der ergänzenden Betrachtung der kegelförmigen Parallelitätsabweichung zeigt sich ein nahezu linearer Abfall der minimalen Schmierspalthöhe, wie Abb. 7 zeigt. Hierzu war eine Rotation der Geometrie nicht erforderlich, da der ideale Kegel am Umfang kreisrund ist.

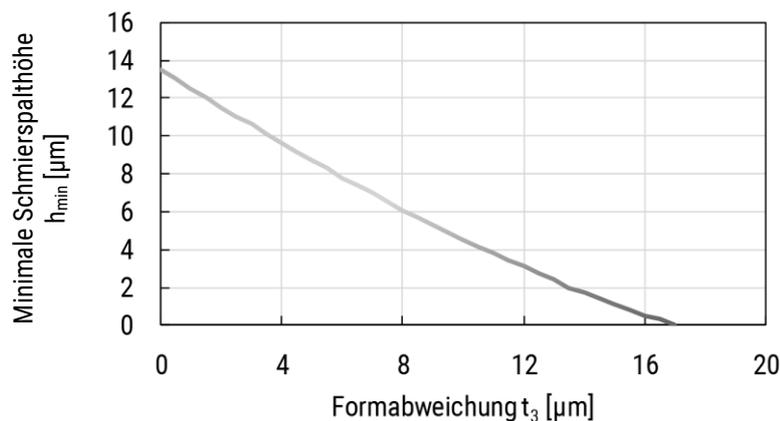


Abb. 7: Minimale Schmierspalthöhe  $h_{min}$  in Abhängigkeit der Formabweichung  $t_3$

Werden  $t_1$  und  $t_3$  kombiniert, muss zunächst eine Betrachtung zur geometrischen Verteilung der beiden Abweichungen durchgeführt werden. Wie Abb. 8 zeigt, soll

zunächst von einer Zylinderformtoleranz  $t_Z$  ausgegangen werden, die als Wertebereich für die Parametervariation vorgesehen ist.

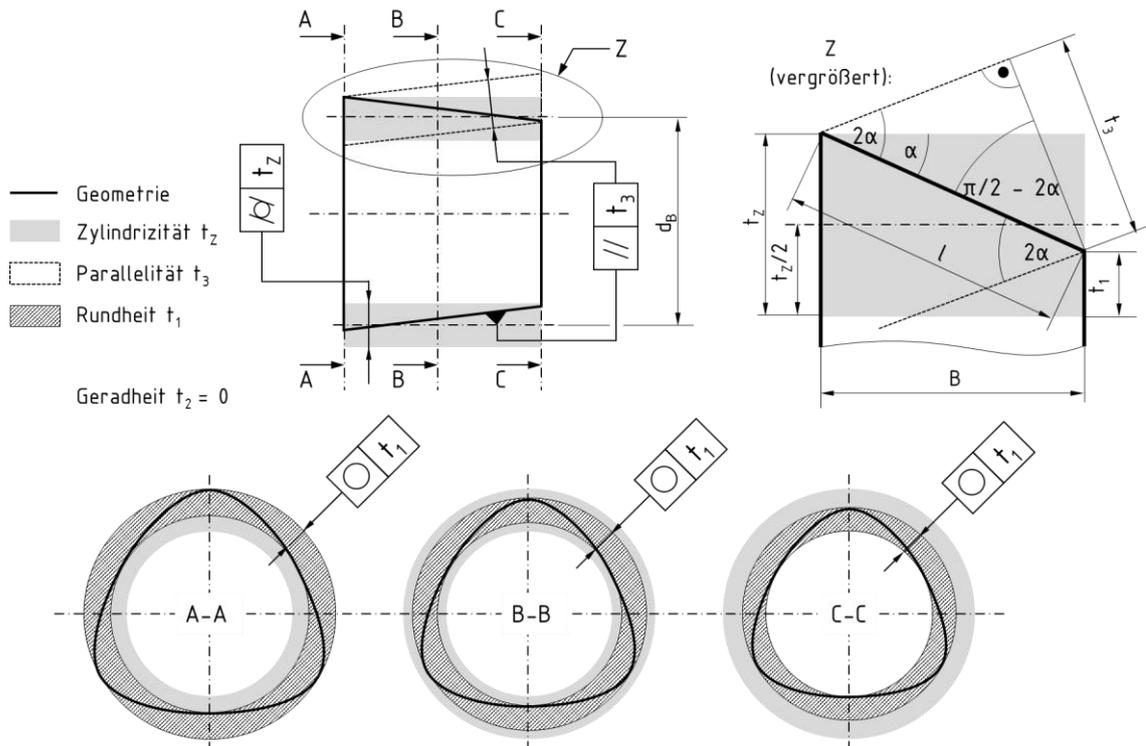


Abb. 8: Geometrische Beschreibung von  $t_1$  und  $t_3$  in der Zylinderformtoleranzzone

Innerhalb dieser Zylinderformtoleranzzone sollen Rundheits- und Parallelitätsabweichung zu gleichen Teilen ( $t_1 = t_3$ ) zugewiesen werden. Der geometrische Zusammenhang aus Abb. 8 bei einer Gleichdick-Kontur zeigt, dass für eine Gleichverteilung je zwei Drittel von  $t_Z$  für  $t_1$  und  $t_3$  erforderlich sind, um  $t_Z$  vollständig auszuschöpfen.

$$t_3 = l * \cos \left[ \frac{\pi}{2} - 2 * \left( \arctan \left( \frac{t_Z - t_1}{B} \right) \right) \right] \quad (5)$$

$$\text{wenn } B \gg t_Z, \text{ dann gilt als gute Näherung } t_3 = -2 * t_1 + 2 * t_Z \quad (6)$$

$$\text{mit } t_1 = t_3 \text{ gilt } t_3 = \frac{2}{3} t_Z \quad (7)$$

Bedingung ist, dass die Geradheitstoleranz  $t_2$  Null ist. Für die charakteristische Kenngröße  $h_{min}$  zeigt das in Abb. 9 dargestellte 3D-Diagramm eine deutlich stärkere Reduktion als das für die Rundheitsabweichung in Abb. 6.

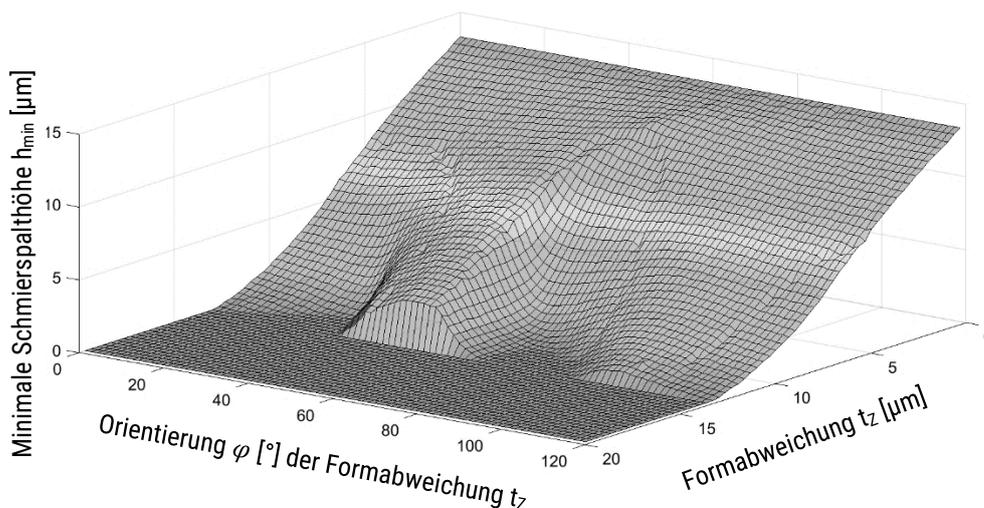


Abb. 9: Durch Simulation ermittelte minimale Schmierpalhöhe  $h_{min}$  in Abhängigkeit der Zylinderformabweichung  $t_z$  und der Orientierung  $\varphi$

Demnach ist der Einfluss der 1:1-Kombination der Formabweichungen  $t_1$  und  $t_3$  deutlich höher, als wenn diese Abweichungen einzeln auftreten.

### 3.3 Ergebnisdarstellung

Um dem Konstrukteur einen einfachen Zugang zu den Ergebnissen zu liefern, wurden diese in einer Toleranzauswahlmatrix (TAM) zusammengefasst. Dabei ist es besonders für die Gleichdick-Formabweichung elementar, den jeweils schlimmsten Fall („worst case“) der Orientierung  $\varphi$  aus dem Kennfeld (vgl. Abb. 6) zu erfassen. Hintergrund ist, dass meist nicht bekannt ist, in welcher Orientierung das Gleitlager montiert wird und es keine Beschreibungsmöglichkeiten nach [1101, 2017] gibt. Abb. 10 zeigt, wie die „worst case“-Kennlinie aus den Kennfeldern ermittelt wird.

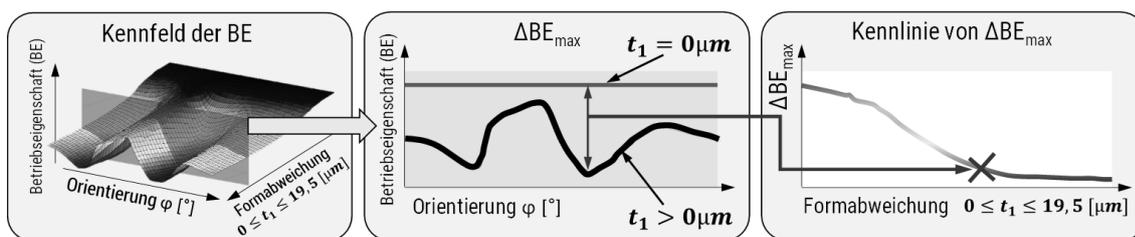


Abb. 10: Ermittlung der „worst case“-Kennlinie für Formabweichungen, die eine sich ändernde Geometrie aufzeigen

Werden die „worst case“-Kennlinien verschiedener Belastungszustände (Variation von  $n$  und  $\bar{p}$ ) übereinander gelegt, kann für die Gleichdick-Formabweichung näherungsweise eine Drehzahl- und Belastungsunabhängigkeit festgestellt werden (Abb. 11), da die Linien sehr dicht zusammen liegen. Somit müssen in der TAM zwei Parameter ( $n, \bar{p}$ ) weniger dargestellt werden.

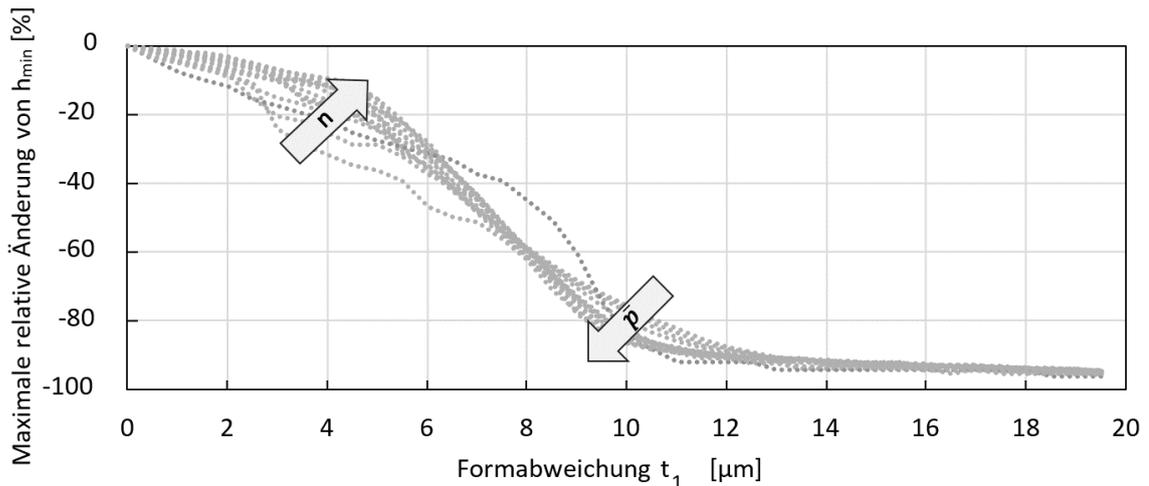


Abb. 11: Überlagerung der „worst case“-Kennlinien für die relative Änderung von  $h_{min}$

Ein Ausschnitt der TAM für den Durchmesser 30 mm mit den Änderungen der charakteristischen Parameter ist in Abb. 12 dargestellt. Deutlich wird, dass eine Erhöhung der Rundheitsabweichung (Gleichdick) immer mit einer Reduktion von  $h_{min}$ , einer Temperaturerhöhung von  $T_{max}$  sowie einer Erhöhung der Steifigkeit  $c_{22}$  und des maximalen Schmierfilmdruckes  $p_{max}$  einhergeht.

Lagerdurchmesser $\varnothing$ in mm	Rundheitsabweichung $t_1$ in $\mu\text{m}$	Änderung der maximalen Lagerschalentemperatur $\Delta T$ in %	Änderung der min. Schmierfilmdicke $\Delta h_0$ in %	Änderung der Steifigkeit in Belastungsrichtung $\Delta c_{22}$ in %	Änderung des maximalen Schmierfilmdruckes $p_{max}$ in %
30	0	-	-	-	-
	0,5	0,4	-18	4,0	5,3
	1	0,7	-3,2	9,3	10,3
	2	1,6	-6,2	20,3	19,5
	4	4,8	-16,5	54,9	36,7
	6	8,3	-33,6	46,6	59,8

Abb. 12: Toleranzauswahlmatrix (Ausschnitt) für die Rundheit  $t_1$

### 3.4 Validierung der Simulation

Die gezeigten Simulationsergebnisse wurden an drei 30 mm-Lagern an einem Gleitlagerprüfstand (GLP30, Abb. 13 links) validiert. Jedes der drei Lager ist mit einer Gleichdick-Formabweichung von 6  $\mu\text{m}$  in den Orientierungen  $\varphi = 50^\circ, 75^\circ$  und  $100^\circ$  durch Koordinatenschleifen gefertigt worden. Das Vermessen der Lager in je drei Profilschnitten ergab im Mittel eine Rundheitsabweichung von ca. 7  $\mu\text{m}$  und eine Winkelabweichung der Orientierung von  $\pm 2^\circ$ . Die eigentliche Validierung erfolgt auf Basis der Lagerschalentemperatur, die durch drei Temperaturfühler einen Millimeter unter der Lauffläche in der Lastzone aufgenommen wird. Gemessen wurde die Temperatur im Beharrungszustand, nachdem das Lager lastfrei auf 4000/min angelaufen ist und anschließend zehn Minuten mit 1,8 MPa belastet wurde. Die Messung wurde nach weiteren zehn Minuten beendet und der Prüfstand abgeschaltet.

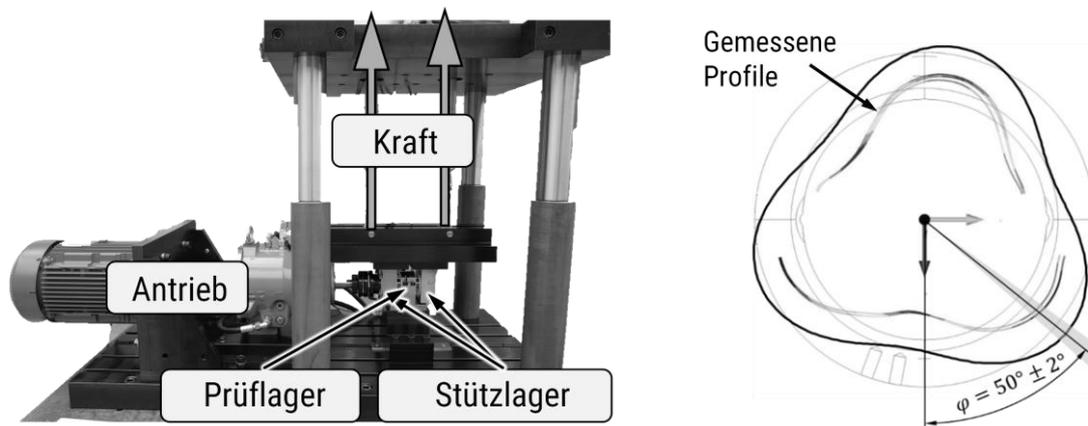


Abb. 13: links: Gleitlagerprüfstand GLP 30, rechts: Am  $\varphi = 50^\circ$ -Lager gemessene Rundheitsprofilschnitte (innen) mit Sollkontur (außen)

Der Temperaturverlauf für die drei genannten Orientierungen zeigt in Abb. 14 deutlich eine Erhöhung der Temperatur mit zunehmender Orientierung. Dieser Trend konnte durch die Simulation bestätigt werden, jedoch stimmten die absoluten Temperaturen nicht sofort überein, da die realen Wärmeübergangskoeffizienten am Prüfstand nicht denen in der Simulation entsprachen. Nach einer Anpassung konnte eine bessere Übereinstimmung festgestellt werden (Abb. 14).

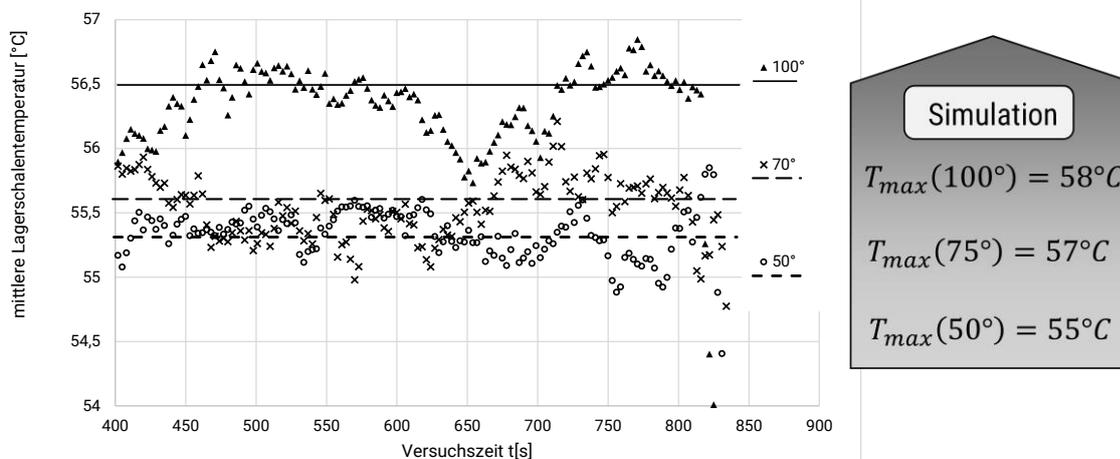


Abb. 14: links: Ermittelte mittlere Lagerschalentemperaturen über die Versuchszeit  $t$  in Abhängigkeit der Orientierung  $\varphi$  der Gleichdick-Formabweichung; rechts: Ermittelte Maximaltemperaturen aus der hydrodynamischen Simulation

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der aufgezeigten Methode und den dargestellten Ergebnissen konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Formabweichung und Funktion am HZGL hergestellt werden. Die ermittelten Toleranzauswahlmatrizen erlauben dem Konstrukteur bei Kenntnis der zulässigen Abweichungen der Betriebsparameter von einem nominellen Wert, die Zuordnung einer Formtoleranz. Weitere Untersuchungen im Bereich der Formabweichungsarten (Ellipse, vierseitiges

Polygon, Sanduhr, Tonne, usw.) zur Erweiterung des Anwendungsgebietes sollen folgen. Vor Allem der Einfluss von Verkantungseffekten der Welle, die aus der Biegung, aus Richtungs- und Positionsabweichungen im Gleitlagersystem resultieren, soll zukünftig Untersuchungsgegenstand sein.

## 5. DANKSAGUNG

Die hier dargestellten Inhalte wurden im Rahmen des Eigenmittelprojektes FVA803-I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA e. V.) erstellt. Wir danken den Fördermittelgebern für das entgegengebrachte Vertrauen und der Finanzierung des Projektes. Besonderer Dank gilt dem projektbegleitenden Ausschuss „Gleitlager“, der das Projekt mit Organisation, Fachkompetenz und Sachmitteln unterstützt hat.

## 6. QUELLEN

- [Goe, 1983] Goenka, P. K.; Booker J. F.: Effect of Surface Ellipticity on Dynamically Loaded Cylindrical Bearings. Journal-Artikel: Journal of Lubrication Technology. ASME, 1983.
- [Iwa, 2005] Iwamoto, K.; Tanaka; K.: Influence of Manufacturing Error of Roundness for Characteristics of Cylindrical Journal Bearing. Journal-Artikel: Life Cycle Tribology. Elsevier, 2005.
- [Mei, 2013] Meier, Illner: Gleitlagerverschleißgrenzen. Abschlussbericht: FVV Heft 992. FVV, 2013.
- [Rash, 1998] Rasheed, H., Effect of surface waviness on the hydrodynamic lubrication of a plain cylindrical sliding element bearing. Journal-Artikel: WEAR 223 (1998) 1-6. Elsevier, 1998.
- [1101, 2017] DIN EN ISO 1101: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf, Berlin: Beuth-Verlag, Berlin, 2017.
- [8015, 2011] DIN EN ISO 8015: 2011: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln. Beuth-Verlag, Berlin, 2011.
- [12129-2, 2019] ISO 12129-2: Gleitlager - Toleranzen - Teil 2: Form- und Lagetoleranzen und Oberflächenrauheit für Wellen, Bunde und Spurscheiben. Beuth-Verlag, Berlin, 2019.
- [31652-1, 2012] DIN 31652-1:1983: Gleitlager – Hydrodynamische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb – Teil 1: Berechnung von Kreiszyylinderlagern. Beuth-Verlag, Berlin, 2012.
- [31652-3, 2017] DIN 31652-3: 2017: Gleitlager – Hydrodynamische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb – Teil 3: Betriebsrichtwerte für die Berechnung von Kreiszyylinderlagern. Beuth-Verlag, Berlin, 2017.



# BESONDERHEITEN DER MAßÄNDERUNGEN VON KUNSTSTOFFBAUTEILEN IM VERGLEICH ZU METALLEN

**Anja Falke<sup>1</sup>, Tim A. Osswald<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Daimler AG, Toleranzmanagement, anja.falke@daimler.com

<sup>2</sup> University of Wisconsin-Madison, Polymer Engineering Center (PEC), tosswald@wisc.edu

---

*Abstract: Hinsichtlich Ihrer maßrelevanten Eigenschaften unterscheiden sich Kunststoffe und Metalle in großem Maße voneinander. So führen nicht nur Maßänderungen durch Schwindungs- und Verzugseffekte während des Fertigungsprozesses, sondern auch wechselnde Umgebungsbedingungen sowie irreversible Nachschwindungsprozesse im Laufe der Zeit zu Maßänderungen von Kunststoffbauteilen. Diese Maßänderungen und deren Einflussfaktoren sowie die besonderen Eigenschaften von Kunststoffen, wie geringere Steifigkeit und die deutlich größere Wärmeausdehnung im Vergleich zu Metallen, sind bei der funktionalen Auslegung und der Festlegung von Toleranzen von Kunststoffbauteilen unbedingt zu berücksichtigen, um schlussendlich spezifikationsgerechte und somit funktionstüchtige Kunststoff-Formteile zu erhalten. Weiterhin ist das oft nicht formstabile Verhalten der Formteile beim Vermessen ganz besonders zu beachten, um sicherzustellen, dass reproduzierbare und vergleichbare Messergebnisse zur Bewertung der Bauteilqualität herangezogen werden können. Durch die Anwendung der Methode zur differenzierten Betrachtung der Bauteilmaße bei der Herstellung und während der Anwendung der Kunststoff-Formteile, lassen sich somit im Projektverlauf Qualitätsprobleme vermeiden und Zeit und Kosten in signifikanten Größenordnungen sparen.*

**KEYWORDS: MAßHALTIGKEIT, KUNSTSTOFF, TOLERANZEN, MAßÄNDERUNGEN, METHODE, SPEZIFIKATIONSGERECHT, ABNAHMEBEDINGUNGEN**

---

## **1. WAS BEDEUTET MAßHALTIG BZW. SPEZIFIKATIONSGERECHT? – MAßHALTIGKEIT UND TOLERANZEN**

Die Geometrie eines Kunststoffbauteils wird anhand der geometrischen Spezifikation, bestehend aus einer technischen Zeichnung und dem 3D-CAD-Datensatz genau beschrieben. In der Praxis ist das Fertigen von absolut genauen Bauteilen unter Einhaltung aller geometrischen Abmessungen und Formen aufgrund von unvermeidbaren Fertigungsabweichungen und Fertigungsungenauigkeiten jedoch nicht möglich. Um dennoch sicherzustellen, dass ein Bauteil trotz geometrischer Abweichungen vom Nennwert alle geforderten Funktionen der Bauteilspezifikation erfüllt, werden Toleranzen (Funktionsgrenzen) festgelegt. Toleranzen definieren die Grenzen der zulässigen Abweichung des Ist-Maßes vom Soll-Maß und spezifizieren somit, wie form- und maßhaltig ein Bauteil sein muss und in welchem Größenbereich Abweichungen von der Nenngeometrie bei der Herstellung akzeptiert werden.

Ein spezifikationsgerechtes Bauteil ist somit ein Bauteil, dessen Ist-Werte innerhalb der vereinbarten zulässigen Abweichung vom festgelegten Nennwert,

also innerhalb der Toleranz, liegen. Der Oberbegriff spezifikationsgerecht schließt sowohl die Maßhaltigkeit eines Bauteils (Maße innerhalb der Toleranz) als auch die Einhaltung der Form- und Ortstoleranzen ein. Auch wenn die folgenden Ausführungen vorwiegend die Maßhaltigkeit, also die Einhaltung der Toleranzen von Größenmaßen, beleuchten, ist gleichermaßen die Einhaltung anderer geometrischer Spezifikationen wie bspw. Form oder Ort eines Geometrieelementes gemeint. Die Überprüfung der Maßhaltigkeit und weiterer Spezifikationen erfolgt mit einer messtechnischen Verifikation mit geeigneten Prüfmitteln [Gröger, 2013; MF, 2013].

Für die Festlegung von Toleranzen gilt der altbekannte ingenieurtechnische Konstruktionsgrundsatz: „So genau wie nötig und so ungenau wie möglich.“ Aus betriebswirtschaftlicher Sicht hat die Festlegung von angemessenen Toleranzen einen entscheidenden Einfluss auf die Herstellungskosten eines Kunststoffbauteils. Eine Balance zwischen sicherer Funktionserfüllung und Kostenaufwand ist anzustreben. Mehraufwände, die keinen funktionellen Vorteil generieren, sind unbedingt zu vermeiden. Je kleiner bzw. enger die geforderten Toleranzen eines Bauteils sind, desto höher ist der Fertigungsaufwand und somit die damit verbundenen Herstellungskosten. Andererseits muss eine sichere Erfüllung aller im Lastenheft vereinbarten Funktionen unter allen definierten Anwendungsbedingungen stets gewährleistet sein und dies durch eine entsprechende Festlegung der maximal zulässigen geometrischen Abweichungen (Toleranzen) sichergestellt werden. Um eine wirtschaftliche Fertigung zu erreichen ist es daher notwendig, die funktional erforderliche Genauigkeit eines Kunststoffbauteils mit den fertigungstechnischen Möglichkeiten abzustimmen [MF, 2013].

## 2. PROBLEMSTELLUNG UND MOTIVATION

Bei technischen Bauteilen, wie sie in Hochlohnregionen wie Mitteleuropa fast ausschließlich gefertigt werden, sind die Anforderungen an die Qualität und Maßhaltigkeit oftmals besonders hoch. Kunststoffe und Metalle unterscheiden sich jedoch insbesondere im Hinblick auf Ihre maßrelevanten Eigenschaften wesentlich voneinander. Aufgrund besonderer Materialeigenschaften von Kunststoffen kommt es zu Maß- und Formveränderungen zwischen der Herstellung und der Anwendung von Kunststoffbauteilen. Diese besonderen Materialeigenschaften müssen bei der funktionalen Auslegung berücksichtigt werden, um spezifikationsgerechte und somit funktionstüchtige Kunststoff-Formteile zu erhalten. In der Praxis werden jedoch häufig die Abnahmebedingungen nach der Fertigung nicht hinreichend von den Anwendungsbedingungen der Kunststoffbauteile während der Nutzung unterschieden, was häufig zu großen Problemen in der Qualitätssicherung und bei der Funktionserfüllung der Bauteile führt. Dies zieht oft vermeidbare zeit- und kostenintensive Korrekturprozesse nach sich.

Durch die Einhaltung einiger grundlegender Regeln bei der Anwendung von Kunststoffen und die Anwendung der Methodik zur systematischen Differenzierung verschiedener Maßbezugsebenen für die Abnahme nach der

Herstellung und Anwendung von Kunststoffbauteilen während der Nutzung ist es für Kunststoffverarbeiter und Auftraggeber möglich, kostengünstig und problemlos funktionstüchtige Kunststoff-Formteile herzustellen. Wird diese Methode konsequent angewendet, lassen sich in Entwicklungsprojekten Zeit und Kosten in signifikanten Größenordnungen sparen.

Neben der konstruktiven Auslegung sind die zeitabhängigen geometrieverändernden Einflussfaktoren unbedingt bei der Vermessung von Kunststoffbauteilen zu beachten, um vergleichbare und belastbare Messergebnisse zur Bewertung der Bauteilqualität und Prozessstabilität zu erhalten. Daher werden zunächst die verschiedenen Ursachen und Einflussfaktoren dieser Geometrieveränderungen von Kunststoffbauteilen sowie deren zeitlicher Verlauf dargestellt, anschließend die Notwendigkeit der differenzierten Betrachtung verschiedener Maßbezugsebenen erläutert und zum Schluss Besonderheiten beim Messen nicht-formstabiler Bauteile abgeleitet.

### **3. FÜR DIE MAßHALTIGKEIT RELEVANTE EIGENSCHAFTEN VON KUNSTSTOFFEN**

Die Maßhaltigkeit und konstruktive Auslegung betreffend besonders relevante Eigenschaften von Kunststoffen sind die Wärmeausdehnung sowie die Steifigkeit (E-Modul). Die Wärmeausdehnung von Kunststoffen ist in etwa 5- bis 20-fach so groß, wie die Wärmeausdehnung von Metallen. Zudem zeichnen sich Kunststoffe durch eine wesentlich geringere Steifigkeit (10- bis 100-fach geringerer E-Modul) und somit größere Verformbarkeit im Vergleich zu Metallwerkstoffen aus [Bonten, 2016; WDJ, 2015]. Aufgrund dieser Verformbarkeit und Flexibilität ergeben sich bei Kunststoffbauteilen oftmals erheblich geringere Genauigkeitsanforderungen zur Erfüllung der Funktion als bei Metallen. Dies soll anhand eines Vergleiches der Befestigung eines Gehäusedeckels verdeutlicht werden. Wird das Fügen des Gehäusedeckels auf ein Gehäuse mit Schrauben betrachtet, ist durchaus vorstellbar, dass dieser Deckel bzgl. der Ebenheit 1-3 mm von der Idealgeometrie abweicht, wenn dieser aus Kunststoff gefertigt wird. Werden nun vier Schrauben zum Zusammenfügen beider Gehäuseteile festgezogen, wird sich die Deckelgeometrie, aufgrund der flexiblen Materialeigenschaften des Kunststoffes, der Geometrie der Fügefläche des Gehäuses anpassen. Ganz anders würde sich dieses Beispiel bei Metallgehäuseteilen verhalten, da deren Steifigkeit um das 100-fache höher ist. Dementsprechend müssten für die Metallkonstruktion viel kleinere Funktionstoleranzen festgelegt werden, um die Fügefähigkeit zu gewährleisten. Die funktionalen Genauigkeitsanforderungen an die Kunststoffbauteile sind somit wesentlich geringer als die an Metallteile, was die wirtschaftliche Produktion von maßhaltigen Kunststoffbauteilen ermöglicht [MF, 2013].

Metalle sind, im klassischen Temperatureinsatzbereich der Kunststoffe bis ca. 100°C, in ihren Eigenschaften annähernd konstant und unabhängig von der Temperatur. Im Gegensatz dazu sind die meisten Materialkennwerte von Kunststoffen stark temperaturabhängig und können nicht als konstant angesehen werden. Daher ist es zwingend erforderlich, die Einsatztemperaturen und weitere

Umgebungseinflüsse bei der Auswahl eines Konstruktionswerkstoffes aus Kunststoff zu berücksichtigen. Die Verwendung von Tabellenkennwerten, die bei konstanter Raum- bzw. Prüftemperatur ermittelt wurden, reicht hierfür meist nicht aus [WDJ, 2015].

#### 4. WELCHE FAKTOREN BEEINFLUSSEN DIE MAßHALTIGKEIT VON KUNSTSTOFF-FORMTEILEN?

Bei der konstruktiven Auslegung eines Bauteils werden die Toleranzgrenzen vom Bauteilentwickler entsprechend der Funktionsgrenzen des Kunststoff-Formteils unter Berücksichtigung der zuvor erwähnten Besonderheiten, festgelegt [8015, 2011]. In Abbildung 1 sind die verschiedenen Faktoren dargestellt, die Einfluss auf die Maßhaltigkeit von Kunststoffbauteilen haben und somit die Funktionsgrenzen beeinflussen.

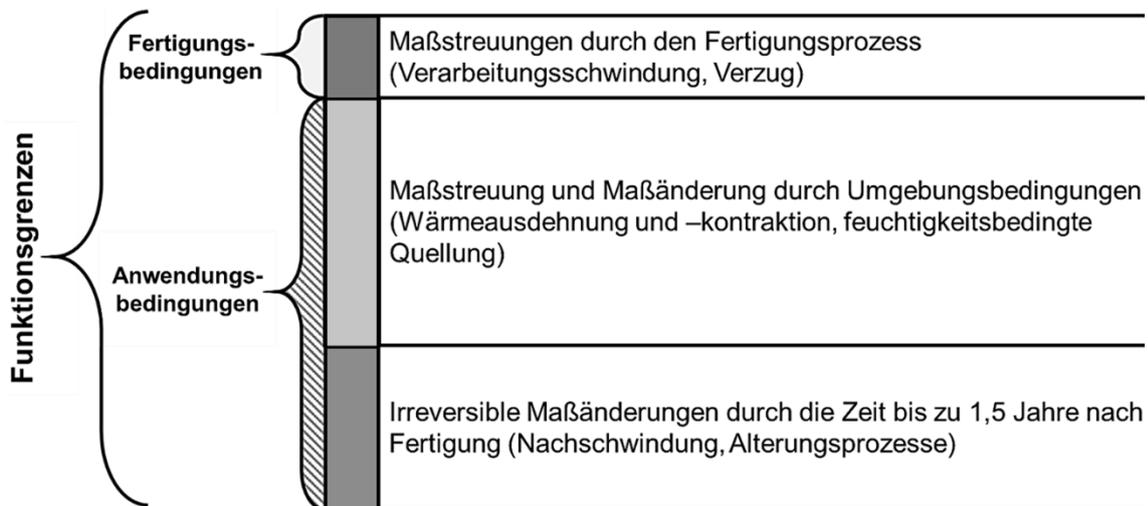


Abb. 1: Einfluss verschiedener Maßstreuungen und Maßänderungen auf die Funktionsgrenzen

Bei der Festlegung der Toleranzen zur sicheren Funktionserfüllung müssen zunächst fertigungsbedingte Maßstreuungen der Bauteile berücksichtigt werden, die beispielsweise auf Schwankungen im Fertigungsprozess zurückzuführen sind, wie Schwankungen der Schwindung oder Bauteilverzug. Zusätzlich müssen zur Festlegung der Funktionsgrenzen unbedingt die Anwendungsbedingungen der Bauteile betrachtet werden, um die erheblichen Maß- und Formänderungen von Kunststoffteilen durch Umgebungsbedingungen bei der Toleranzfestlegung zu berücksichtigen. Hierzu zählen unter anderem die Wärmeausdehnung oder feuchtigkeitsbedingte Quellung. Darüber hinaus müssen zur Funktionssicherung der Bauteile während der Anwendung die Geometrieänderungen der Kunststoffteile, die über einen längeren Zeitraum hinweg durch Nachschwindung und Alterungsprozesse ablaufen, Berücksichtigung finden. In der Abbildung 1 sind die Anteile der jeweiligen Faktoren entsprechend ihrer Einflussgröße auf die Geometrieänderungen skaliert.

#### **4.1 Maßstreuungen durch den Fertigungsprozess (Schwindung und Verzug)**

Unter Schwindung versteht man die Verkleinerung des Volumens eines Kunststoff-Formteils [DEEH, 2012]. Grundsätzlich muss zwischen zwei verschiedenen Schwindungsarten unterschieden werden, aus denen sich die Gesamtschwindung eines Bauteils zusammensetzt: Verarbeitungsschwindung und Nachschwindung. Die Ursache für die Volumenschwindung von Kunststoffformteilen während der Herstellung ist das ausgeprägte temperatur- und druckabhängige Ausdehnungs- und Kontraktionsverhalten der Kunststoffe. Infolge der Volumenschwindung bei der Abkühlung der Kunststoffschmelze im Spritzgießprozess sind die Maße des Kunststoff-Formteils nach der Abkühlung kleiner als die Maße des umgebenden Formwerkzeuges [MF, 2013]. Laut DIN 16742 ist die Volumenschwindung, die während der Fertigung entsteht, die Verarbeitungsschwindung, definiert als die „relative Differenz zwischen Werkzeugkonturmaß und den entsprechenden Formteilmaßen 16 h bis 24 h nach der Fertigung“ [16742, 2013].

Bei der Herstellung von Kunststoffbauteilen kommt es außerdem zu Bauteilverzug, welcher sich in Form von Verwindungen und Wölbungen und daraus resultierenden Form-, Lage- und Winkelabweichungen der Kunststoffformteile äußern kann und somit zu Qualitäts- und Maßhaltigkeitsproblemen führen kann. Verzug entsteht durch anisotropes, also orts- und richtungsabhängig unterschiedlich starkes Schwindungsverhalten des Kunststoff-Formteils während des Abkühlvorganges. Die physikalischen Hauptursachen für Schwindungsanisotropie sind Schwindungsbehinderungen infolge unterschiedlicher thermischer Kontraktion durch ungleichmäßige Wärmeabfuhr und Orientierungen, insbesondere von faserförmigen Füll- und Verstärkungsstoffen oder Molekülen [BBORS, 2013]. Darüber hinaus können aus Schwankungen der Prozessparameter oder Materialqualität während der Fertigung Schwindungsschwankungen entstehen aus denen unterschiedlich ausgeprägter Bauteilverzug und somit Maßstreuungen der Kunststoff-Formteile resultieren. Generell sollte beachtet werden, dass sich ungleichmäßige Schwindung und somit Formteil-Verzug zwar minimieren, aber niemals ganz vermeiden lässt.

#### **4.2 Maß- und Formänderungen durch Umgebungsbedingungen während der Anwendung**

Die Geometrie von Kunststoffbauteilen verändert sich während der Anwendung aufgrund von wechselnden Umgebungsbedingungen erheblich. Zu den Ursachen von anwendungsbedingten Maß- und Formveränderungen zählen vor allem Temperaturschwankungen aber auch weitere allgemeine Klimaeinwirkungen auf die Kunststoffbauteile wie Luftfeuchtigkeit, Niederschläge, Sonneneinstrahlung oder sonstige Medieneinwirkungen. Explizite Verursachungsfaktoren von anwendungsbedingten Geometrieänderungen sind:

- Wärmedehnung oder -kontraktion durch Temperaturänderung,
- Quellung durch Diffusions- und Migrationsprozesse, bspw. durch Medienaufnahme und insbesondere Wasseraufnahme (Umgebungsfeuchtigkeit),
- Nachschwindung durch molekulare und mikromorphologische Strukturänderungsprozesse, wie bspw. Nachkristallisation,
- Mechanische Deformation durch äußere Kräfte, bspw. durch Montage oder Fügeprozesse,
- Verschleiß von Innen- oder Außenmaßen durch Werkstoffabtrag (Abrasion), abhängig von Art, Größe und Dauer der Verschleißbeanspruchung (Reibung, Erosion, biologische Einwirkung) [16742, 2013].

Daraus ergibt sich die erste Regel für die Anwendung von Kunststoffen.

*Regel 1: Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften von Kunststoffen wie höhere Wärmeausdehnung, Quellung durch Feuchtigkeitsaufnahme und geringere Formstabilität, die zu Geometrieänderungen während und nach der Fertigung sowie während der Anwendung unter Umgebungsbedingungen und Umwelteinflüssen führen!*

Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 2 jeweils die Längenänderungen eines 100 mm langen Bauteils aus Kunststoff (PP) bzw. Stahl dargestellt. Die Abbildung veranschaulicht die unterschiedliche Längenausdehnung der beiden Werkstoffe bei typischen, in der Automobilindustrie verwendeten Temperaturdifferenzen zwischen  $-30^{\circ}\text{C}$  und  $+80^{\circ}\text{C}$ , die für Kunststoff bei etwa 1,8 mm und für ein Stahlbauteil bei nur ca. 0,2 mm in diesem Temperaturbereich liegt.

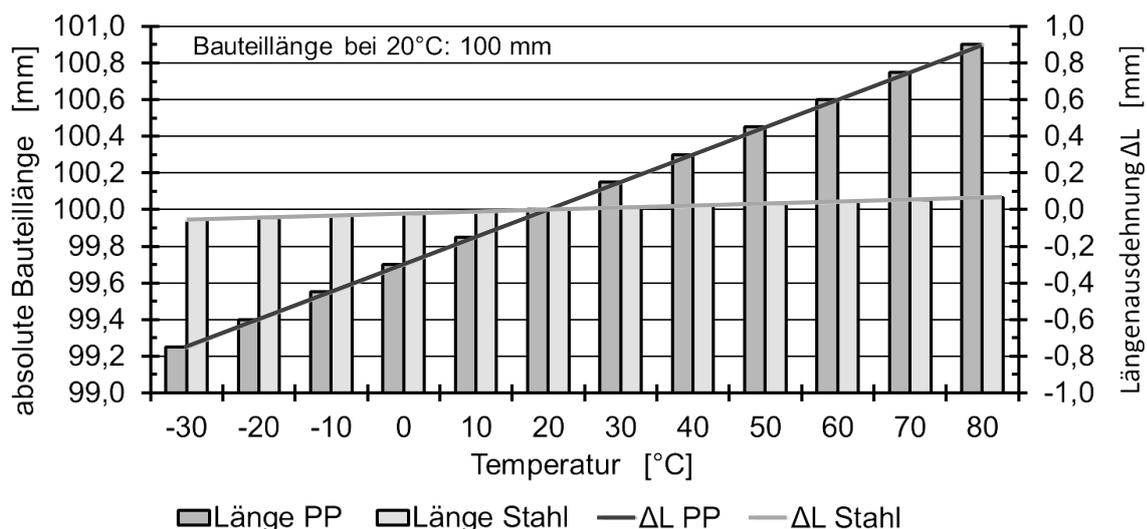


Abb. 2: Änderung der Bauteillänge und Längenausdehnung bei Temperaturdifferenzen

Die Maßänderungen durch Umgebungseinflüsse sind teilweise reversibel und sorgen somit für eine große Maßstreuung. Eine Maßvergrößerung, die aus der Wärmeausdehnung aufgrund einer Temperaturerhöhung resultiert, kontrahiert

beispielsweise bei Abkühlung auf Anfangstemperatur wieder nahezu auf das Ursprungsmaß.

### 4.3 Maß- und Formänderungen im Laufe der Zeit

Für maßliche Veränderungen von Kunststoffbauteilen, die über einen längeren Zeitraum ablaufen, sind meist Nachschwindungs- oder Alterungsprozesse des Materials verantwortlich. Nachschwindung resultiert aus nachträglichen Veränderungen der molekularen und mikromorphologischen Struktur. Dies können Nachkristallisationsprozesse, Nachhärtung, die Rückstellung von Molekülorientierungen oder die Rückverformung elastischer Eigenspannungen sein [16742, 2013]. Nachschwindungsprozesse können sofort im Anschluss an die Verarbeitungsschwindung (nach 24 h) oder mit großer zeitlicher Verzögerung auftreten und wochen- bis monatelang nach der Fertigung des Formteils andauern, abhängig von der Umgebungstemperatur und anderen Umwelteinflüssen, denen die Bauteile ausgesetzt werden. Die die Maßhaltigkeit beeinflussenden Nachschwindungsprozesse bei Außenbewitterung bei mitteleuropäischem Klima sind nach etwa 1 bis 1,5 Jahren abgeschlossen. Nachschwindung und hierbei insbesondere die Nachkristallisation von Kunststoffteilen kann durch eine Teilennachbehandlung durch Warmlagerung (Tempern) vorweggenommen werden, da die Umstrukturierungsprozesse der Molekülketten im Kunststoff bei erhöhten Temperaturen schneller ablaufen, wodurch die Maß- und Formveränderungen beschleunigt werden [DEEH, 2012; 16742, 2013]. Die Verarbeitungsschwindung von PP (Polypropylen) bezogen auf das Volumen liegt in der Praxis bei etwa 1,7% und die Nachschwindung bei ca. 1%, bei amorphen Kunststoffen wie PC (Polycarbonat) sind die Schwindungswerte geringer (Verarbeitungsschwindung 0,7%; Nachschwindung (0,2%).

*Regel 2: Zeitabhängigkeit der Geometrieänderungen berücksichtigen (Nachschwindung) → Bauteilmaße verändern sich mit der Zeit!*

Zusammenfassend sollte berücksichtigt werden, dass bei Kunststoffen mit deutlich größeren Maßstreuungen bei der Fertigung und bei der Anwendung gerechnet werden muss, als dies bei Metallwerkstoffen der Fall ist. Die größeren Maßstreuungen während der Fertigung resultieren aus Verarbeitungsschwindung, Verzugseffekten und Prozessschwankungen. Die Maßstreuungen bei der Anwendung von Kunststoffbauteilen gehen auf Nachschwindung, Wärmeausdehnung und andere bereits erläuterte Effekte zurück [MF, 2013].

## 5. DIFFERENZIERTE BETRACHTUNG DER MAßBEZUGSEBENEN FÜR ANWENDUNG UND FERTIGUNG DER KUNSTSTOFF-FORMTEILE ALS METHODE

Um spezifikationsgerechte Kunststoffbauteile zu erhalten, müssen die werkstofflichen Besonderheiten und temperatur- und vor allem zeitabhängigen Eigenschaften von Kunststoffen berücksichtigt werden. In der Praxis kann diesen Besonderheiten durch die folgende Systematik Rechnung getragen werden. Eine elementare Methode zur Berücksichtigung der Maßveränderungen über der Zeit

und durch Umgebungseinflüsse ist die Differenzierung der Maßbezugsebenen für die Fertigung und die Anwendung von Kunststoffformteilen und die klare Trennung zwischen Abnahmemäßen nach der Fertigung und Anwendungsmäßen unter Einsatzbedingungen der Bauteile.

Die Voraussetzung für die Bewertung der Maßhaltigkeit und Qualität von Kunststoffbauteilen ist eine zu jeder Zeit definierte Zuordnung in welchem Zustand sich ein Bauteil gerade befindet und welche Maße bewertet werden. Die bewusste Bewertung, welcher Anteil der Geometrieänderung zwischen Fertigung und der Anwendung bereits abgelaufen ist und welcher Anteil der Maß- und Formänderung noch erwartet werden muss ist unerlässlich. Erfolgt eine Vermessung der Bauteile, muss dies klar definiert sein, um reproduzierbare und vergleichbare Messergebnisse zur Bewertung der Bauteilqualität oder Festlegung von Abhilfemaßnahmen oder gar Werkzeugänderungen aufgrund von Qualitätsproblemen zu erhalten. Aus diesem Grund müssen verschiedene Maßbezugsebenen für die Anwendung und Fertigung der Formteile, zur Kennzeichnung der Lage der Maße (Toleranzmittenmaß  $C$ ), der Maßverschiebung  $\Delta L$  und der Streuung (Toleranz  $T$ ) verwendet werden [16742, 2013]. Die drei unterschiedlichen Maßbezugsebenen für Maßänderungen an Kunststoff-Formteilen, sowie die bereits erklärten Ursachen der verarbeitungsbedingten Maßverschiebung  $\Delta L_V$  und der anwendungsbedingten Maßverschiebung  $\Delta L_A$  sind in Abbildung 3 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Maßbezugsebenen nicht im Sinne einer geometrischen Ebene zu betrachten sind, sondern den Zustand bzw. die entsprechende Zustandsebene des jeweils betrachteten Bauteils kennzeichnen.

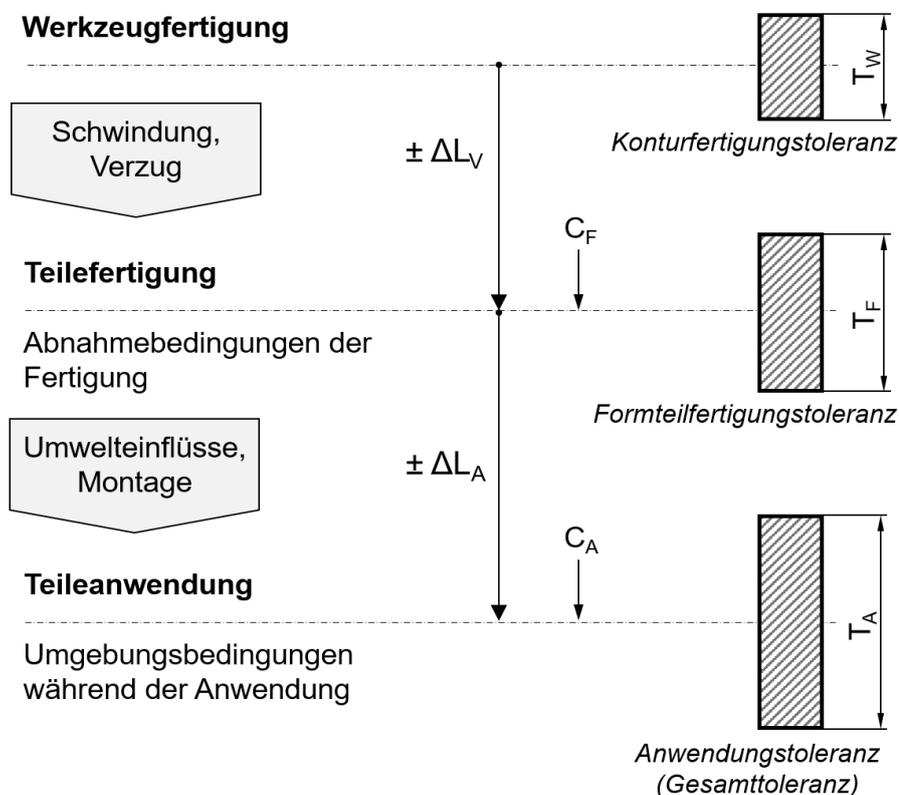


Abb. 3: Maßbezugsebenen für Anwendung und Fertigung von Kunststoffteilen [16742, 2013]

Ergänzung zur Abb. 3:

- Werkzeugfertigung (W): Maße mit Werkzeugkonturfertigungstoleranz
- Teilefertigung (F): Maße mit Formteil-Fertigungstoleranz unter Berücksichtigung von Schwindung und Verzug; Festlegung der Abnahmebedingungen der Fertigung
- Teileanwendung (A): Funktionsmaße mit Formteil-Anwendungstoleranz (Gesamttoleranz) für die Anwendung im montierten Zustand und unter Einsatz- und Umweltbedingungen

Aufgrund der anwendungsbedingten Geometrieänderungen müssen klare Bedingungen und Abnahmeparameter definiert werden, unter denen die Kunststoffteile nach der Fertigung bewertet und vom Auftraggeber abgenommen werden. Abnahmem Maße sind die unter vereinbarten Abnahmebedingungen geprüften Maße, für deren Maßhaltigkeit der Kunststoffverarbeiter verantwortlich ist. Die Abnahmebedingungen der Fertigung beziehen sich sowohl auf die Form und Maßabweichungen als auch auf den zeitlichen Rahmen der Maßprüfung sowie die verwendeten Prüfverfahren und Lagerungs- und Umgebungsbedingungen der Formteile bis zum Vermessen und bis zur Teileabnahme durch den Abnehmer. In der Norm DIN 16742 sind allgemeine Abnahmebedingungen definiert, nach denen die Prüfmaße als Abnahmewerte gelten, wenn die Formteile nach der Fertigung bis zur Abnahme bei einer Raumlufttemperatur von  $23^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ K}$  und  $50\% \pm 10\%$  relativer Luftfeuchte gelagert werden. Die Prüfung der Formteile darf frühestens 16 und muss spätestens 72 Stunden nach der Herstellung erfolgen [16742, 2013; 20457, 2018].

Anwendungsmaße sind die sich unter Anwendungsbedingung einstellenden Maße, die der Bauteilentwickler zu berücksichtigen hat und die sich aus dem Lastenheft ergeben. Zu den Anwendungsbedingungen von Kunststoffteilen zählen alle Umwelt-, Nutzungs- und auch Lagerungsbedingungen während des Anwendungszeitraumes nach der Fertigung, die sich auf die Geometrie, Maßhaltigkeit und Funktionserfüllung der Bauteile auswirken [16742, 2013]. Um sicherzustellen, dass ein Kunststoffteil unter allen im Lastenheft definierten Einsatzbedingungen zu jedem Zeitpunkt seine Funktion sicher erfüllt, müssen für den Maßhaltigkeitsnachweis die Extremwerte der zeitlich veränderlichen Maßänderungseffekte analysiert werden, um hieraus die maximale Spannweite der Geometrieänderungen als Funktionsgrenzen zu ermitteln.

## 6. MESSEN

### 6.1 Definierter Zustand des Bauteils

Die Voraussetzung für die Bewertung der Maßhaltigkeit und Qualität von Kunststoffbauteilen ist eine definierte Zuordnung, in welchem Zustand sich ein Kunststoffbauteil gerade befindet und welche Maße bewertet werden. Daher muss besonders beim Messen der Bauteile klar sein, auf Basis welcher Maßbezugsebene das Kunststoffbauteil bewertet wird. Ohne diese Zuordnung ist weder eine Bewertung, noch die Vergleichbarkeit der Messungen sichergestellt.

Die Zuordnung welcher Anteil der Geometrieänderung zwischen Fertigung und Anwendung bereits abgelaufen ist und welcher Anteil der Maßverschiebung noch zu erwarten ist, wird allgemein oft unter der „Zeit-Temperatur-Historie“ eines Kunststoffbauteils zusammengefasst. Präziser ausgedrückt ist für die Bewertung von Bauteilen entscheidend, wie lange das Kunststoffteil, welchen Temperaturen und sonstigen Umgebungseinflüssen ausgesetzt war. Hat das Bauteil bspw. bereits 3 h im Sommer bei 50°C auf der Ladefläche eines LKW gelegen und somit einen erheblichen Anteil der Nachschwindung bereits durchlaufen oder ist das Bauteil erst vor wenigen Stunden hergestellt worden? Diese Bauteile befinden sich in verschiedenen, nicht vergleichbaren Zuständen, da aufgrund der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen der Bauteile bereits verschiedene Anteile der Maßänderungen abgelaufen sind. Eine Vergleichbarkeit von Kunststoffbauteilen ist nur bei gleichen Lagerbedingungen (Zeit, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Bauteillage) gegeben.

Ein Bauteil kann folglich nur dann sinnvoll vermessen und bewertet werden, wenn diese Historie der Umgebungsbedingungen bekannt ist und somit eine klare Zuordnung zu den Maßbezugsebenen möglich ist. Der Zeitpunkt der Vermessung in Bezug auf den Zeitpunkt der Herstellung der Kunststoffbauteile ist somit für den weiteren Projektdurchlauf von größter Bedeutung.

*Regel 3: Definierter Zustand der Bauteile beim Vermessen: Messzeitpunkt, Zeit-Temperatur-Historie und Lagerbedingungen der Bauteile müssen bekannt sein (Maßbezugsebene beachten)!*

## 6.2 Besonderheiten beim Messen nicht-formstabiler Bauteile

Heutzutage ist es nicht mehr notwendig, Zeichnungen vollständig zu bemaßen, das Gegenteil ist der Fall. In einer Zeichnung sollten nur Funktionsmaße eingetragen und diese mit einer Toleranz versehen werden. Das heißt, es sollten nur direkt tolerierte Prüfmaße und Form- und Lageabweichungen eingetragen werden, die zur Sicherung der Bauteilfunktion notwendig sind. Diese Maße entsprechen im weiteren Projektdurchlauf auch den Maßen, die von der Qualitätsprüfung oder Fertigung explizit geprüft werden, da diese für die Funktion des Bauteils essentiell sind. Hierbei sind selbstverständlich auch die zu messenden Allgemeintoleranzen explizit zu spezifizieren, um die Anzahl der zu prüfenden Maße auf die für die Funktion notwendigen Maße zu reduzieren und somit Kosten und Kapazitäten zu sparen und dennoch die Bauteilfunktion ohne Einschränkung zu sichern [MF, 2013].

Unabhängig vom verwendeten Messverfahren, sind nicht-formstabile Bauteile bei der Vermessung unbedingt über ein festgelegtes Bezugssystem auszurichten und nicht in freiem Zustand zu prüfen. Entsprechend der DIN EN ISO 10579 bedeutet freier Zustand ein richtungsunabhängiger Zustand, in dem das Teil nur der eigenen Schwerkraft unterliegt. Ein nicht-formstabiles Teil ist definiert als ein Teil, das sich im freien Zustand mehr als die in der Zeichnung festgelegte zulässige Toleranz verformt [10579, 2013]. Folglich muss ein Großteil der Kunststoffbauteile aufgrund ihrer geringen Steifigkeit und Formstabilität und der

großen Flexibilität als nicht-formstabil betrachtet werden. Die Geometrie dieser Bauteile ist somit abhängig von ihrer Lage im Raum und deren Abstützung, weshalb eine definierte richtungsabhängige Ausrichtung und Abstützung an definierten Bezugsstellen (Zwangslage) für eine reproduzierbare Vermessung unabdingbar ist. Dies wird meist durch die Aufnahme der nicht-formstabilen Bauteile auf einer bauteilspezifischen Messvorrichtung erreicht, in der das Teil entsprechend seiner Lage unter Anwendungsbedingungen (Einbaulage) eingespannt wird. Messverfahren, Ausrichtung und Aufnahme der Bauteile beim Vermessen sind zwischen Bauteilprüfer und -abnehmer vorab zu vereinbaren.

## 7. ERGEBNISSE

Ein klar definierter Projektablauf und entsprechend zugeordnete Verantwortlichkeiten sind die Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Projekt, an dessen Ende qualitativ einwandfreie, spezifikationsgerechte Formteile stehen, welche dann auch verifizierbar sind [MF, 2013]. In Abbildung 4 ist ein solcher Projektdurchlauf übersichtlich dargestellt.



Abb. 4: Projektverlauf mit entsprechenden Zuständigkeiten

Hierzu werden zunächst die funktionalen Anforderungen sowie die Grenzen der Einsatz- und Umgebungsbedingungen der Kunststoffbauteile zwischen dem Abnehmer und dem Bauteilentwickler abgestimmt und im Lastenheft festgehalten. Auf Basis dieser Anforderungen erfolgt die Entwicklung einer kunststoffgerechten (material-, verfahrens- und werkzeuggerecht) Formteilkonstruktion, die die Geometrie des Kunststoff-Formteils beschreibt. Durch eine anschließende Funktionsanalyse ermittelt der Bauteilentwickler,

welche Flächen oder Elemente dieses Formteils welche Funktionen erfüllen müssen. Hieraus werden im Anschluss die notwendigen Anwendungstoleranzen zur sicheren Funktionserfüllung unter Berücksichtigung der Einsatz- und Umgebungsbedingungen abgeleitet. Unter Berücksichtigung der maßverändernden Einflussfaktoren, wie bspw. Wärmedehnung oder feuchtigkeitsbedingte Quellung sowie Nachschwindung werden die zu erwartenden Maßverschiebungen bestimmt und hieraus die, für die Bauteilabnahme relevanten, Fertigungstoleranzen abgeleitet. Der Bauteilentwickler stimmt daraufhin mit dem Abnehmer der Bauteile die Abnahmebedingungen der Fertigung ab und definiert zu welchem Zeitpunkt und unter welchen Bedingungen mit welchem Messverfahren welche Abnahmemasse geprüft werden. Hier können auch Anforderungen an Messaufnahmen und die Ausrichtung der Bauteile definiert werden. Nach der Fertigung der Kunststoff-Formteile, bei der sich aufgrund von Schwindung und Verzug eine Maßverschiebung zwischen Werkzeugkontur und Formteilmaßen ergibt, erfolgt die Lagerung der Teile unter normativen Bedingungen. Sofern nicht anders abgestimmt, erfolgt die Prüfung der Maßhaltigkeit der Abnahmemasse der Formteile 16 bis 72 Stunden nach der Fertigung unter den abgestimmten Abnahmebedingungen der Fertigung. Hat der Bauteilhersteller die Maßhaltigkeit der Formteile nachgewiesen, erfolgt die Abnahme durch den Auftraggeber. Nachfolgend ergeben sich weitere anwendungsbedingte Maßverschiebungen durch Nachschwindung, Wärmeausdehnung, Quellung etc. während der Nutzung des Bauteils. Liegen die Anwendungsmaße innerhalb der Anwendungstoleranzen (Funktionsgrenzen) ist eine sichere Funktionserfüllung des Kunststoffbauteils gewährleistet. Wird diese Methode systematisch angewendet und die aufgeführten Regeln zur Anwendung von Kunststoffen beachtet, lassen sich Zeit und Kosten in signifikanten Größenordnungen sparen. Weiterhin wird der Projektdurchlauf deutlich geordneter.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG

Um spezifikationsgerechte Kunststoffbauteile zu erhalten müssen zunächst die besonderen Eigenschaften von Kunststoffen wie die im Vergleich zu Metallen viel größere Wärmeausdehnung und Flexibilität bei der konstruktiven Auslegung und den damit verbundenen Fertigungs- und Anwendungstoleranzen berücksichtigt werden. Aus diesen Eigenschaften resultieren Volumenschwindung und Bauteilverzug während der Fertigung sowie anwendungsbedingte Maßverschiebungen durch Umwelteinflüsse. Nachschwindung und Nachkristallisation führen zu zeitabhängigen Geometrieänderungen, die abhängig von den Umgebungsbedingungen und besonders der Umgebungstemperatur über mehrere Monate ablaufen können. Aus diesem Grund ist eine definierte Zuordnung des Bauteils zu einer Maßbezugsebene essenziell für die qualitative Bewertung eines Kunststoffteils. Da während des Einsatzes bspw. aufgrund von Wärmedehnung und Nachschwindung Maßänderungen auftreten, muss entsprechend der Maßbezugsebenen stets zwischen Abnahmemassen nach der Fertigung und Anwendungsmaßen während der Nutzung des Bauteils unterschieden werden. Diese zeitabhängigen Maßverschiebungen sind auch beim vermessen von Kunststoffbauteilen zu

berücksichtigen. Eine sinnvolle Vermessung kann nur an Bauteilen mit einem definierten Zustand, deren Zeit-Temperatur-Historie sowie Lager- und Umgebungsbedingungen bekannt sind, erfolgen. Aus diesem Grund ist der Zeitpunkt der Bauteilprüfung ebenso relevant wie eine Ausrichtung nicht-formstabiler Bauteile an einem definierten Bezugssystem mit Hilfe einer Messaufnahme. Durch die geringere Steifigkeit und sehr viel größere Anpassungsfähigkeit der Geometrie ergeben sich bei Kunststoffbauteilen wesentlich geringere funktionale Genauigkeitsanforderungen als bei Metallteilen. Zur wirtschaftlichen Herstellung sollte sich die Bauteilprüfung auf wenige funktionsbedingte Prüfmaße beschränken, die vorher zwischen Bauteilhersteller und Abnehmer abgestimmt werden.

Werden diese Regeln bei der Anwendung von Kunststoffen konsequent berücksichtigt, können kostengünstig und problemlos qualitativ hochwertige, maßhaltige und somit funktionstüchtige Kunststoff-Formteile hergestellt werden.

## 9. QUELLEN

- [BBORS, 2013] Baur, E., Brinkmann, S., Osswald, T. A., Rudolph, N., Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. Carl Hanser Verlag, München, 2013.
- [Bonten, 2016] Bonten, C.: Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen. Carl Hanser Verlag, München, 2016.
- [DEEH, 2012] Domininghaus, H.: Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. Elsner, P., Eyerer, P., Hirth T. (Hrsg.). Springer Verlag, Heidelberg, 2012.
- [Gröger, 2013] Gröger, S.: Funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation. Habilitation, Technische Universität Chemnitz, 2013.
- [MF, 2013] Meyer, B.-R., Falke, D.: Maßhaltige Kunststoff-Formteile. Toleranzen und Formteilengineering. Carl Hanser Verlag, München, 2013.
- [WDJ, 2015] Weißbach, W., Dahms, M., Jaroschek, C.: Werkstoffkunde. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2015.
- [8015, 2011] DIN EN ISO 8015:2011-09. Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln. Beuth-Verlag, Berlin, 2011.
- [10579, 2013] DIN EN ISO 10579:2013-11. Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Bemaßung und Tolerierung – Nicht-formstabile Teile. Beuth-Verlag, Berlin, 2013.
- [16742, 2013] DIN 16742:2013-10. Kunststoff-Formteile - Toleranzen und Abnahmebedingungen. Beuth-Verlag, Berlin, 2013.
- [20457, 2018] ISO 20457:2018-09, Plastics moulded parts – Tolerances and acceptance conditions.



# STABILE UND REPRODUZIERBARE BESCHREIBUNG DER KANTENGESTALT IM STRÖMUNGSSCHLEIFEN

**Eckart Uhlmann, Simon Roßkamp**

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

---

*Abstract: Die Anforderungen an Werkstückkanten unterscheiden sich in der industriellen Praxis in Abhängigkeit ihrer Anwendung. In jedem Fall ist die eindeutige Beschreibung der Kantengestalt eine Herausforderung, die durch bestehende Ansätze nur bedingt gelöst werden kann, da mit ihnen entweder eine einfache oder eine exakte Beschreibung der Kantengestalt, jedoch nicht beides gleichzeitig, möglich ist. Dabei ist insbesondere zur Entwicklung von Prozessmodellen eine Beschreibung der Kantengestalt mit möglichst wenigen Parametern in eindeutiger, stabiler und reproduzierbarer Weise bei weitestgehender Unabhängigkeit des Ergebnisses von Bedienerinflüssen notwendig. Diese Ziele werden von der entwickelten Methodik insbesondere dadurch erfüllt, dass sie sich neben einer hohen Abbildungsgüte und Automatisierung durch Bedienerunabhängigkeit und die Kantenbeschreibung durch wenige Parameter auszeichnet. Ebenso wird die Übertragbarkeit auf industriell eingesetzte Bauteile nachgewiesen.*

**KEYWORDS:** ALGORITHMUS, WERKSTÜCKKANTEN, BEDIENERUNABHÄNGIGKEIT, ANALYTISCHE BESCHREIBUNGSPARAMETER, FINISHING

---

## 1. EINLEITUNG

In Forschungen zur Schneidkantenarchitektur wurde erkannt, dass mit komplexen Formen der Verschleiß an der Schneidkante um bis zu 70 % reduziert werden kann [Heckmann, 2010]. Um die resultierende erhöhte Standzeit für die Produktion nutzen zu können, sind bei der Werkzeugherstellung eine exakte Fertigung der Schneidkante, eine möglichst genaue Messung und eine aussagekräftige Weiterverarbeitung der Messdaten notwendig, um die Fertigungsprozesse und deren Bearbeitungsergebnisse beurteilen zu können [Fritz, 2011]. Bei der Qualifizierung von Kanten besteht die Herausforderung in der nicht vorhandenen allgemein anerkannten Methodik, wie sie beispielsweise bei der Bestimmung der Oberflächenrauheit etabliert ist. Eine Unterteilung der Zustände der Schneidkante in die kategoriellen Eigenschaften scharfkantig, gefast und gerundet ist neben weiteren geometrischen Eigenschaften normativ beschrieben [6582, 1988]. Mess- und Auswertevorschriften wie sie zur Qualifizierung der Oberflächenrauheit [4287, 2010] in der Normenreihe zur Geometrischen Produktspezifikation [8015, 2011] akzeptiert sind, liegen jedoch nicht vor. Ebenso ist für die Fertigung von Bauteilkanten eine genaue Beschreibung der Kantengeometrie sowie deren Tolerierung häufig nicht gegeben. Vor diesem Hintergrund ist eine stabile und reproduzierbare Beschreibung der Kantengestalt in der Feinstbearbeitung notwendig, da hier die Endqualität des Produktes bestimmt wird [Brinksmeier, 1991].

## 2. STAND DER TECHNIK

### 2.1 Definition und Klassifizierung von Kanten

Sowohl im allgemeinen Sprachgebrauch als auch im technischen Umfeld wird als Kante zunächst die Linie bezeichnet, die sich beim Schnitt zweier Ebenen ergibt [13715, 2018]. Diese Idealvorstellung ist technisch jedoch nicht realisierbar, sodass insbesondere an Schneidkanten selbst bei dem Begriff „scharfkantig“ stets eine gewisse Rundung angenommen wird [Klocke, 2018]. Mit solchen scharfkantigen Werkzeugen werden verschiedene Definitionen verbunden. Diese reichen von Schneidkanten, die nach der Fertigung nicht gerundet wurden [Risse, 2006] über Rundungen, deren Radius  $r_n$  Größenordnungen von bis zu  $2\ \mu\text{m}$  annehmen können [M'Saoubi, 2004], bis hin zu Abweichungen von  $\pm 0,05\ \text{mm}$  [13715, 2018]. Während bei definierten Kantenrundungen die Zeichnungseintragung entsprechend der geometrischen Form erfolgt, werden Kanten mit unbestimmter Gestalt hinsichtlich der tolerierten Abmaße beschrieben. Dabei werden die Bereiche der tangentialen Linien zur idealgeometrischen Form definiert, in denen die tatsächlichen Oberflächen von der idealgeometrischen Form abweichen dürfen [13715, 2018]. Einen Sonderfall in der Kantenbeschreibung bilden Grate, mit denen Materialüberschüsse der idealgeometrischen Form der Kante beschrieben werden [Aurich, 2009]. Neben der Definition der Grate in Form von Material, das außerhalb der idealgeometrischen Form liegt [Schäfer, 1975], existiert auch eine weitergehende Definition, die ebenso fehlendes Material einschließt [Ko, 1996].

### 2.2 Bestehende Methoden zur Beschreibung der Kantengestalt

Für die Beschreibung der Kantengestalt existieren bereits verschiedene Methoden, bei denen unterschiedliche geometrische Ansätze verfolgt werden. Für gerundete Schneidkanten wird die Einpassung von Kreiselementen genutzt, sodass der Grad der Rundung über den Kreisradius beschrieben wird [Fulemova, 2014]. Im Programm „Aquila“ wird der Ansatz fortgeführt, indem zusätzlich zur Kreiseinpassung in den gesamten Kantenbereich je ein Kreis in den linken und den rechten Kantenbereich eingepasst wird [Uhlmann, 2017]. Dadurch wird die Beschreibbarkeit von asymmetrischen Kanten verbessert. Als Alternativen zur Kreiseinpassung werden die Einpassung von Ellipsen [Tang, 1990], die Interpolation der Kantenform mit Polynomen sechsten Grades [Cortés, 2009] oder die Verwendung von B-Splines [Yussefian, 2013] vorgeschlagen. Insbesondere zur Beschreibung von Werkzeugen mit geometrisch bestimmter Schneide wird die K-Faktor Methode genutzt, in der die Rücksetzung des Profilschnitts der Kante im Vergleich zur idealgeometrischen Form beschrieben wird [Denkena, 2005]. Dabei werden sowohl an der Span- als auch an der Freifläche die Abstände zwischen der idealgeometrischen Werkzeugspitze und dem Übergangspunkt von der Kantenrundung zum linearen, tangential anschließenden Bereich ermittelt. Durch die Bestimmung des Quotienten aus den beiden Längen sowie den kürzesten Abstand zwischen der idealgeometrischen Werkzeugspitze und der gerundeten Kante als auch der Winkellage dieses Abstandes werden einige Parameter generiert, mit denen eine

Beschreibung der Kante möglich, aber nicht eindeutig ist [Denkena, 2014]. Sofern Prüfvorschriften für Kanten vorliegen, kann mit Werksnormen der Robert Bosch GmbH die Kantenrundung bestimmt werden [Bosch, 2010]. Dabei ist hervorzuheben, dass der Einfluss der Oberflächenrauheit berücksichtigt wird [Zimmer, 2012].

Unabhängig von der Einpassung vordefinierter Formelemente kann die Schneidenprofilkennlinie (SPK) dazu genutzt werden, den kontinuierlichen Verlauf der Schneidkante abzubilden, indem für jeden Profilpunkt der Schneidkante der Freiwinkel  $\alpha$  bzw. der Spanwinkel  $\gamma$  aufgetragen wird [Uhlmann, 2011]. Mit dieser grafischen Auswertung können Kanten eindeutig charakterisiert werden und insbesondere hinsichtlich der Homogenität des Kantenverlaufes sowie der enthaltenen Formelemente untersucht werden. In der Weiterentwicklung wird die Profilkennlinie genutzt, um die Profilsteigung über der projizierten horizontalen Länge der Kante zu beschreiben [Uhlmann, 2017]. Dadurch können, ähnlich wie bei der SPK, Formelemente ermittelt und ihren Positionen auf der Kante zugeordnet werden. Da bei Fertigungsverfahren der Feinstbearbeitung neben trennenden Vorgängen auch umformende Mechanismen an der Mikrogestalt auftreten können, wird zur Bestimmung des vorherrschenden Bearbeitungsmechanismus eine Fehlflächenbestimmung durchgeführt [Uhlmann, 2017]. Dabei werden das gemessene Profil mit der idealgeometrischen Form verglichen bzw. die im Profilschnitt eingeschlossenen Flächen bestimmt. Je nach Lage der Flächen gehen sie in der Berechnung des Kennwertes addiert oder subtrahiert.

### 2.3 Fertigungsverfahren der Feinstbearbeitung

Als Feinstbearbeitung wird der letzte Prozessschritt in einer Prozesskette bezeichnet, mit dem sowohl die angestrebte Makrogeometrie eingestellt als auch die Mikrogeometrie im Sinne einer verringerten Oberflächenrauheit verbessert wird [Preger, 1940]. Solche Fertigungsverfahren, die sich auch zur Bearbeitung von Kanten eignen, weisen häufig ein mechanisches Wirkprinzip auf wie beispielsweise das Gleitschleifen oder Strömungsschleifen [Uhlmann, 2013]. Darüber hinaus kommen elastisch gebundene Schleifscheiben [Brinksmeier, 2009] oder das Bürsten zum Einsatz [Hashimoto, 2016]. Für die Rundung von Schneidkanten werden zudem verschiedene Strahlverfahren [Bouzakis, 2014] und die magnetabrasive Bearbeitung genutzt [Denkena, 2014].

## 3. ANFORDERUNGEN AN DIE BESCHREIBUNG DER KANTENGESTALT

Ausgehend von den im Stand der Technik beschriebenen Erkenntnissen werden diverse Anforderungen an die Beschreibung der Kantengestalt gestellt. Da bisher kein Verfahren existiert, mit dem aus gegebenen Kennwerten die Kantengestalt konstruiert werden kann, soll die Beschreibung der Kantengestalt vor allem eindeutig sein. Gleichzeitig kann dieser Vorteil nur genutzt werden, wenn die Beschreibung exakt und mit möglichst geringem Fehler erfolgt. Daher soll die Beschreibung der Kantengestalt über möglichst wenige Parameter erfolgen. Im Sinne der Fehlervermeidung ist zudem eine weitgehende

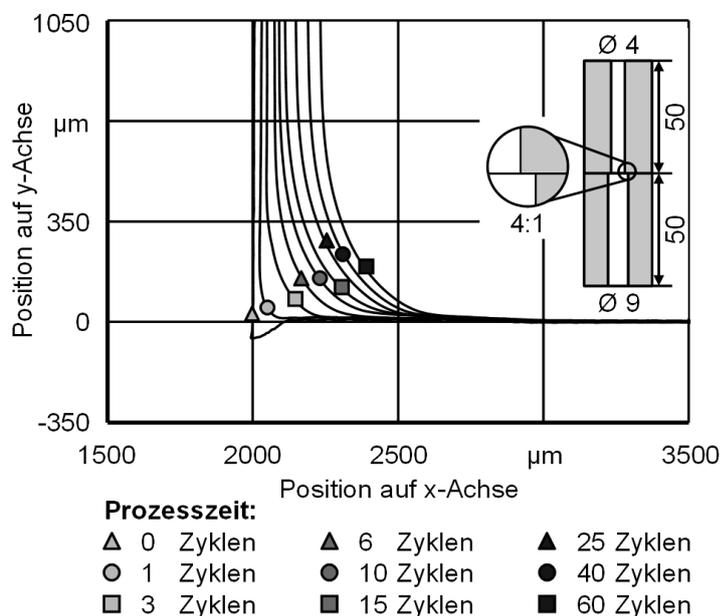
Bedienerunabhängigkeit anzustreben, da jede Operation, die eine Entscheidung des Bedieners erfordert, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gefährdet. Daher soll die Auswertung der Messdaten ohne Bedienerinfluss und automatisiert ablaufen.

Für die Erreichung der Ziele Reproduzierbarkeit, Eindeutigkeit weniger Parameter, Exaktheit der Auswertung, geringer Fehler, Bedienerunabhängigkeit und Automatisierung ist ein algorithmisches Verfahren zu entwickeln. Dafür sind insbesondere eine hohe numerische Stabilität und Robustheit gegen Oberflächenrauheiten anzustreben. Bei Erreichung des Ziels kann in Prozessmodellen die Kantenform aus den simulierten Parametern eindeutig abgeleitet werden. Trotz aller Maßnahmen zur Erzielung einer hohen Güte wird die Entstehung von Fehlern nicht vermeidbar sein, sodass deren Bestimmung und Ausgabe explizit zu nennende Anforderungen an den Algorithmus sind.

## 4. ENTWICKLUNG DES BESCHREIBUNGSMODELLS

### 4.1 Beobachtungen bei Kantengröße und Kantenform

Technologische Untersuchungen der Kantenkontur im Strömungsschleifen führten zu der Erkenntnis, dass sich die Kantenkontur während der Prozesszeit fortlaufend verändert. Eine Kombination von neun Profilschnitten zu unterschiedlichen Prozesszeiten ist in Abb. 1 dargestellt.



#### Prozess:

Strömungsschleifen

#### Schleifmedium:

Zeller+Gmelin GmbH & Co. KG  
Multicut Flowgrind  
LP5060N35BP

#### Werkstück:

Vergütungsstahl, 1.7228

Bohrung in Zylinder

$d_{i4} = 4,0$  mm

$d_{i9} = 9,0$  mm

#### Prozessparameter:

Volumenstrom:

$\dot{V} = 7.000$  mm<sup>3</sup>/s

Hublänge

$h = 4 \times 50$  mm

Medientemperatur:

$T = 35$  °C

Abb. 1: Entwicklung der Kantenkontur während der Prozesszeit

Darin ist zu erkennen, dass für alle Prozesszeiten ein Kantenbereich vorliegt, der sich zwischen den Grenzpunkten befindet, an denen der Kantenbereich in der Idealvorstellung in lineare, tangential anschließende Abschnitte des Profilschnitts übergehen, die als Flanke bezeichnet werden. Bei dem gratbehafteten

Ausgangszustand ist der Kantenbereich bereits nach einem Zyklus entgratet und eine Rundung aufgebracht, die sich jedoch in nur geringem Maße von einer scharfkantigen Form unterscheidet. Ab einer Prozesszeit von drei Zyklen ist der Kantenbereich bereits deutlich stärker gerundet, wobei ein Kreisbogensegment zur Beschreibung der Form offenbar nicht geeignet ist. Vielmehr können eine Ellipse oder eine Exponentialfunktion geeignete Formelemente sein, um die Kantenform zu beschreiben. Diese Beobachtung setzt sich hin zu langen Prozesszeiten stetig fort und führt zu der Erkenntnis, dass die Kantenform erhalten bleibt und allein die Kantengröße zunimmt, die mit der Bogenlänge des Kantenbereiches beschrieben werden kann. Diese Zunahme der Kantengröße ist eine Folge der Materialabtrennung, die in Abb. 2 dargestellt ist.

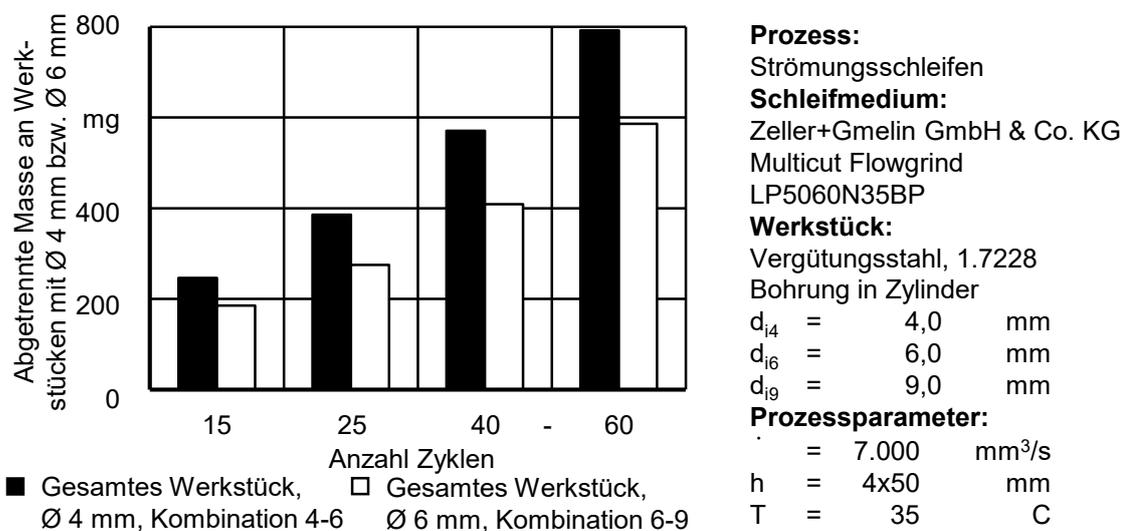


Abb. 2: Kumulierte Materialabtrennung in Abhängigkeit der Kombination und der Prozesszeit

In diesem Kontext weiterführende Untersuchungen belegen, dass die Materialabtrennrates sowohl an den Kanten als auch an den zylindrischen Oberflächen und daher am gesamten Werkstück konstant ist [Uhlmann, 2018]. Die sich ergebende Form an der Kante und die Aufweitung des Innendurchmessers in den zylindrischen Bereichen ist auch in Abb. 1 zu erkennen.

## 4.2 Numerisches Verfahren zur Bestimmung der Kantengeometrie

Der Algorithmus wurde so entwickelt, dass er unabhängig von Messgeräten funktionsfähig ist. Nach der Messung der Kanten im Profilschnitt ist also nur eine Reihe von ungefilterten, zweidimensionalen Messpunkten je Kante notwendig, um die Auswertung vorzunehmen. Dadurch ist die Autarkie von der verwendeten Messtechnik gegeben. Die Unabhängigkeit von Bedienerinflüssen ergibt sich aus den im Folgenden beschriebenen Operationen an den Messdaten. Da sämtliche Parameter für die Weiterverarbeitung aus den vorhandenen Daten abgeleitet werden, können durch den Bediener keine Einstellungen vorgenommen werden. Im vorliegenden Beispiel wurden die Messpunkte mit einem HOMMEL-ETAMIC nanoscan 855 der Jenoptik Industrial Metrology

Germany GmbH und einem Formmesstaster vermessen, der über einen Tastspitzenradius  $r_t$  von 20  $\mu\text{m}$  bei einem Tastspitzenwinkel  $\alpha_t$  von 22 ° verfügt. Bei der Vermessung wurde eine horizontale Messstrecke von 4 mm und ein Messpunktabstand von 0,5  $\mu\text{m}$  bei einer Messgeschwindigkeit von 0,5 mm/s gewählt.

#### 4.2.1. Filterung

Da bei Formmessungen die Oberfläche eines Werkstückes quantifiziert wird, ist ein Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Formmessung unvermeidlich. Dieser bekannten Herausforderung wird teils über eine Verschiebung des Profils einzelner Kantenabschnitte begegnet, wobei die Verschiebung in der Größenordnung der größten Höhe des Profils  $R_z$  liegen kann. Da im vorliegenden Algorithmus die Profilschnitte der Kanten aus Formmessungen ausgewertet und auf eine zusätzliche Bestimmung der Oberflächenrauheit verzichtet werden soll, wird eine Filterung am gemessenen Kantenprofil vorgenommen, um ein geglättetes Profil zu generieren. Dabei ist der Erhalt der Form unabdingbar. Im ersten Schritt des in Abb. 3 schematisch dargestellten Ablaufs wird das Profil so ausgerichtet, dass die Winkel zwischen der Abszisse und den Flanken des Kantenbereiches denselben Wert aufweisen. Darüber hinaus wird die lange Flanke so gekürzt, dass die tiefsten Punkte beider Flanken auf derselben Höhe liegen. Dabei wird zusätzlich der Anfangspunkt der linken Flanke in den Ursprung des Koordinatensystems verschoben. Im Anschluss wird eine kubische Spline konstruiert, die durch alle Messpunkte verläuft. Darüber hinaus werden die Abszissenwerte äquidistant verteilt. Diesen werden die jeweiligen Ordinatenwerte der kubischen Spline zugeordnet und für die weitere Verarbeitung als Datenpunkte gespeichert, sodass die Datenqualität erhöht ist.

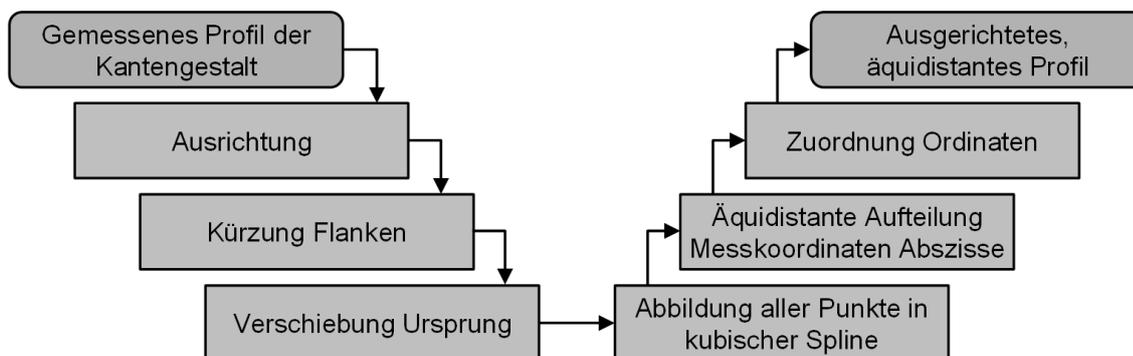


Abb. 3: Vereinheitlichung der Messdaten zur Vorbereitung der Kantenauswertung

Für die Filterung wird die oben beschriebene Spline verwendet, die zunächst alle Messpunkte abbildet. Abweichungen des Kurvenverlaufs von den Messpunkten treten erst mit zunehmender Glättung auf. Diese erfolgt numerisch, indem 100 Smoothing-Splines erzeugt werden, deren Smoothing-Faktor zwischen null und eins äquidistant verteilt ist. Bei der Glättung ergibt sich zwangsläufig zwischen den Smoothing-Splines und dem Kantenprofil eine Abweichung, die jeweils über die Summe der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt wird und in Abb. 4a dargestellt ist. Ein Maß für die Glättung wird für jede Smoothing-Spline über die

Integration der quadrierten zweiten Ableitung erstellt. Für die Quantifizierung der Glättung wird der Umstand genutzt, dass bei zunehmender Glättung der Daten die von der zweiten Ableitung und der Abszisse eingeschlossene Fläche immer kleiner wird. Gleichzeitig nimmt jedoch bei steigender Glättung der Fehler zwischen gemessenem und geglättetem Kantenprofil zu, sodass für die Bestimmung des geeignetsten Smoothing-Faktors ein Ausgleich zwischen den gegenüberstehenden Zielen gefunden werden muss.

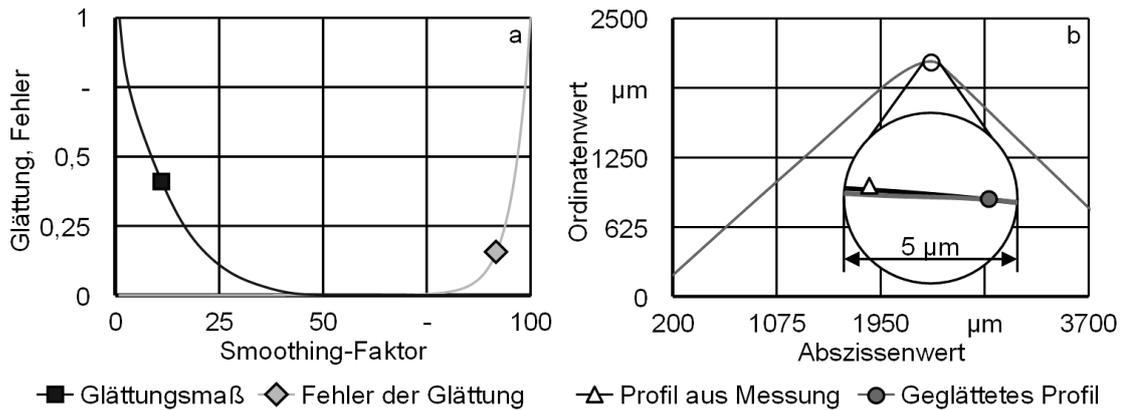


Abb. 4: Filterung der Messwerte: a) Glättung und Fehler; b) Ergebnis der Filterung

Um ohne Bedienerinfluss den geeignetsten Smoothing-Faktor zu bestimmen, werden die normierten Werte des Fehlers und der Glättung in einem dimensionslosen Parameter addiert, um anschließend das Minimum dieser Funktion zu bestimmen. An dieser Stelle liegt demnach eine maximale Glättung bei einem minimal möglichen Fehler vor. Eine Bestimmung der Oberflächenrauheit entfällt und Einflüsse des Bedieners bestehen nicht. Der Vergleich zwischen Originaldaten und der Spline mit dem geeignetsten Smoothing-Faktor ist in Abb. 4b dargestellt und zeigt marginale Abweichungen.

#### 4.2.2. Grenzpunkte des Kantenbereiches

Der oben beschriebenen Idealvorstellung der Kanten geometrie folgend, werden die Grenzpunkte des Kantenbereiches bestimmt, mit denen der Übergang von einer linearen Flanke zum Kantenbereich beschrieben wird. Dafür wird das stetige Kantenprofil am Scheitelpunkt in je einen Datensatz links und rechts des Scheitelpunktes geteilt. Aufgrund der vorher durchgeführten Ausrichtung ist sichergestellt, dass der Scheitelpunkt im Kantenbereich liegt. Für beide Datensätze wird die zweite Ableitung gebildet, sodass geradlinige Bereiche unabhängig von ihren Winkellagen den Wert null aufweisen, während gekrümmte Kantenbereiche einen in Abb. 5b dargestellten von Null verschiedenen Wert zeigen. Trotz der Glättung ist bei realen Daten ein Rauschen um die erwarteten Werte in der zweiten Ableitung unvermeidbar. Dies betrifft insbesondere nicht bearbeitete Bereiche, wie sie im rechten Teil von Abb. 5b zu sehen sind. Daher werden für die Flanken Toleranzbereiche bestimmt, in denen eine Schwankung um null zulässig ist. Da das Ausmaß des Rauschens maßgeblich von der die Formmessungen überlagernden Oberflächenrauheiten abhängt, kann kein

absoluter Toleranzbereich festgelegt werden. Dafür wird für jeden Teildatensatz nach anerkannten statistischen Regeln ein Histogramm der Ordinatenwerte erstellt, das erwartungsgemäß um null die größten Klassen enthält. Als Toleranzbereich wird die Klassenbreite um null definiert, sodass alle Werte der zweiten Ableitung, die innerhalb einer halben Klassenbreite über oder unter null liegen, Teil des Toleranzbereiches sind. Dies ist in dem vergrößerten Ausschnitt von Abb. 5b dargestellt. Dieses Vorgehen führt zu engen Toleranzbereichen, die maßgeblich von der Maximalkrümmung der Kante und der überlagerten Oberflächenrauheit abhängen.

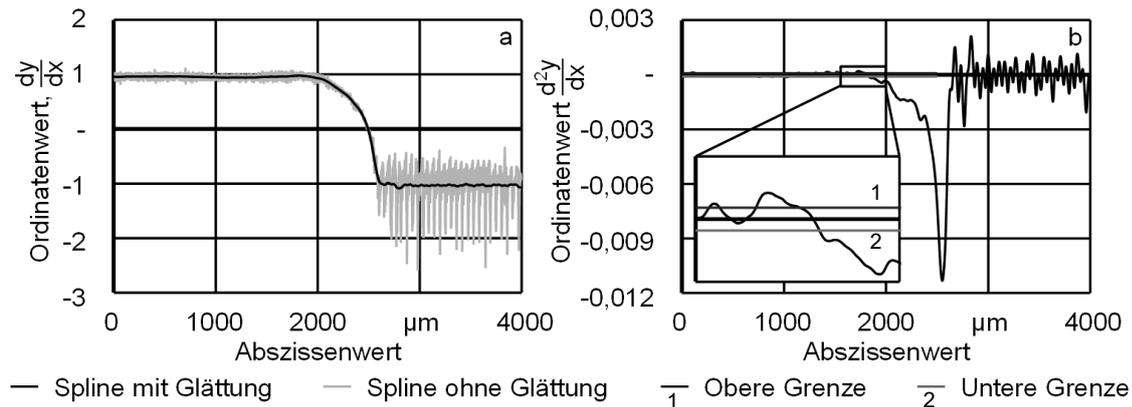


Abb. 5: Bestimmung des Kantenbereiches: a) erste Differenziation; b) zweite Differenziation

Für alle Abszissenwerte der Punkte, die in der zweiten Ableitung innerhalb des Toleranzbereiches liegen, werden in der ersten Ableitung die zugehörigen Ordinatenwerte ermittelt, aus denen der Median der Ordinatenwerte gebildet wird (Abb. 5a). Dieser Wert wird als Äquivalent der Steigung der idealisierten geradlinigen Flanke definiert. Durch die Nutzung der ersten Ableitung wird der Algorithmus im Vergleich zur Verwendung der zweiten Ableitung stabiler, da die Schwankungen in der ersten Ableitung deutlich geringer sind und in der Folge der Median geringeren Schwankungsbreiten unterliegt. Zudem kann damit auf einfachem Wege die Steigung der geradlinigen Flanken bestimmt werden, mit der die zugehörigen linearen Funktionen ermittelt werden, die im Abschnitt 4.2.3 beschrieben sind. Zur Bestimmung der Grenzpunkte wird vom Scheitelpunkt ausgehend in der ersten Ableitung der erste Schnittpunkt zwischen dem Graphen und dem Median ermittelt. Dem zugehörigen Wert der Abszisse wird aus den geglätteten Daten die entsprechende Ordinate zugeordnet, sodass sich die Koordinaten der Grenzpunkte des Kantenbereichs ergeben.

#### 4.2.3. Funktionale Beschreibung der Flanken und des Kantenbereiches

Nach der Bestimmung des Kantenbereichs und seiner Grenzpunkte werden die Daten so gedreht, dass der rechte Grenzpunkt im Ursprung des Koordinatensystems liegt und die anschließende Flanke mit der Abszisse deckungsgleich ist. Für die Beschreibung des Kantenbereichs werden verschiedene Funktionsansätze verfolgt, die in Tab. 1 aufgeführt sind.

Während die Flankenbereiche mit zwei linearen Funktionsansätzen beschrieben werden können, sind die Kantenbereiche nur mit komplexeren Funktionsansätzen beschreibbar. Mit dem Ansatz der Potenzfunktion reichen zwei Parameter zur Beschreibung aus, wobei komplexe Formen nur bedingt abgebildet werden können. Dem gegenüber bietet die Beschreibung des Kantenbereiches über zwei summierte Gaußfunktionen eine hohe Abbildungsgenauigkeit, erfordert jedoch die Angabe von sechs Parametern. Insbesondere an Kanten, die mittels Strömungsschleifen bearbeitet wurden, kann beobachtet werden, dass sie bei geeigneter Ausrichtung dem Verlauf von Exponentialfunktionen entsprechen.

Bereich	Bezeichnung	Funktion	Parameter
Flanke	Linear 1	$m \cdot x + b$	m b
	Linear 2	$m \cdot (x + b)$	m b
Kante	Potenzfunktion	$a \cdot x^b$	a b
	Gauß zweifach	$a_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2}$	$a_1$ $b_1$ $c_1$ $a_2$ $b_2$ $c_2$
	Exponentialfunktion 1	$a \cdot e^{b \cdot x}$	a b
	Exponentialfunktion 2	$e^{a \cdot (x+b)}$	a b

Tab. 1: Funktionsansätze zur Beschreibung der Kantenbereiche

Vor diesem Hintergrund werden diese Funktionen als Beschreibungsansätze berücksichtigt. Dabei bietet der zweite Ansatz den Vorteil, dass der Parameter  $b$  lediglich die Verschiebung auf der Abszisse beschreibt, sodass die Kantenform in diesem Ansatz allein über den Parameter  $a$  beschrieben werden kann.

#### 4.2.4. Abbildungsgüte

Da bei der Auswertung durch die Verarbeitung der Daten zwangsläufig Fehler entstehen, ist eine Überprüfung der Abbildungsgüte zur Bewertung der Ergebnisse unerlässlich, dessen Schema in Abb. 6 dargestellt ist. Dafür werden entlang der im ersten Schritt erstellten Spline äquidistant verteilte Punkte ermittelt. Die Anzahl entspricht dabei der Anzahl der Messpunkte aus der Profilmessung, sodass dieselbe Auflösung vorliegt.

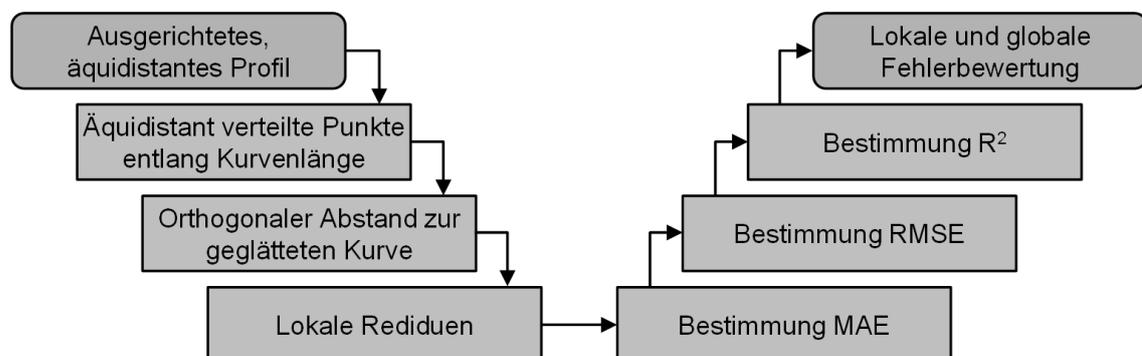


Abb. 6: Vorgehen zur Ermittlung der Abbildungsgüte

An jedem dieser Punkte wird eine orthogonale Linie erzeugt, für die der Schnittpunkt mit dem Graph der funktionalen Beschreibung ermittelt wird. Der Abstand dieser beiden Punkte entlang der orthogonalen Linie beschreibt das jeweilige lokale Residuum. Für eine graphische Veranschaulichung des lokalen Fehlers erfolgt eine Darstellung der lokalen Fehler entlang der Kurvenlänge. Für die Vergleichbarkeit von Ergebnissen werden zusätzlich Zahlenwerte des Fehlers bestimmt, die der Logik der graphischen Veranschaulichung entsprechen. Dafür wird entsprechend Formel (1) der mittlere absolute Fehler (MAE) bestimmt, bei dem die Summe der lokalen Residuen  $|\hat{r}_i - r_i|$  durch die Anzahl der Messpunkte  $n$  bzw. die Kurvenlänge dividiert wird. Darüber hinaus wird entsprechend Formel (2) der Root-mean-squared error (RMSE) bestimmt, bei dem die lokalen Residuen jeweils quadriert und anschließend summiert werden. Dieses Ergebnis wird anschließend durch die Anzahl der Messpunkte bzw. die Kurvenlänge dividiert, um im letzten Schritt den Wert der Quadratwurzel zu bestimmen.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{r}_i - r_i| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{r}_i - r_i)^2} \quad (2)$$

Darüber hinaus wird für eine globale Bewertung für jede Kantenauswertung das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ermittelt. Dadurch stehen neben der Beschreibung der Kantengestalt durch Koeffizienten unterschiedlicher Funktionsansätze lokale und globale Bewertungskriterien zur Verfügung. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass in keinem der Auswertungsschritte Einstellungen des Bedieners vorgenommen werden und die oben beschriebenen Anforderungen erfüllt sind.

#### 4.2.5. Anwendung auf Realbauteile

Die Anwendung des Algorithmus auf real bearbeitete Werkstückkanten ist in den oben verwendeten Bildern bereits enthalten, da für die Abbildungen Messdaten von bearbeiteten Werkstücken verwendet wurden. Dabei wurden mittels Strömungsschleifen Werkstückkanten an Rohrübergängen von Durchmesser  $d_i = 4$  mm zu  $d_j = 6$  mm bearbeitet. Als Prozessparameter wurden für eine Prozesszeit von zwölf Zyklen ein Volumenstrom  $V$  von  $7000 \text{ mm}^3/\text{s}$  sowie eine Hublänge  $h$  von  $50$  mm verwendet. Im Ergebnis zeigt sich eine sehr hohe Reproduzierbarkeit bei einem marginalen Fehler, was insbesondere bei dem Ansatz Exponentialfunktion mit dem Vorteil einhergeht, dass die Kantenform und -größe mit einem Parameter beschrieben wird.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ausgehend von der nicht eindeutigen Beschreibbarkeit von Kanten wurde ein Algorithmus entwickelt, mit dem unabhängig vom Messgerät Profilschnitte ausgewertet werden können. Diese Auswertung ist sowohl stabil als auch reproduzierbar und erfolgt ohne Einstellungen eines Bedieners.

Für mittels Strömungsschleifen bearbeitete Kanten eignet sich von den vorgestellten funktionalen Beschreibungsansätzen insbesondere die als Exponentialfunktion 2 bezeichnete Auswertung, da die Kantengröße und -form nur über den Parameter  $a$  beschrieben wird. Die hohe Genauigkeit dieses Algorithmus ermöglicht insbesondere die Verwendung in Prozessmodellen, die bereits Vorhersagen hoher Güte zeigen. Aus Gründen der Längenbeschränkung der Veröffentlichung werden diese Ergebnisse und die Anwendbarkeit des Algorithmus auf stochastische Verfahren wie Gleitschleifen und Bürsten in der Zukunft publiziert. Darüber hinaus werden im Fachausschuss „Charakterisieren und Messen von Schneidkanten“ der Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik des VDI/VDE weitere Parameter und Algorithmen zur Beschreibung von Schneidkanten erarbeitet.

## 6. DANKSAGUNG

Die Ergebnisse dieser Veröffentlichungen sind im Rahmen eines öffentlich geförderten Erkenntnistransfer-Projektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit dem Förderkennzeichen Uh100/169-1 entstanden. Besonderer Dank gilt B. Sc. Daniel Wollnik, dessen Mitarbeit an der Entwicklung des Algorithmus ausgesprochen wertvoll war.

## 7. QUELLEN

- [Aurich, 2009] Aurich, J. C.; Dornfeld, D.; Arrazola, P. J.; Franke, V.; Leitz, L.; Min, S.: Burrs - Analysis, control and removal. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Jg. 58, H. 2, 2009, S. 519-542.
- [Bosch, 2010] Robert Bosch GmbH: Messung von Radien an Werkstückkanten. Bosch-Norm N42AP 621. Gerlingen. Firmenschrift. 2010.
- [Bouzakis, 2014] Bouzakis, K.; Bouzakis, E.; Kombogiannis, S.; Makrimallakis, S.; Skordaris, G.; Michailidis, N.; Charalampous, P.; Paraskevopoulou, R.; M'Saoubi, R.; Aurich, J.; Barthelmä, F.; Biermann, D.; Denkena, B.; Dimitrov, D.; Engin, S.; Karpuschewski, B.; Klocke, F.; Özel, T.; Poulachon, G.; Rech, J.; Schulze, V.; Settineri, L.; Srivastava, A.; Wegener, K.; Uhlmann, E.; Zeman, P.: Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Jg. 7, H. 3, 2014, S. 264-273.
- [Brinksmeier, 1991] Brinksmeier, E.: Prozeß- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung. Habilitation, Universität Hannover. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [Brinksmeier, 2009] Brinksmeier, E.; Heinzl, C.; Bleil, N.: Superfinishing and grindstrengthening with elastic bonding system. Journal of

- Materials Processing Technology. Jg. 209, H. 20, 2009, S. 6117-6123.
- [Cortés, 2009] Cortés, C.; Tikal, F.: Schneidkantenpräparation - Ziele, Verfahren, Messmethoden. Kassel University Press, Kassel, 2009.
- [Denkena, 2005] Denkena, B.; Reichstein, M.; Brodehl, J.: Surface Preparation, Coating and Wear Performance of Geometrically Defined Cutting Edges. Konferenzbeitrag: 5th CIRP International Conference on Modeling of Machining Operations (CMMO). Chemnitz 10.05.-11.05.2005, Verl. Wiss. Scripten, 2005.
- [Denkena, 2014] Denkena, B.; Biermann, D.: Cutting edge geometries. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Jg. 63, H. 2, 2014, S. 631-653.
- [Fritz, 2011] Fritz, H.; Herrmann, J.: Qualitätsmanagement. 1. Aufl. Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2011.
- [Fulemova, 2014] Fulemova, J.; Janda, Z.: Influence of the Cutting Edge Radius and the Cutting Edge Preparation on Tool Life and Cutting Forces at Inserts with Wiper Geometry. Procedia Engineering. Jg. 69, 2014, S. 565-573.
- [Hashimoto, 2016] Hashimoto, F.; Yamaguchi, H.; Krajnik, P.; Wegener, K.; Chaudhari, R.; Hoffmeister, H.; Kuster, F.: Abrasive fine-finishing technology. CIRP Annals. Jg. 65, H. 2, 2016, S. 597-620.
- [Heckmann, 2010] Heckmann, L.: Systematische Analyse der Schneidkantenarchitektur mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Dissertation, Universität Kassel. Kassel University Press, Kassel, 2010.
- [Klocke, 2018] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 1. Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide. 9. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 2018.
- [Ko, 1996] Ko, S.; Dornfeld, D.: Burr formation and fracture in oblique cutting. Journal of Materials Processing Technology. Jg. 62, H. 1-3, 1996, S. 24-36.
- [M'Saoubi, 2004] M'Saoubi, R.; Chandrasekaran, H.: Investigation of the effects of tool micro-geometry and coating on tool temperature during orthogonal turning of quenched and tempered steel. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Jg. 44, H. 2-3, 2004, S. 213-224.
- [Preger, 1940] Preger, E.; Reindl, R.: Feinstbearbeitung. In: Klingelberg Technisches Hilfsbuch. Springer-Verlag, Berlin, 1940.
- [Risse, 2006] Risse, K.: Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Shaker-Verlag, Aachen, 2006.
- [Schäfer, 1975] Schäfer, F.: Entgraten. Verfahren, Theorie, Anlagen. Otto Krausskopf-Verlag, Mainz, 1975.

- [Tang, 1990] Tang, W.: Optische Messung der Schneidkantenschärfe von Schneidwerkzeugen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Selbstverlag, 1990.
- [Uhlmann, 2011] Uhlmann, E.; König, J.; Dethlefs, A.; Graf von der Schulenburg, M.: Charakterisierung geometrisch bestimmter Schneiden. *wt Werkstattstechnik online*. Jg. 101, H. 7-8, 2011, S. 475-481.
- [Uhlmann, 2013] Uhlmann, E.; Schmiedel, C.: Märkte kennen – Trends nutzen. Markt und Trendstudie Nachbearbeitungsverfahren Schwerpunkt Strömungsschleifen. Fraunhofer-Verlag, Berlin, 2013.
- [Uhlmann, 2017] Uhlmann, E.; Roßkamp, S.; Eulitz, A.: Weiterentwickelte Ansätze zur Charakterisierung von Kanten an Schneidwerkzeugen und Werkstücken. Konferenzbeitrag: XIV. Internationales Oberflächenkolloquium. Chemnitz 30.01.-31.01. 2017, Universitätsverlag Chemnitz, 2017.
- [Uhlmann, 2018] Uhlmann, E.; Roßkamp, S.: Modelling of material removal in abrasive flow machining. *International Journal of Automation Technology*. Jg. 12, H. 6, 2018, S. 883-891.
- [Yussefian, 2013] Yussefian, N. Z.; Koshy, P.: Parametric characterization of the geometry of honed cutting edges. *Precision Engineering*. Jg. 37, H. 3, 2013, S. 746-752.
- [Zimmer, 2012] Zimmer, M.: Vorgehen bei der Bewertung von Kantenbrüchen und Radien. Konferenzbeitrag: XIII. Internationales Oberflächenkolloquium. Chemnitz 12.03.-14.03.2012, Universitätsverlag Chemnitz, 2012.
- [13715, 2018] DIN ISO 13715:2018: Technische Produktdokumentation – Kanten mit unbestimmter Gestalt – Angaben und Bemaßung. Beuth-Verlag, Berlin, 2018.
- [4287, 2010] DIN EN ISO 4287:2010: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Beuth-Verlag, Berlin, 2010.
- [6582, 1988] DIN 6582:1988: Begriffe der Zerspantechnik: Ergänzende Begriffe am Werkzeug, am Schneidkeil und an der Schneide. Beuth-Verlag, Berlin, 1988.
- [8015, 2011] DIN EN ISO 8015:2011: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln. Beuth-Verlag, Berlin, 2011.



# HERAUSFORDERUNGEN BEI DER FUNKTIONSORIENTIERTEN TOLERIERUNG VON BLECHBAUTEILEN

**Martin Bohn**

Bohn Hetsch Partnerschaft, martin.bohn@toleranzexperten.de

*Abstract: Die funktionsorientierte Tolerierung von Blechbauten nach den ISO-GPS-Normen wird in der Praxis teilweise nicht normkonform angewendet. Die Ursachen dafür liegen im Fertigungsprozess des Stanzens (Scherschneidens). In dieser Veröffentlichung werden Lösungsvorschläge sowie der Handlungsbedarf für die internationale Normung aufgezeigt.*

**KEYWORDS: FUNKTION, TOLERANZ, BEZUGSSYSTEM, BLECH, BESCHNITT**

## 1. EINLEITUNG

Nach DIN EN ISO 8015 ist das Ziel der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) die vollständige Beschreibung aller geometrischen Funktionen eines Bauteils mittels Bezügen und Toleranzen.

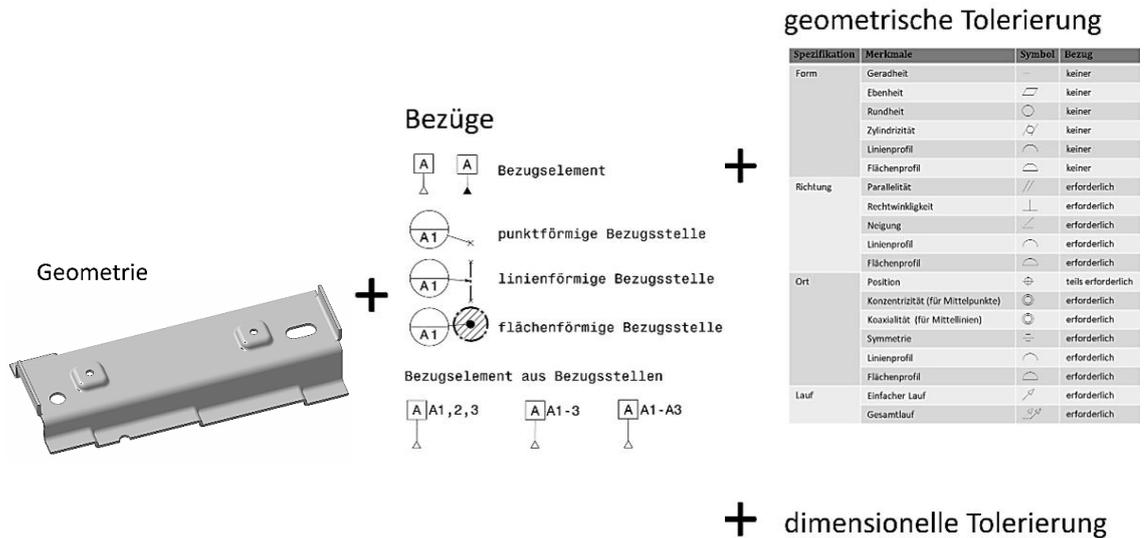


Abb. 1: Verschiedene Vorgehensweisen zur Tolerierung von Bauteilen

Abb. 1 zeigt die erforderlichen Bausteine. Nach dem Grundsatz des Geometrieelementes entsprechend DIN EN ISO 8015 gilt die Spezifikation für ein gesamtes Geometrieelement. Die Auswirkungen davon werden im Folgenden am Beispiel eines Beschnitts untersucht.





#### 4. KONSEQUENZEN

Das Schnittbild aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt den Konflikt. Entsprechend des *Grundsatzes des Geometrieelements* wäre die gesamte Fläche mittels eines Flächenprofils toleriert. Funktionsrelevant ist jedoch nur der Glattschnittanteil.

Dies führt bei einer Lagetolerierung zu den folgenden Fragen:

- Muss die gesamte Schnittfläche oder nur der Glattschnittanteil in der Toleranzzone liegen?
- Wie soll die Lage der Schnittfläche spezifiziert werden?

#### 5. BEISPIELHAFTE BETRACHTUNG

Die Betrachtung einer Schnittfläche von der Länge 100 mm eines 2 mm Aluminiumblechs mit Nachschneiden zeigt deutlich die Problemstellung. Die erreichbare Genauigkeit nach *Praxis der Umformtechnik* [Die-2019] zeigt Abb. 6.

Toleranzen in mm beim Ausschneiden des äußeren Umfanges

Werkstoffdicke $s$ in mm	Max. Seitenlänge des Umfanges in mm				
	bis 10	11 bis 30	31 bis 50	51 bis 100	101 bis 200
0,3 bis 1,0				0,20	
1 bis 2				0,28	
2 bis 4				0,34	

Abb. 6: Erreichbare Genauigkeit [Die-2019]

Diese Zahlenwerte können durch 5 geteilt werden, falls nachgeschnitten wird. Somit ergibt sich für das Beispiel eine erreichbare Genauigkeit von ca. 0,07 mm.

Die folgende Abbildung zeigt das Verhalten des Bruchflächenwinkels  $\beta$  (siehe auch Abb. 8) über den bezogenen Schneidspalt  $u/s$  nach VDI 2906 Blatt 2.

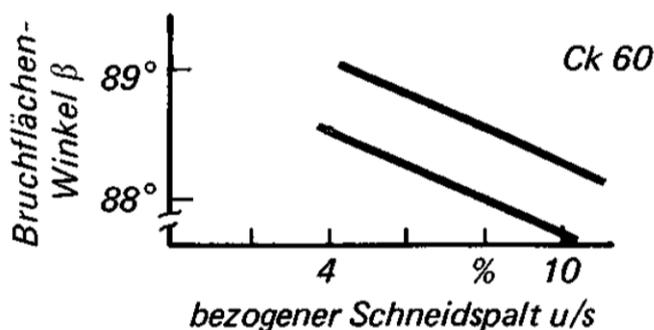


Abb. 7: Bruchflächenwinkel [VDI 2906]

In Ermangelung eines Zahlenwerts für die Aluminiumlegierung wird ein Winkel von  $88,5^\circ$  angenommen. Unter der weiteren Annahme eines Bruchanteils von

70°, welcher nach Abb. 5 eher noch zu gering ist, ergibt sich folgender Zusammenhang.

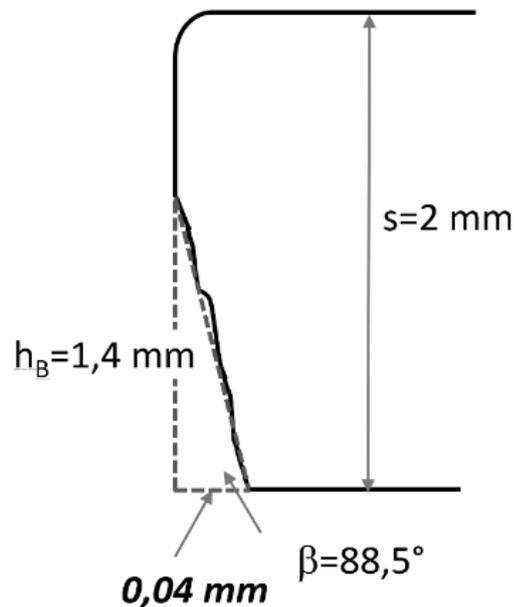


Abb. 8: Rücksprung der Bruchfläche

Eine Toleranz von 0,07 mm bedeutet  $\pm 0,035$  mm. Falls die Toleranz auf die ganze Fläche bezogen ist, wäre durch den Rücksprung von 0,04 mm der Bruchfläche (Abb. 8) selbst bei perfekter Lage des Glattschnitts die Toleranz durch die Bruchfläche verletzt. Somit ist ausschließlich die Tolerierung des Glattschnittanteils sinnvoll.

## 6. LÖSUNGSANSATZ

Für die Tolerierung ergeben sich folgenden Lösungsvarianten incl. Bewertung. Keine der Varianten ist ohne Erweiterung der aktuellen Normung universell einsetzbar.

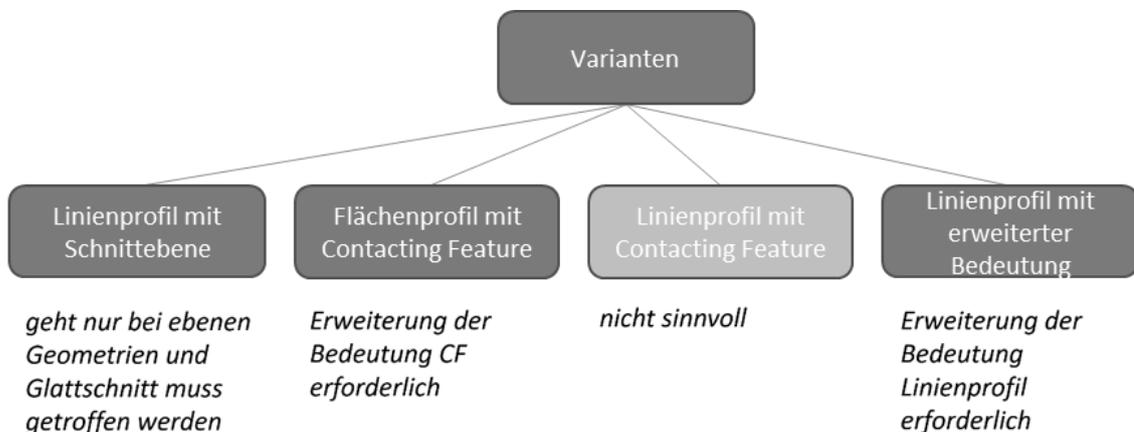


Abb. 9: Lösungsvarianten für die Tolerierung

Eine Variante mittels eines berührendes Geometrieelement (CF) könnte wie in Abb. 10-links aussehen. Dazu müsste die Definition CF erweitert werden. Insbesondere muss die Richtung des berührenden Zylinders definiert werden.

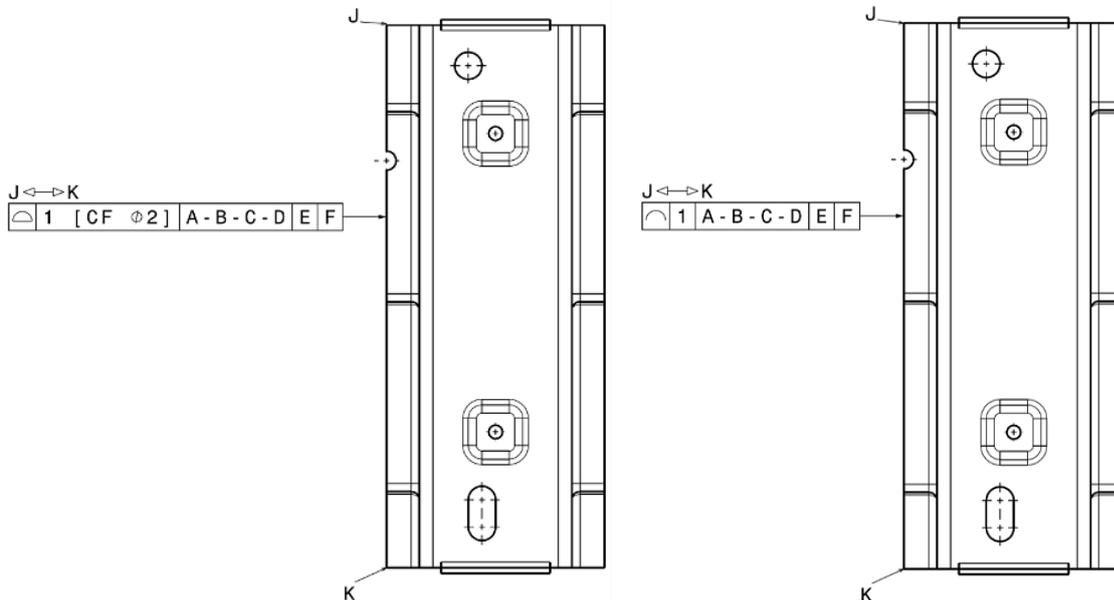


Abb. 10: Flächenprofil mit CF (links) und Linienprofil (rechts)

Die Abb. 10-rechts zeigt als alternative Variante die Anwendung des Linienprofils. Auch hier ist die Definition der zu erweitern, da das Linienprofil aktuell nur im Schnitt oder für abgeleitete Linien definiert ist.

## 7. FAZIT

Eine ausschließliche Tolerierung des Glattschnittanteils eines Beschnitts ist mit dem aktuellen Stand der Normung nicht möglich. Es wurde die Notwendigkeit einer Normerweiterung aufgezeigt und zwei alternative Lösungsvorschläge entwickelt. Diese sind Flächenprofil mit berührendem Geometrieelement oder Linienprofil. Weitere Lösungsmöglichkeiten z. B. mittels morphologischer Filter sind ebenfalls denkbar. Es sind noch weitere Untersuchungen erforderlich, um die Normung weiterentwickeln zu können.

## 8. QUELLEN

[Bohn, 2019] Martin Bohn, Klaus Hetsch: Funktionsorientiertes Toleranzdesign; Angewandte Form- und Lagetolerierung im Maschinen-, Fahrzeug- und Gerätebau; ISBN: 978-3-446-46002-7, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 2019.

[Die-2018] Jochen Dietrich; Praxis der Umformtechnik, Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen; ISBN 978-3-658-19529-8; 12. Auflage, 2018.

- 
- [ISO 128-1] DIN EN ISO 128-1 Technische Produktdokumentation (TPD) – Allgemeine Grundlagen der Darstellung – Teil 1: Einleitung und grundlegende Anforderungen; Beuth-Verlag, Berlin 2019.
- [ISO 1101] DIN EN ISO 1101 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf; Beuth-Verlag, Berlin 2017.
- [ISO 5459] DIN EN ISO 5459 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme; Beuth-Verlag, Berlin 2013.
- [ISO 8015] DIN EN ISO Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln; Beuth-Verlag, Berlin, 2011.
- [ISO 10579] DIN EN ISO 10579 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Bemaßung und Tolerierung – Nicht-formstabile Teile; Beuth-Verlag, Berlin 2013.
- [VDI 2906] VDI-Richtlinie Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall - Scherschneiden; VDI Handbuch Betriebstechnik, Teil 2, 1994.



# SIMULATIONSBASIERTE OPTIMIERUNG VON EINSTELLPARAMETERN FÜR DIE MESSUNG MITTELS RÖNTGENTOMOGRAFIE

**Raoul Christoph<sup>1</sup>, Hartmut Weise<sup>1</sup>, Marc Kachelrieß<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungsmesstechnik, Professur für Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung, Hartmut.Weise@TU-Dresden.de

<sup>2</sup> Deutsches Krebsforschungszentrum, Röntgenbildgebung und Computertomografie, Marc.Kachelrieß@DKFZ.de

---

*Abstract: Bei der Koordinatenmessung mittels Röntgentomografie beeinflussen die Eigenschaften des Messobjekts sowie die gewählten Einstellparameter in starkem Maße die Messunsicherheit. Die Optimierung der Einstellparameter hinsichtlich einer für die Messaufgabe ausreichend hohen Messpräzision bei einer möglichst geringen Messzeit ist für eine effiziente Messung entscheidend. Hierfür stehen dem Anwender bisher kaum Hilfen zur Verfügung, sodass das Einstellen der Parameter anhand zeitaufwändiger Versuche oder persönlicher Erfahrung erfolgt. Das vorgestellte auf einer Simulation der Messpräzision basierende Verfahren ermöglicht die Optimierung der Einstellparameter hinsichtlich einer vom Anwender vorgegebenen Messpräzision oder Messzeit unter Berücksichtigung der notwendigen Strukturauflösung. Der Nutzen für den Anwender wird anhand eines Beispiels demonstriert.*

**KEYWORDS:** KOORDINATENMESSTECHNIK, RÖNTGENTOMOGRAFIE, MESSUNSICHERHEIT, AUTOMATISIERUNG, EINSTELLPARAMETER

---

## 1. EINFÜHRUNG

In den letzten Jahren hat sich die Koordinatenmessung mittels Röntgentomografie als schnelles und zerstörungsfreies Messverfahren etabliert, welches die vollständige Erfassung aller innen- und außenliegenden geometrischen Eigenschaften erlaubt [Christoph, 2017]. Die Wahl der Einstellparameter hat einen deutlichen Einfluss auf die Messunsicherheit der Messergebnisse [VDI/VDE, 2011]. Während systematische Messunsicherheitseinflüsse, beispielsweise verursacht durch Temperaturänderungen oder Strahlaufhärtung, zunehmend korrigiert werden können [Maier, 2017; Maier, 2018], bleiben zufällige Messunsicherheitsbeiträge und damit die Messpräzision stark abhängig von den gewählten Einstellparametern. In [Buratti, 2018; Reiter, 2010; Schmitt, 2018] werden Verfahren zur Optimierung von Einstellparameter auf der Basis von Durchstrahlungsbildern beschrieben. Diese Verfahren berücksichtigen jedoch nicht die Auswirkung der Verarbeitung der Durchstrahlungsbilddaten. Die Optimierung erfolgt für das gesamte Messobjekt ohne Berücksichtigung der für die Messaufgabe relevanten Bereiche.

Im Folgenden wird ein auf der Simulation der Standardabweichung der Grenzflächenpunkte (Einzelpunktstreuung) basierender Algorithmus zur Optimierung von Einstellparametern (Einstellalgorithmus) vorgestellt. Dieser

erlaubt die Optimierung der Einstellparameter hinsichtlich einer vorgegeben Einzelpunktstreuung oder Messzeit unter Berücksichtigung der für die Messaufgabe notwendigen Strukturauflösung und ist aufgrund geringer Berechnungszeiten von wenigen Minuten für die industrielle Praxis geeignet ist. Das Verfahren wird anhand empirischer Versuchsreihen validiert und der Nutzen für den Anwender demonstriert.

## 2. VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG VON EINSTELLPARAMETERN

Es wurden ein auf empirischen Messreihen basierendes manuelles Verfahren und ein simulationsbasiertes automatisches Verfahren zur Bestimmung optimaler Einstellparametern untersucht.

### 2.1 Automatische Optimierung

Das verwendete Verfahren zur automatischen Optimierung von Einstellparametern (Einstellalgorithmus) basiert auf einer Weiterentwicklung der in [Christoph, 2018] beschriebenen Simulation der Standardabweichung von Grenzflächenpunkten (Einzelpunktstreuung). Die Berechnung der Einzelpunktstreuung erfolgt hierbei analytisch je für die Messaufgabe relevanten Grenzflächenpunkt. Das zugrundeliegende Prinzip wird anhand nachfolgender Abbildung für das vereinfachte Beispiel der linearen Interpolation zwischen 2 Voxeln (c) beschrieben.

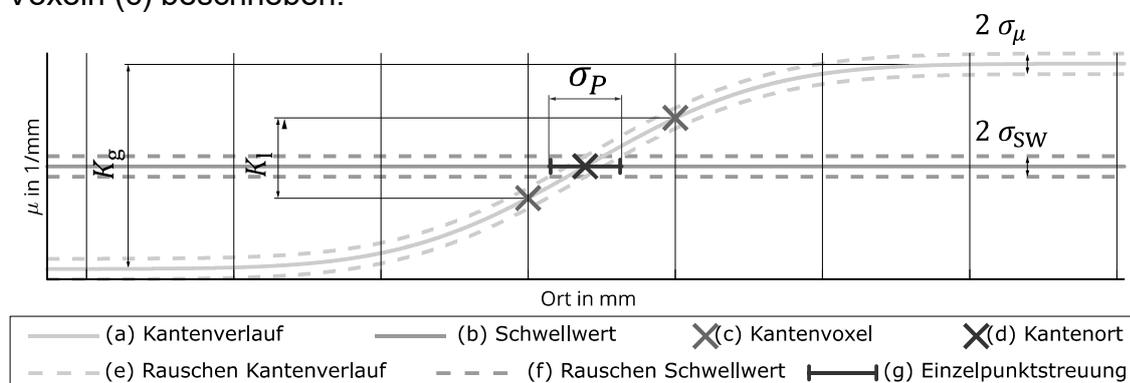


Abb. 1: Zusammenhang zwischen lokalem Kontrast, Rauschen und Einzelpunktstreuung

Zunächst wird der erwartete Schwächungskoeffizient am Ort des Kantenübergangs berechnet (Schwellwert (b)). Dies erfolgt beispielsweise durch Mittelung des minimalen und maximalen Grauwerts des betrachteten Kantenverlaufs (a). Dann werden die Voxel mit den zum Schwellwert nächst niedrigeren und höheren Werten ermittelt (Kantenvoxel (c)). Der resultierende Kantenort (d) entspricht dem Schnittpunkt des Schwellwerts mit der zwischen den Kantenvoxeln interpolierten Geraden. Dessen Einzelpunktstreuung  $\sigma_P$  ist proportional zu der Standardabweichung der rekonstruierten Schwächungskoeffizienten  $\sigma_\mu$  der Voxel (e) und des Schwellwerts  $\sigma_{sw}$  (f) sowie reziprok zu der Differenz der Schwächungskoeffizienten der Kantenvoxel (lokaler Kontrast). Die Einzelpunktstreuung  $\sigma_P$  (g) ist folglich umgekehrt proportional zu dem Verhältnis aus lokalem Kontrast und Rauschen (Kontrast-Rausche-Verhältnis, *CNR*).

Der lokale Kontrast und das Rauschen werden mit dem in [Christoph, 2018] beschriebenen Verfahren simuliert. Die Einzelpunktstreuung resultiert hieraus mit

$$\sigma_p \approx k \frac{d_V}{CNR}. \quad (1)$$

Hierbei ist  $d_V$  die Voxelgröße und  $k$  ein Skalierungsfaktor, welcher stark vom zur Bestimmung der Grenzflächenpunkte verwendeten Verfahren abhängt. [Christoph, 2018]

Im Folgenden wird unterschieden, ob das Optimum der Parameter von der zur Verfügung stehenden Messzeit abhängt (zeitvariant) oder nicht (zeitinvariant). Der Einstellalgorithmus lässt sich in die 5 Schritte einteilen:

1. Definition der Messaufgabe durch den Anwender,
2. Optimierung der zeitinvarianten Einstellparameter Vorfilter, Röhrenspannung und Röhrenleistung,
3. Bestimmung der einzustellenden Gesamtbelichtungszeit,
4. Optimierung der zeitvarianten Einstellparameter Integrationszeit, Anzahl der gemittelten Bilder je Projektion (Bildmittelungszahl) und Anzahl der Drehschritte (Drehschrittzahl) sowie
5. Abschätzung der resultierenden Messzeit sowie der minimalen oder mittleren Einzelpunktstreuung.

Die Gesamtbelichtungszeit entspricht hierbei dem Produkt aus Integrationszeit, Bildmittelungszahl und Drehschrittzahl. Der ermittelte Einstellparametersatz sowie die Messzeit- und Einzelpunktstreuung-Schätzung werden an den Anwender ausgegeben. Nach Bestätigung durch den Anwender werden die Parameter am Messgerät eingestellt.

### 2.1.1. Definition der Messaufgabe

In einem ersten Schritt werden die für die Optimierung der Einstellparametern benötigten Informationen über das Messgerät, das Messobjekt sowie die zu messenden geometrischen Eigenschaften definiert.

Die Informationen über das Messgerät (z.B. über die verwendete Röntgenröhre) werden von dem in WinWerth® integrierten Algorithmus automatisch ermittelt.

Die Beschreibung der Geometrie und Lage des Messobjekts in der Projektionsgeometrie erfolgt mit Hilfe einer triangulierten Punktwolke im STL-Format (STL-Punktwolke), welche beispielsweise mit einer vorab durchgeführten Schnelltomografie bestimmt werden kann. Das Material des Messobjekts wird durch eine vom Anwender angegebene Strukturformel und Dichte beschrieben.

Abhängig von den zu messenden geometrischen Eigenschaften müssen die relevanten Grenzflächenpunkte (Zielpunkte), die maximal zulässige minimale oder mittlere Einzelpunktstreuung bzw. Messzeit sowie die mindestens notwendige Strukturauflösung angegeben werden.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit die für die Optimierung zur Verfügung stehenden Wertebereiche der Einstellparameter einzuschränken. Die nachfolgende Tabelle zeigt typische minimale und maximale Werte für verschiedene Einstellparameter.

Einstellparameter	Minimum	Maximum
Röhrenspannung	60 kV	300 kV
Röhrenleistung	0,5 W	80 W
Vorfilter	keiner	3 mm Zinn
Integrationszeit	34 ms	4000 ms
Bildmittelungszahl	1	100
Drehschrittzahl	200	3200

Tab. 1: Typische minimale und maximale Einstellwerte für Tomografien mit der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Mikro-Fokus-Röntgenröhre und dem verwendeten Energieintegrierenden Flächendetektor

### 2.1.2. Optimierung zeitinvarianter Einstellparameter

Der Einstellalgorithmus erlaubt die automatische Optimierung der zeitinvarianten Parameter Röhrenspannung und -leistung sowie die Optimierung der Abschwächungsfähigkeit des Vorfilters. Ziel ist die Maximierung des zur maximalen bzw. mittleren Einzelpunktstreuung reziproken minimalen oder mittleren Kontrast-Rausch-Verhältnis  $CNR_{krit}$  der Zielpunkte bei minimaler Gesamtbelichtungszeit

$$T_{B,min} = t_{min} \cdot n_{\varphi,min} \quad (2)$$

Hierbei ist  $t_{min}$  die kleinste verfügbare Integrationszeit, bei der der Detektor weder über- noch unterbelichtet wird. Die minimal notwendige Drehschrittzahl zur Vermeidung von Aliasing-Artefakten lässt sich mit folgendem Zusammenhang berechnen [Kak, 2002].

$$n_{\varphi,min} = \frac{\pi}{4} \cdot n_{det} \quad (3)$$

Hierbei ist  $n_{det}$  die Anzahl der genutzten Detektorelemente in Spaltenrichtung.

Ausgehend vom Vorfilter geringster Abschwächungsfähigkeit wird die Kombination von Vorfilter, Röhrenspannung und Röhrenleistung gesucht, welche zum maximalem  $CNR_{krit}$  führt. Für jede untersuchte Kombination wird überprüft, ob die vom Anwender definierten Randbedingungen eingehalten werden. Zusätzlich werden die Integrationszeiten bestimmt, bei denen der Detektor weder

unter- noch überbelichtet ist. Wird eine der Randbedingung verletzt oder kann keine geeignete Integrationszeit gefunden werden, dann wird die untersuchte Kombination verworfen.

### 2.1.3. Bestimmung der einzustellenden Gesamtbelichtungszeit

Die einzustellende Gesamtbelichtungszeit  $T_B$  resultiert bei vorgegebener Messzeit  $T_M$  aus

$$T_B = T_M - T_O. \quad (4)$$

Hierbei ist  $T_O$  die Zeit die für andere Prozesse, wie das Speichern von Dateien, benötigt wird. Bei vorgegebener Einzelpunktstreuung  $\sigma_P$  resultiert die einzustellende Gesamtbelichtungszeit aus

$$T_B = T_{B,\min} \cdot \left( \frac{\sigma_{P,\text{krit}}}{\sigma_P} \right)^2. \quad (5)$$

$\sigma_{P,\text{krit}}$  ist hierbei die maximale bzw. mittlere Einzelpunktstreuung bei minimaler Gesamtbelichtungszeit  $T_{B,\min}$ . Ist die einzustellende Gesamtbelichtungszeit  $T_B$  kleiner als die mindestens notwendige Gesamtbelichtungszeit  $T_{B,\min}$ , dann wird die mindestens notwendige Gesamtbelichtungszeit  $T_{B,\min}$  eingestellt.

### 2.1.4. Optimierung zeitvarianter Einstellparameter

In einem ersten Schritt wird die kleinste Integrationszeit ausgewählt, die weder zu einer Unter- noch zu einer Überbelichtung führt.

Abhängig von der Konfiguration des Algorithmus wird im nächsten Schritt entweder die Drehschrittzahl oder die Bildmittelungszahl maximiert. Schließlich wird der Wert der Bildmittelungszahl oder Drehschrittzahl so angepasst, dass möglichst viel von der zur Verfügung stehenden, einzustellenden Gesamtbelichtungszeit genutzt wird.

## 2.2 Manuelle Optimierung

Die manuelle Ermittlung optimaler Einstellparameter zur Minimierung der Streuung der Messergebnisse oder der Messzeit erfolgt anhand empirischer Messreihen. Hierbei wird je Messreihe ein zu optimierender Einstellparameter zwischen einem definierten minimalen und maximalen Wert mit vorgegebener Schrittweite variiert. Alle anderen Einstellparameter werden konstant gehalten. Für jeden der hieraus resultierenden Einstellparametersätze werden 20 Messungen unter Wiederholbedingung durchgeführt. Je Messung wird eine STL-Punktewolke des Messobjekts berechnet. Die Grenzflächenpunkte werden anschließend mittels einer in WinWerth® integrierten, als Messfleck-Strategie bezeichneten Funktion gemittelt (Abb. 2).

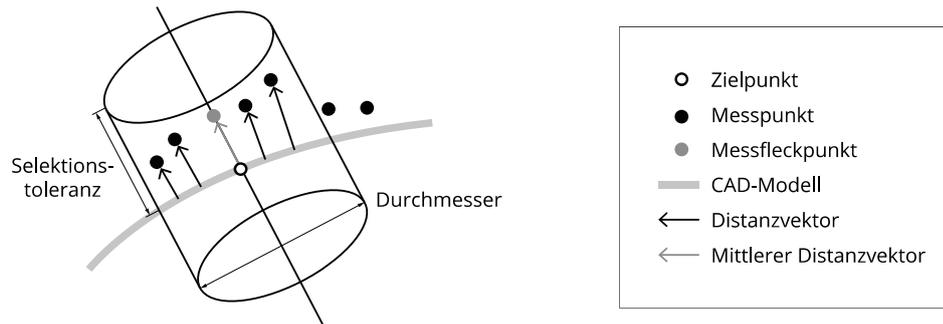


Abb. 2: Schematische Darstellung der Messfleck-Strategie

Je Zielpunkt wird eine zylinderförmige Region (Messfleck) mit definiertem Durchmesser und definierter Höhe (Selektionstoleranz) definiert. Die Achse des Zylinders steht senkrecht zu einem als Referenz verwendeten CAD-Modell. Für jeden innerhalb des Messfleck liegenden Punkt wird der Vektor zum jeweiligen Lotfußpunkt auf dem CAD-Modell berechnet (Distanzvektor). Der Messfleckpunkt resultiert aus der Summe von Zielpunkt und mittlerem Betrag der Distanzvektoren. Nimmt man vereinfachend an, dass die Einzelpunktstreuung der Grenzflächenpunkte innerhalb eines Messflecks bei kleinem Messfleckdurchmesser gleich ist, dann entspricht die Einzelpunktstreuung eines Zielpunkts in erster Näherung der Standardabweichung der Beträge der Distanzvektoren innerhalb des zugehörigen Messflecks.

### 3. VERGLEICH MANUELLER UND AUTOMATISCHER OPTIMIERUNG

Der Vergleich erfolgte für das Beispiel der Messung eines Mehrkugeldistanznormals (Abb. 3 links, MKDN).

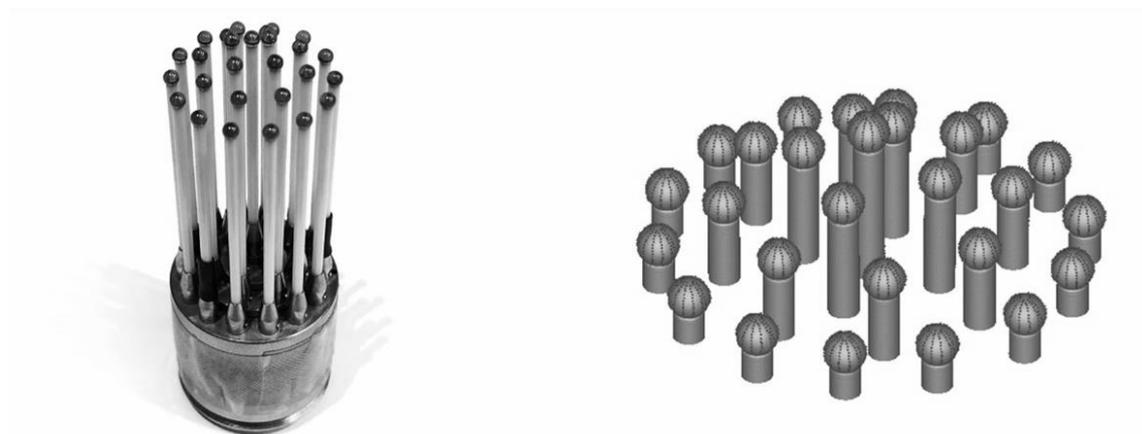


Abb. 3: Links: Fotografie, rechts: triangulierte Punktwolke (hellgrau) und Zielpunkte (dunkelgrau) des gemessenen MKDNs

Sowohl die manuelle als auch die automatische Optimierung der Einstellparameter erfolgte anhand der in Abb. 3 (rechts) dunkelgrau dargestellten Zielpunktewolke. Die in Abb. 3 (rechts) dargestellte STL-Punktewolke wurde zur Beschreibung der Geometrie und Lage des Messobjekts verwendet.

Es wurde sowohl die Optimierung bei Vorgabe einer maximal zulässigen Messzeit als auch bei Vorgabe einer maximal zulässigen Einzelpunktstreuung untersucht. Für die Messzeitvorgabe wurde eine von erfahrenen Anwendern vorgeschlagene Messzeit von 7 min gewählt. Für die Vorgabe der Einzelpunktstreuung wurde die goldene Regel der Messtechnik angewandt. Diese besagt, dass die Unsicherheit einer zu messenden geometrischen Eigenschaft höchstens ein Zehntel der Toleranz betragen darf [Berndt, 1968]. Bei Vernachlässigung systematischer Unsicherheitsbeiträge resultiert folgender Zusammenhang für die Streuung  $\sigma_{GE}$  einer geometrischen Eigenschaft.

$$\sigma_{GE} \leq \frac{t}{10}. \quad (6)$$

Der Durchmesser einer Kugel wird durch Einpassen einer analytischen Kugel mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. Nimmt man vereinfachend an, dass die Streuung des Durchmessers reziprok zur Wurzel aus der Anzahl der Grenzflächenpunkte  $n_P$  je Kugel ist, dann resultiert die maximal zulässige Einzelpunktstreuung aus

$$\sigma_{P,max} \approx \frac{t}{10} \cdot \sqrt{n_P}. \quad (7)$$

Für die aus der Projektionsgeometrie resultierende Voxelgröße von 0,025 mm resultieren ca. 19200 Punkte je Kugel. Bei einer Toleranz von 1  $\mu\text{m}$  folgt hieraus eine maximal zulässige Einzelpunktstreuung von ca. 14  $\mu\text{m}$ . Da nicht die gesamte Kugeloberfläche für das Einpassen verwendet wird, wird eine maximal zulässige mittlere Einzelpunktstreuung von 13  $\mu\text{m}$  definiert.

### 3.1 Optimierung zeitinvarianter Einstellparameter

In Abb. 4 ist das simulierte  $CNR_{krit}$  als Funktion der Röhrenspannung für verschiedene Vorfilter und eine Röhrenleistung von 60 W dargestellt.

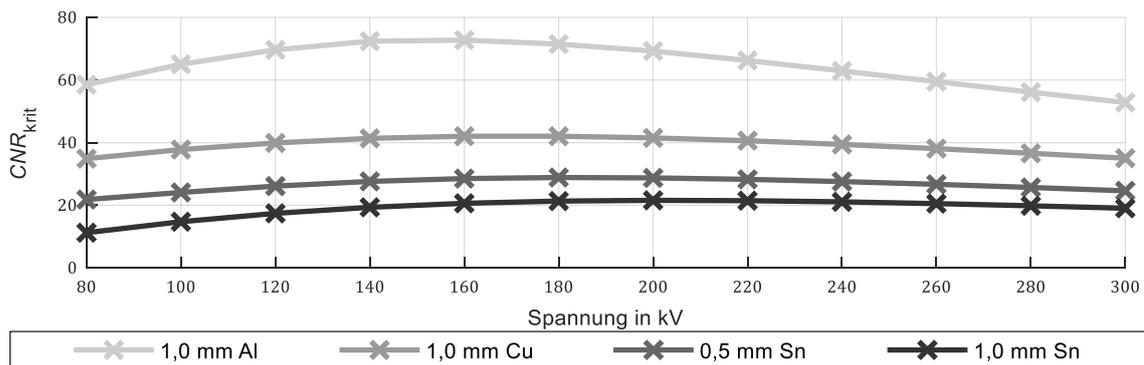


Abb. 4: Simuliertes  $CNR_{krit}$  als Funktion der Röhrenspannung für ausgewählte Vorfilter und eine Röhrenleistung von 60 W

Das maximale simulierte  $CNR_{krit}$  resultiert bei Messung mit einem 1 mm Aluminium-Vorfilter, einer Röhrenspannung von 160 kV und einer Röhrenleistung von 60 W. In Abb. 5 ist die simulierte und gemessene Einzelpunktstreuung der Zielpunkte als Funktion der Spannung für diesen Einstellparametersatz dargestellt.

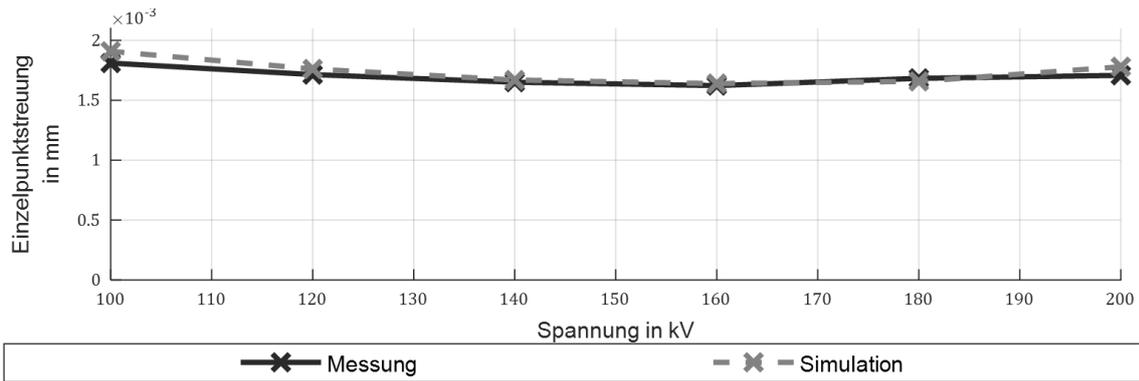


Abb. 5: Gemessene und simulierte Einzelpunktstreuung als Funktion der Röhrenspannung

Messung und Simulation zeigen gute Übereinstimmung. Die empirisch und simulativ ermittelten Optima für Röhrenspannung und Röhrenleistung sowie für den Vorfilter sind identisch. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Größe	Messzeitvorgabe 7 min
Röhrenspannung	160 kV
Röhrenleistung	60 W
Vorfilter	1 mm Aluminium

Tab. 2: Mit empirischen Messreihen und Einstellalgorithmus ermittelte Optima für die zeitinvarianten Parameter Röhrenspannung, Röhrenleistung und Vorfilter

### 3.2 Optimierung zeitvarianter Einstellparameter

Für die Optimierung der zeitinvarianten Einstellparameter wurde die Konfiguration zur Maximierung der Bildmittelungszahl und Optimierung der Drehschrittzahl gewählt (siehe Abschnitt 2.1.4). Die Ergebnisse der Optimierung sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Größe	Messzeit = 7 min	Einzelpunktstreuung = 0,013 mm
Einzustellende Gesamtblendungszeit	7 min	0,64 s
Integrationszeit	34 ms	34 ms
Drehschrittzahl	823	779
Bildmittelungszahl	15	1

Tab. 3: Ermittelte optimale Werte für Integrationszeit, Drehschrittzahl und Bildmittelungszahl für eine vorgegebene Messzeit von 7 min und Einzelpunktstreuung von 0,013 mm

Die vom Einstellalgorithmus gewählte Gesamtblendungszeit ist um einen Faktor 10,94 geringer als die vom Experten gewählte Gesamtblendungszeit.

In Abbildung 6 ist die simulierte und empirisch ermittelte Einzelpunktstreuung als Funktion der Gesamtbelichtungszeit dargestellt.

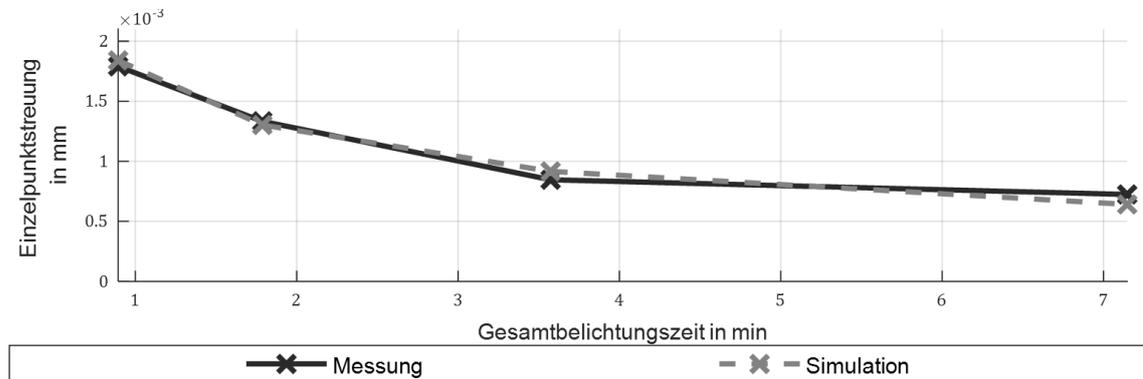


Abb. 6: Gemessene und simulierte Einzelpunktstreuung als Funktion der Gesamtbelichtungszeit

Simulierte und gemessene Werte zeigen gute Übereinstimmung. Die Berechnungszeit für die simulationsbasierte Optimierung betrug für das untersuchte Beispiel weniger als eine Minute.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Es konnte gezeigt werden, dass simulierte und gemessene Einzelpunktstreuung gute Übereinstimmung zeigen. Der auf der Simulation der Einzelpunktstreuung basierende Einstellalgorithmus führt zu denselben Ergebnissen wie die Auswertung aufwendiger Versuchsreihen. Der für die Durchführung empirischer Messreihen benötigte hohe Zeitaufwand kann mithilfe des Einstellalgorithmus auf wenige Minuten reduziert werden. Die Optimierung hinsichtlich einer vorgegebenen Einzelpunktstreuung ermöglicht eine deutliche Reduzierung der Messzeit.

#### 5. QUELLEN

- [Berndt, 1968] Berndt, Georg; Hultsch, Erasmus; Weinhold, Herbert: Funktionstoleranz und Meßunsicherheit. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden. Band 17, Nr. 2 1968, S. 470.
- [Buratti, 2018] Buratti, A.; Grozmani, N.; Voigtmann, C.; Sartori, L. V.; Schmitt, R. H.: Determination of the optimal imaging parameters in industrial computed tomography for dimensional measurements on monomaterial workpieces. In: Measurement Science and Technology 29, 2018, Nr. 11, S. 115009.
- [Christoph, 2017] Christoph, Ralf; Neumann, Hans Joachim: Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik: Präzise, wirtschaftlich und universell. 3., überarbeitete Auflage. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2017 (Die Bibliothek der Technik Band 331).

- [Christoph, 2018] Christoph, Raoul; Weise, Hartmut; Leinweber, Carsten; Kachelrieß, Marc: Examination of a Method for the Optimization of Scan Parameters for Measuring with Computed Tomography. In: 10th Conference on Industrial Computed Tomography. Wels, Austria, 2018.
- [Kak, 2002] Kak, Avinash C.; Slaney, Malcolm; Wang, Ge: Principles of Computerized Tomographic Imaging. In: Medical Physics 29, 2002, Nr. 1, S. 107.
- [Maier, 2017] Maier, Joscha; Leinweber, Carsten; Sawall, Stefan; Stoschus, Henning; Ballach, Frederic; Müller, Tobias; Hammer, Michael; Christoph, Ralf; Kachelrieß, Marc: Simulation-based artifact correction (SBAC) for metrological computed tomography. In: Measurement Science and Technology 28, 2017, Nr. 6, S. 65011.
- [Maier, 2018] Maier, Joscha; Sawall, Stefan; Knaup, Michael; Kachelrieß, Marc: Deep Scatter Estimation (DSE): Accurate Real-Time Scatter Estimation for X-Ray CT Using a Deep Convolutional Neural Network. In: Journal of Nondestructive Evaluation 37, 2018, Nr. 3, S. 6849.
- [Reiter, 2010] Reiter, Michael; Heinzl, Christoph; Salaberger, Dietmar; Weiss, D.; Kastner, J.: Simulative Parameteroptimierung für Metrologie an Multi-Materialbauteilen mit industrieller Röntgen Computertomografie. In: Proceedings Industrielle Computertomografie Fachtagung, 2010, S. 163–173.
- [Schmitt, 2018] Schmitt, Robert; Buratti, Andrea; Grozmani, Natalia; Voigtmann, Christoph; Peterek, Martin: Model-based optimisation of CT imaging parameters for dimensional measurements on multimaterial workpieces. In: CIRP Annals 67, 2018, Nr. 1, S. 527–530.
- [VDI/VDE, 2011] VDI/VDE 2630 Blatt 1.3: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren. Beuth-Verlag, Berlin, 2011.

# ERWEITERTE VORGEHENSWEISE ZUR FUSION FOKUSVARIIEREND UND KONFOKAL EXTRAHIERTER MESSDATEN

**Frank Segel, Marco Weißgerber, Sophie Gröger**

Technische Universität Chemnitz, Professur Fertigungsmesstechnik, [sophie.groeger@mb.tu-chemnitz.de](mailto:sophie.groeger@mb.tu-chemnitz.de)

---

*Abstract: Die „optische Messtechnik“ versteht sich als Sammelbegriff für eine Vielzahl an unterschiedlichen Messverfahren, -systemen und -technologien. Daraus ergeben sich entsprechend große Unterschiede im Hinblick auf kennzeichnende Eigenschaften, wie Messbereich, Auflösungsvermögen, Datenqualität und Verfahrensgrenzen. Eine holistische Erfassung von Oberflächen und Geometrien erfordert dabei in einigen speziellen Fällen die Kombination mehrerer Messverfahren und somit eine Vorgehensweise zur Zusammenführung von Messdaten unter Berücksichtigung der Differenzen inhärenter Eigenschaften. Im Rahmen dieses Beitrages wird eine solche Vorgehensweise zur Fusion von Daten aus Fokusvariation und Konfokalmikroskopie vorgestellt, welche auf einer unterteilten Bewertung von 2D-Intensitätsdaten zur Grobregistrierung und 2.5D-Oberflächendaten zur Feinregistrierung basiert. Zusätzlich werden Methoden zur Anpassung von Beleuchtungen und Skalenräumen beschrieben, die eine schnelle und robuste 2D Feature Detektion zulassen. Eine im Zuge dessen entwickelte Samplingstrategie ermöglicht anschließend die Überführung korrespondierender 2D Features in 2.5D-Datensätze und somit eine beschleunigte iterative Einpassung anhand minimaler Datenmengen. Das Verfahren ist Translations-, Skalen- und Rotations- invariant und erfordert keine Vorkenntnisse über Ort und Lage der zu fusionierenden Messdaten.*

**KEYWORDS: OPTISCHE MESSTECHNIK, MULTISENSORSYSTEME, DATENFUSION**

---



# VERTICAL FOCUS PROBING ZUR 3D MIKROGEOMETRIEMESSUNG BEI STANZWERKZEUGEN

**Kerstin Zangl, Reinhard Danzl, Franz Helmlí**

*Bruker Alicona, Research and Development, kerstin.zangl@bruker.com,  
reinhard.danzl@bruker.com, franz.helmlí@bruker.com*

---

*Abstract: Automatisierte Qualitätssicherung in der Entwicklung und Produktion von Mikropräzisionswerkzeugen gewinnt immer mehr an Bedeutung. So hat etwa bei Stanzwerkzeugen die Messung von Oberflächengüte und Mikrogeometrien mit Toleranzen bis in den Sub- $\mu\text{m}$  Bereich einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Werkzeuges und somit auf die Standzeiten in der Produktion. Dabei besteht ein Stanzwerkzeug aus bis zu tausend Einzelteilen. Einzelteile wie z.B. Präge- oder Biegestempel haben Freiformflächen, für die taktile Messgeräte oft ungeeignet sind, weil sie für die notwendige flächenhafte Messung sehr lange Zeit benötigen. Optische Messgeräte wiederum waren bis jetzt schwer einsetzbar, weil sie nicht in der Lage sind, die bei Stanzwerkzeugen häufig auftretenden vertikalen Flanken zu messen. Durch die Erweiterung der 3D Messtechnologie Fokus-Variation zu Vertical Focus Probing wird erstmals das Messen von vertikalen Flächen mit einem Steigungswinkel  $\geq 90^\circ$  mittels optischer 3D Messgeräte erlaubt. Somit kann einerseits die Geometrie des Werkzeugs vollständig aus einer Richtung erfasst werden und andererseits auch die Lage des Werkzeugs auf der Palette auf optischem Wege ermittelt werden.*

**KEYWORDS:** VERTICAL FOCUS PROBING, FOKUS-VARIATION,  $\mu\text{CMM}$ , DIMENSIONELLE MESSTECHNIK

---

## 1. EINLEITUNG

Heutzutage ist die optische, dimensionelle 3D Messtechnik ein wichtiger Bestandteil der Qualitätssicherung in der Mikropräzisionswerkzeugindustrie. Sowohl in der Entwicklung als auch in der Fertigung ist der Einsatz von teils automatisierten, optischen Messlösungen nicht mehr wegzudenken. Die Anforderungen an ein Messinstrument liegen hierbei sowohl im Messen von Mikrogeometrien mit Toleranzen im einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich bei relativ kurzen Messzeiten als auch in der Überprüfung der Oberflächengüte durch Messen von Profil- und Flächenrauheit.

Während bei taktilen Messgeräten die Messung mittels eines berührenden Tasters, abhängig vom Tastsystem und den Antastkräften, Beschädigungen an der Oberfläche herbeiführen können und taktile Messgeräte bei großen, flächenhaften Messungen oft eine relativ lange Messzeit aufweisen, zeichnen sich optische Messgeräte durch ihr berührungsloses Messprinzip [Leach, 2014], [Schuth, 2017] aus. Somit können Beschädigungen an der Werkstückoberfläche vermieden und flächenhafte Messungen mit relativ kurzen Messzeiten durchgeführt werden.

Bisher waren optische Messsysteme nicht geeignet zum Messen von vertikalen Flanken, da ein seitliches Antasten, wie es von taktilen Messgeräten erfolgt, nicht möglich war. Mit der Erweiterung von Fokus-Variation zu Vertical Focus Probing ist erstmals ein seitliches Antasten durch ein optisches Messinstrument möglich. Somit erweitert sich der messbare Steigungswinkel von  $87^\circ$  mit Standard Fokus-Variation auf bis zu  $92^\circ$  mit Vertical Focus Probing.

In diesem Dokument zeigen wir die Anwendung von Fokus-Variation, im Speziellen von Vertical Focus Probing, zur Qualitätssicherung eines 3-fach Prägeeinsatzes, bei dem sowohl Form- als auch Rauheitsparameter zur Verifikation herangezogen werden. Der Prägeeinsatz ist Teil eines Hochleistungsstanzwerkzeugs, der zur Fertigung von Automobilkontakten eingesetzt wird. Wurde ursprünglich mittels einer Rotationseinheit ein kompletter 3D Datensatz gemessen, indem während der Messung das Bauteil gekippt und rotiert wurde, ermöglicht Vertical Focus Probing das Messen der Außenfläche direkt durch seitliches Antasten, ohne das Werkzeug während der Messung rotieren oder umspannen zu müssen. Somit kann einerseits die 3D Geometrie des Prägeeinsatzes aus einer Messrichtung bestimmt werden. Andererseits kann eine deutliche Messzeitreduktion erzielt werden, da nur mehr einzelne Positionen für die Verifikation der Geometrie gemessen werden müssen.

Im Folgenden beschreiben wir zuerst das Messprinzip Vertical Focus Probing inklusive Genauigkeitsevaluierungen auf kalibrierten Proben. Im Applikationsteil dieses Dokumentes beschreiben wir die Anwendung von Fokus-Variation und Vertical Focus Probing anhand eines Hochleistungsstanzwerkzeugs (eines 3-fach Prägeeinsatzes).

## 2. MESSPRINZIP

### 2.1 Fokus-Variation

Fokus-Variation [Danzl, 2011], [25178, 2015] ist ein rein optisches Messprinzip, welches die geringe Schärfefinformation eines optischen Systems mit vertikalem Scannen kombiniert. Somit werden Topographie- und Farbinformation des zu messenden Objektes erfasst. Dadurch, dass Messinstrumente basierend auf Fokus-Variation nicht auf bestimmte Lichtquellen eingeschränkt sind, sind sie sehr gut zum Messen von Flächen mit einem Steigungswinkel bis zu  $87^\circ$  geeignet.

Durch die Erweiterung der Messtechnologie zu Vertical Focus Probing können Flächen mit einem Steigungswinkel bis zu  $92^\circ$  gemessen werden.

### 2.2 Vertical Focus Probing

Vertical Focus Probing [Zangl, 2019] ist eine Erweiterung der Fokus-Variations-Technologie und somit ein rein optisches Messverfahren, welches das Messen von vertikalen Flächen mit einem Steigungswinkel von mehr als  $90^\circ$  erlaubt.

Das Messprinzip von Vertical Focus Probing ist in Abb. 1 dargestellt: Die zu messende Oberfläche ist parallel zur optischen Achse. Somit ergibt sich ein Steigungswinkel von  $90^\circ$  bei vertikalen Flächen und ein Steigungswinkel von  $>90^\circ$  bei überhängenden Flächen. Abhängig von den Reflexionseigenschaften der zu messenden Oberfläche werden Lichtstrahlen in verschiedenste Richtungen reflektiert und immer ein Teil der Lichtstrahlen von der Optik aufgefangen und gebündelt. Die Menge der detektierten Lichtstrahlen hängt dabei sowohl von der Geometrie und Oberflächenrauheit der zu messenden Flächen als auch vom Typ und Position der verwendeten Lichtquelle ab. Im Gegensatz zu anderen optischen Messverfahren, ist Fokus-Variation in der Wahl der Lichtquelle nicht beschränkt, womit verschiedene Arten von Lichtquellen (Ringlicht, Polarisierung, koaxial usw.) genutzt werden können. Zusätzlich kann für komplexe Geometrien eine externe Lichtquelle genutzt werden.

Die zu messende Oberfläche wird wie bei Fokus-Variation vertikal gescannt und für jede Position wird die Fokuginformation ausgewertet (vgl. [25178, 2015]). Im Gegensatz zu Fokus-Variation, wo für jede xy Position eine vertikale Position z berechnet wird, werden bei Vertical Focus Probing mehrere z-Positionen berechnet, wodurch vertikale Geometrien repräsentiert werden können.

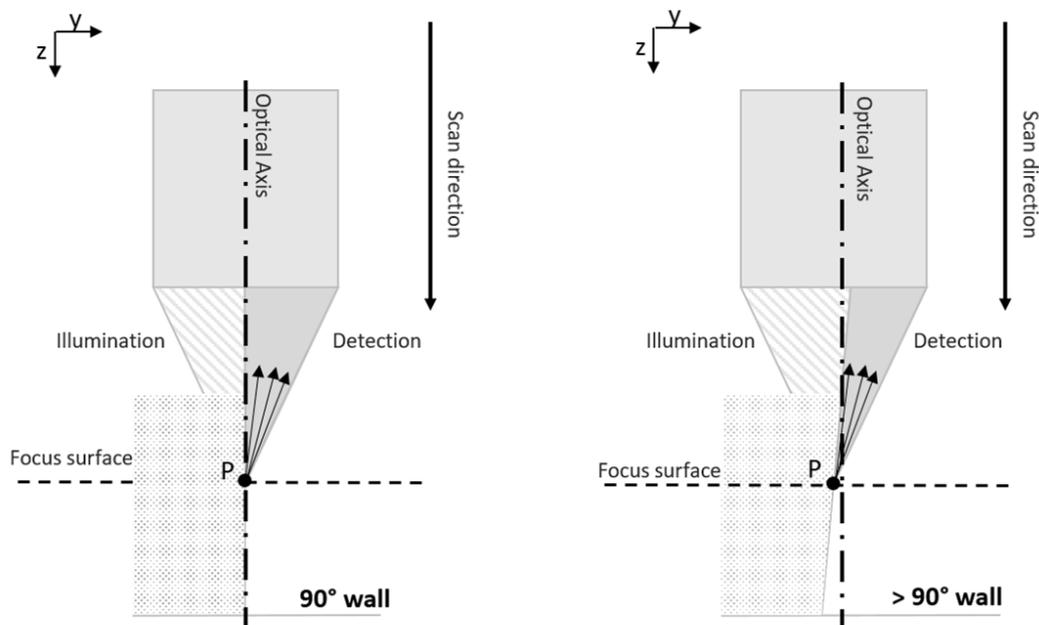


Abb. 1: Messprinzip von Vertical Focus Probing am Beispiel einer vertikalen Wand mit Steigungswinkel  $90^\circ$  (links) und Steigungswinkel  $>90^\circ$  (rechts)

Beim Standard Fokus-Variation Verfahren ergibt sich die Auflösung direkt aus der numerischen Apertur des Objektivs. Bei Vertical Focus Probing ergibt sich aufgrund der parallelen Messrichtung und der Geometrie des Messobjektes eine Vignettierung des Beleuchtungs- bzw. Detektionskegels, dessen Einfluss auf die Auflösung in x, y, und z nicht einfach direkt abgeleitet werden kann.

Um den Einfluss auf die Auflösung quantifizieren zu können, wurde eine Zemax Simulation der Point Spread Funktion für das 800A, das 400A und das 150A Objektiv durchgeführt. Die Simulation hat gezeigt, dass die Auflösung in x- und z-Richtung durch die Vignettierung nicht beeinflusst wird, während sich die Auflösung in y-Richtung in der Art und Weise verringert, als wenn bei der Berechnung die halbe numerische Apertur angenommen wird.

### 2.3 Vertical Focus Probing Genauigkeit

Zur Evaluierung der Genauigkeit von Vertical Focus Probing Messungen wurden zwei kalibrierte Proben gemessen, ein Pin mit Durchmesser  $6,00033 \text{ mm} \pm U = 0,00050 \text{ mm}$  ( $k=2$ ) kalibriert von der DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle) und eine Kugel mit Durchmesser  $0,99972 \text{ mm} \pm U = 0,00020 \text{ mm}$  ( $k=2$ ) kalibriert von METAS (Eidgenössisches Institut für Metrologie).

Zur Messung des Pins wurde dieser so in das Messsystem (Bruker Alicona  $\mu\text{CMM}$  – siehe Kapitel 3.2) eingespannt, dass die optische Achse parallel zur Pinachse liegt (siehe Abb. 2 links oben). Mittels Vertical Focus Probing wurden 8 Positionen an der Außenfläche des Pins gemessen und ein Zylinder (Methode der kleinsten Quadrate) in den resultierenden 3D Datensatz (siehe Abb. 2 links unten) eingepasst. Die Abweichung zwischen kalibriertem und gemessenem Wert liegt bei  $0,00059 \text{ mm}$  (siehe Tab. 1).

Zur Messung des Kugeldurchmessers wurde der Äquatorring der Kugel mittels Vertical Focus Probing gemessen (siehe Abb. 2 rechts) und eine Kugel (Methode der kleinsten Quadrate) eingepasst. Die Abweichung zwischen gemessenem und kalibriertem Durchmesser liegt bei  $0,00056 \text{ mm}$  (siehe Tab. 1). Zusätzlich wurde der Winkel zwischen optischer Achse und unterster gemessener Position ausgewertet, wodurch sich ein gemessener Steigungswinkel von  $92^\circ$  ergibt. Dadurch ergeben sich komplett neue Möglichkeiten in Bezug auf bidirektionale Messungen nach ISO 10360-8 [ISO 10360, 2013].

Probe	Einheit	Kalibrierter Wert	Gemessener Wert	Abweichung [mm]
Pin	mm	$6,00033 \pm 0,00050$	6,00092	0,00059
Kugel	mm	$0,99972 \pm 0,00020$	0,99916	0,00056

Tab. 1: Vertical Focus Probing Messresultate von kalibrierten Proben

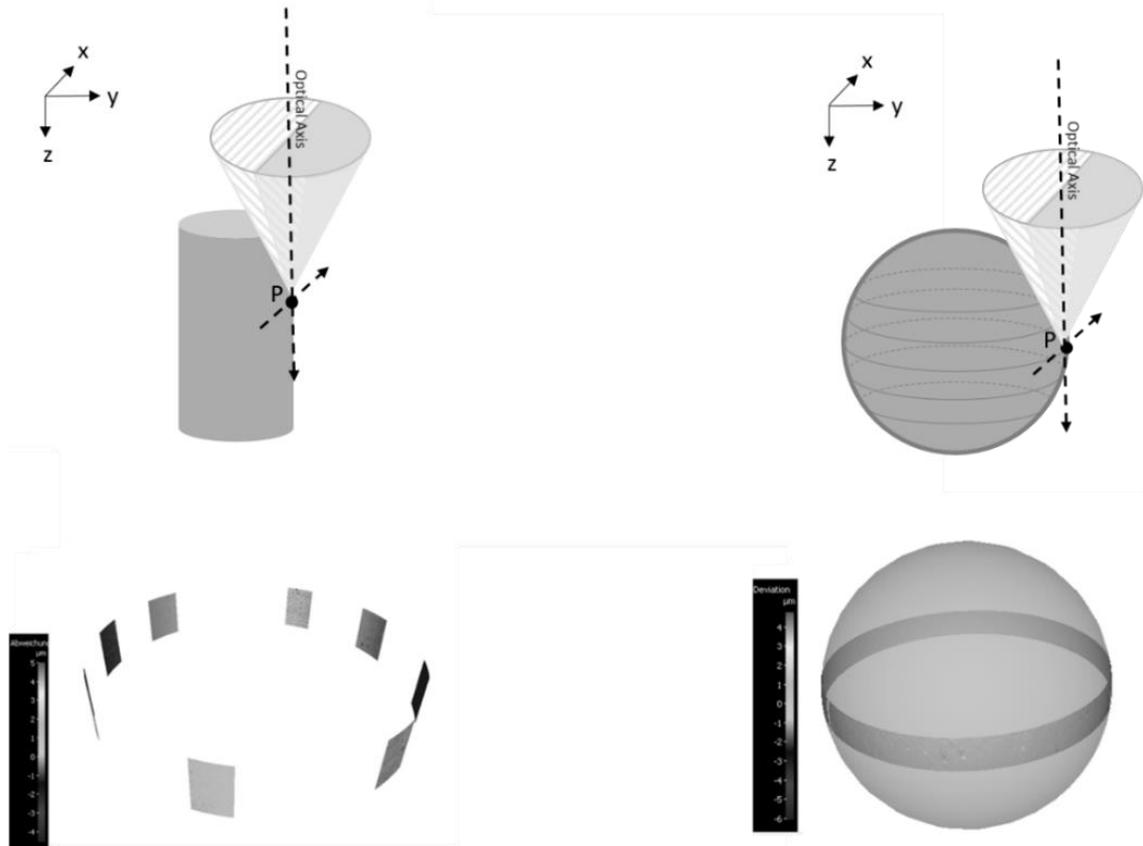


Abb. 2: Links: Messung eines kalibrierten Pins mittels VFP, rechts: Messung einer kalibrierten 1 mm Kugel mittels VFP – Bei beiden Messungen wurde mit einer koaxialen Beleuchtung gemessen.

### 3. MESSUNG EINES 3-FACH PRÄGEEINSATZES

#### 3.1 Messaufgabe

Das gemessene Bauteil ist ein 3-fach Prägeinsatz zur Fertigung von miniaturisierten Automobilkontakten. Bei diesen Prägeinsätzen werden sowohl Formeigenschaften als auch die Oberflächencharakterisierung als Qualitätskriterium herangezogen. In der folgenden Messapplikation wird die Bauteilgeometrie wie folgt verifiziert:

1. Prüfung der Formtreue über den gesamten Prägeinsatz durch einen Soll-Ist-Vergleich zum 3D CAD Datensatz. Zusätzlich werden Profilformabweichungen bestimmt.
2. Messung der Außenfläche mittels Vertical Focus Probing
3. Messung der Oberflächengüte

## 3.2 Messsystem - Messaufbau

Die Messung erfolgt mit einem Bruker Alicona  $\mu$ CMM [Zangl, 2018]. Das  $\mu$ CMM (siehe Abb. 3a) ist ein optisches 3D Mikrokoordinatenmessgerät mit einem Sensor basierend auf Fokus-Variation. Ein Objektivwechsler inklusive Objektivmagazin erlaubt das automatische Wechseln des Objektivs innerhalb einer Messaufgabe. In dieser Messaufgabe wird ein 150A Objektiv für die Messung der Oberflächengüte verwendet. Für Geometriemessungen wechselt das System automatisch auf ein 800A Objektiv bzw. 400A bei Vertical Focus Probing.

Der Prägeeinsatz wird mittels eines Erowa Spannsystems in eine Rotationseinheit eingespannt. So kann einerseits ein kompletter 3D Datensatz mittels Fokus-Variation gemessen werden, indem der Prägeeinsatz während der Messung rotiert wird. Zusätzlich kann der Prägeeinsatz so orientiert werden, dass die Außenfläche parallel zur optischen Achse steht (siehe Abb. 3b und 3c), sodass die gesamte 3D Geometrie unter Verwendung von Vertical Focus Probing aus einer Messrichtung gemessen werden kann.

## 3.3 Messergebnisse und Auswertung

### 3.3.1 Formtreue

Zur Bestimmung der Formtreue wurde die Flächenformabweichung und Profilformabweichung vom gemessenen 3D Datensatz zum CAD Datensatz bestimmt (siehe Abb. 4). Flächenbasiert wurde ein Soll-Ist-Vergleich mit dem CAD Datensatz durchgeführt und an mehreren für die Messaufgabe relevanten Stellen die Formabweichungen bestimmt. Alle Abweichungen liegen in einem Bereich von  $\pm 0,004$  mm. Für die Profilformabweichung wurden 3 Profile über den Differenzdatensatz gelegt und an mehreren, für die Messaufgabe relevanten, Positionen ausgewertet. Die Abweichungen liegen in einem Bereich von  $\pm 0,004$  mm. Die Detailergebnisse sind in Abb. 4 zu finden. Um im Hochleistungsstanzbereich eingesetzt werden zu können, muss die geforderte Formtreue im  $\mu$ m Bereich liegen.

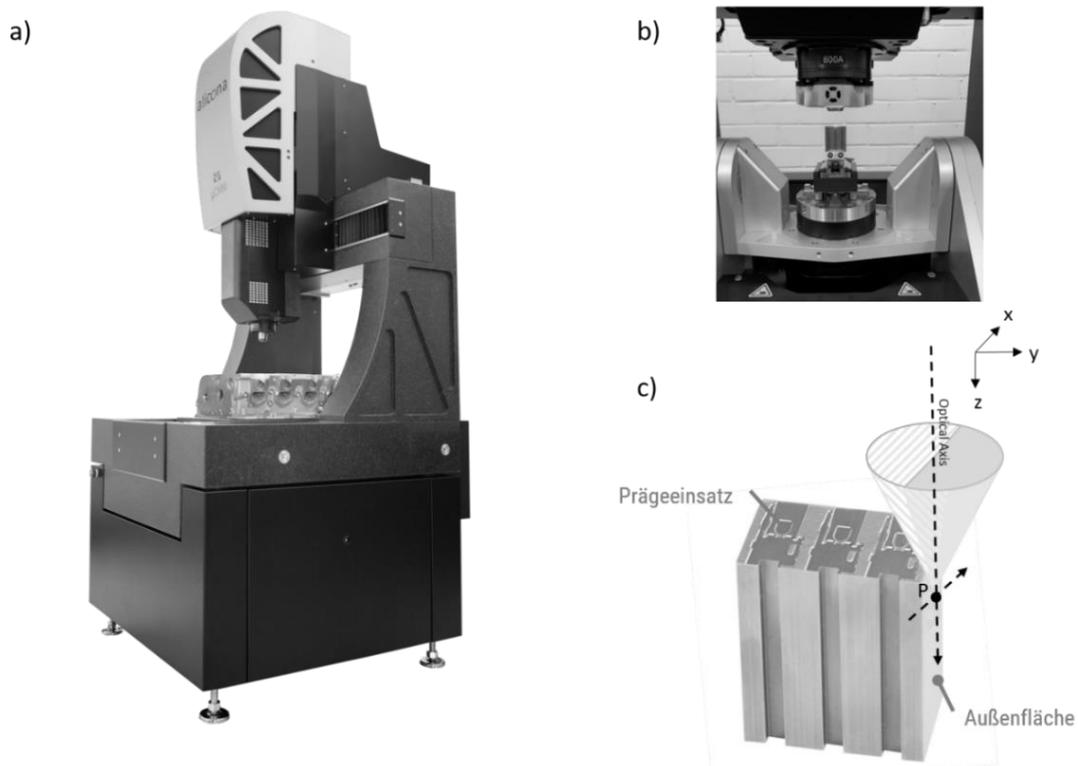


Abb. 3: a) Bruker Alicona  $\mu$ CMM, b) Messaufbau zur Messung der Außenfläche mittels Vertical Focus Probing, c) Schema einer Vertical Focus Probing Messung der Außenfläche des 3-fach Prägeeinsatzes

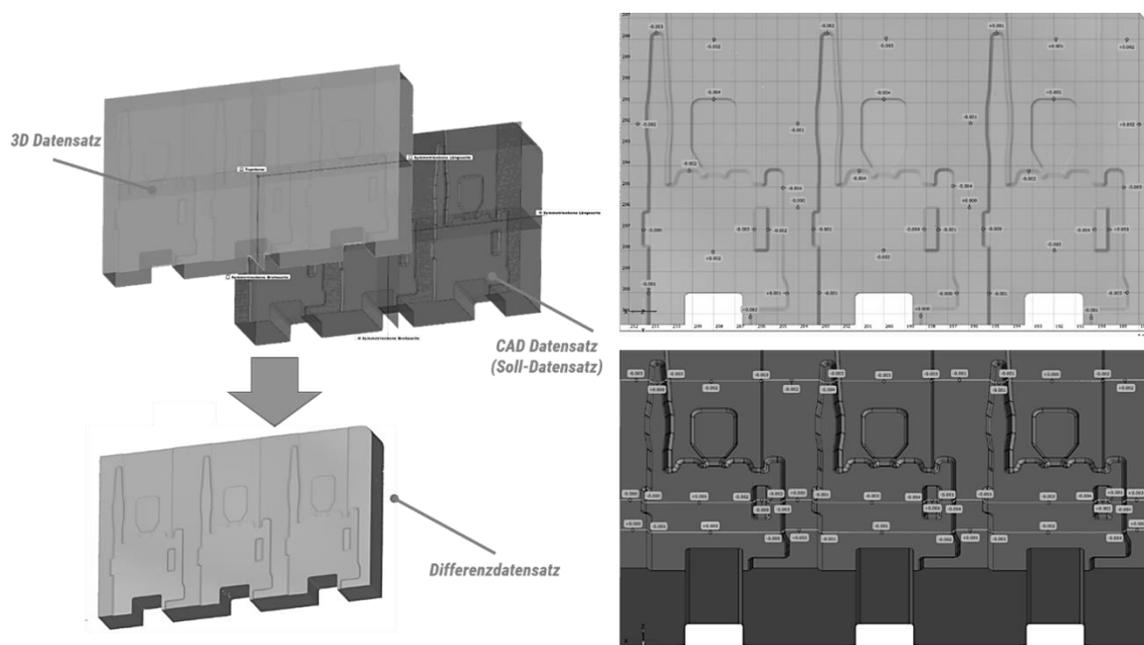


Abb. 4: Links: Bestimmung der Formtreue durch Messung des Differenzdatensatzes, rechts unten: Berechnung der Profilformabweichung im Bereich  $\pm 0,004$  mm, rechts oben: Soll/Ist Vergleich mit dem CAD Datensatz – Die Abweichungen sind im Bereich  $\pm 0,004$  mm.

### 3.3.2 Messung der Außenfläche mittels Vertical Focus Probing

Ein wichtiges Geometrieelement bei Stanzwerkzeugen ist die Außenfläche, da die Position des Prägeeinsatzes im Bezug zur Außenfläche verifiziert wird. Abb. 4 zeigt eine Vertical Focus Probing Messung eines Teilbereichs des 3-fach Prägeeinsatzes (siehe Abb. 4 rechts, welche Teilbereiche bei der Messung gemessen wurden). Der Prägeeinsatz wurde während der Messung so in das Messgerät eingespannt, dass die Außenfläche parallel zur optischen Achse liegt. Um die Außenfläche zu messen, muss das Bauteil nicht mehr während der Messung rotiert werden. Zusätzlich muss nicht mehr der gesamte 3D Datensatz gemessen werden, sondern es reichen Teilpatches aus, um den Bezug zur Außenfläche darzustellen. Dies führt zu einer deutlichen Messzeitreduktion.

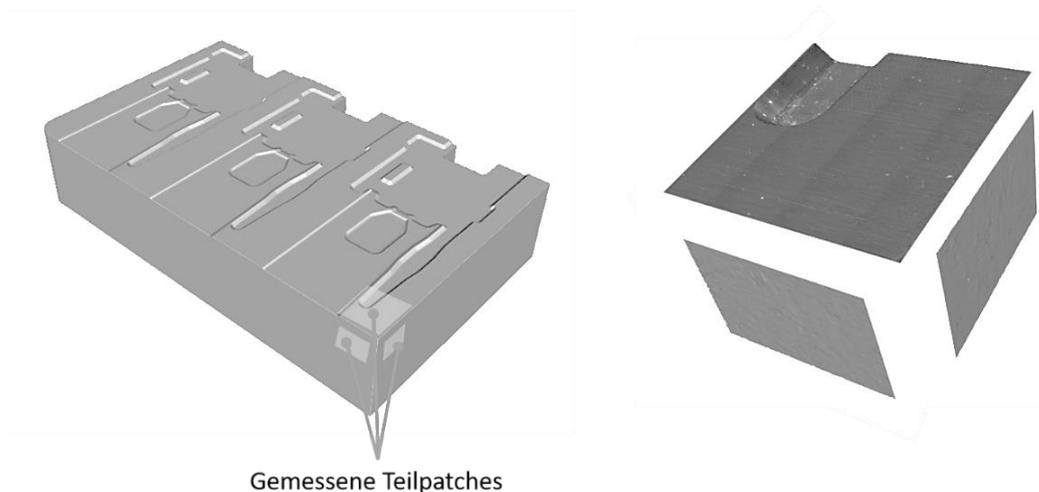


Abb. 5: Vertical Focus Probing Messung – Links: Für die Messung gewählte Teilbereiche, rechts: Gemessener 3D Datensatz

### 3.3.3 Oberflächengüte

Zur Oberflächencharakterisierung wurden sowohl die Profilrauheitsparameter, als auch die Oberflächenrauheitsparameter bestimmt. Abb. 5 und Tab. 2 geben einen Überblick über die resultierenden Parameter.

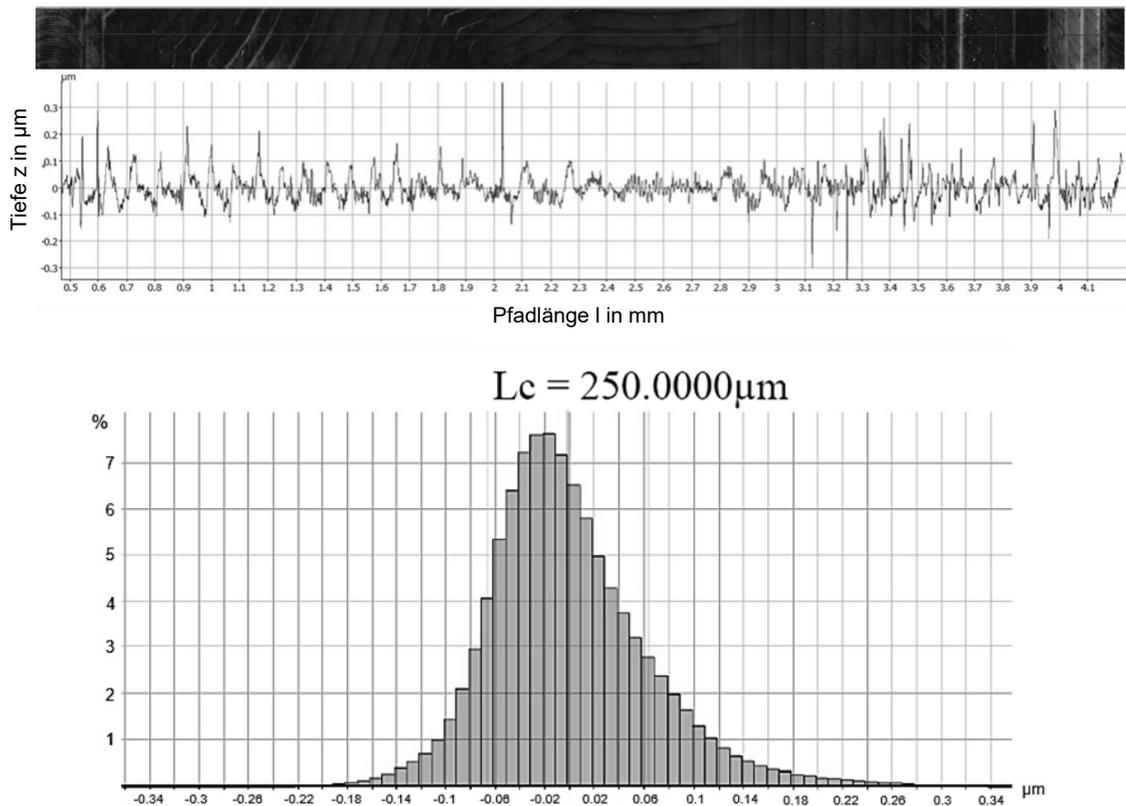


Abb. 6: Bestimmung der Oberflächengüte durch Profilrauheitsmessung (oben) und Oberflächentexturmessung (unten)

Name	Einheit	Wert
Ra	µm	0,0377
Rq	µm	0,0522
Rz	µm	0,4666
Sa	µm	0,0495
Sq	µm	0,0656
Sz	µm	1,4229
Lc	µm	250

Tab 2: Ergebnisse der Rauheitsmessung zur Bestimmung der Oberflächengüte

Zur Überprüfung der Oberflächengüte können je nach Anwendung sowohl die Profilrauheitsparameter als auch die Flächenrauheitsparameter verwendet werden.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

War seitliches Antasten bisher nur taktilen Messinstrumenten vorbehalten, ermöglicht Vertical Focus Probing erstmals das Messen von vertikalen Flächen mittels eines optischen Messgeräts. Bei Stanzwerkzeugen, wie den hier gemessenen Prägeeinsätzen, sind Formtreue, Oberflächengüte und Positionsbestimmungen wichtige Elemente der Qualitätssicherung. Wir haben gezeigt, dass die Bauteilgeometrie optisch aus einer Richtung gemessen werden kann, wodurch Vertical Focus Probing komplett neue Möglichkeiten im Bereich der dimensionellen 3D Messtechnik bietet.

#### 5. DANKSAGUNG

Dieses Paper wurde in Kooperation mit Fritz Stepper GmbH & Co.KG Präzisions-Werkzeuge erstellt. Wir bedanken uns für die Zusammenarbeit und die technische Unterstützung durch Herrn Alexander Geiger und Herrn Marcel Heisler!

#### 6. QUELLEN

- [Danzl, 2011] Danzl, R.; Helml, F.; Scherer, S.: Focus variation – A robust technology for high resolution optical 3D surface metrology. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011;57:245-56.
- [Leach, 2014] Leach, R.K.: *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. 2nd ed., Elsevier, 2014.
- [Schuth, 2017] Schuth, M.; Buerakov, W.: *Handbuch Optische Messtechnik: Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung*; Carl Hanser Verlag GmbH Co KG; 2017.
- [Zangl, 2018] Zangl, K.; Danzl, R.; Helml, F.; Prantl, M.: Highly accurate optical  $\mu$ CMM for Measurement of micro holes. 15th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Mailand, 2018.
- [Zangl, 2019] Zangl, K.; Danzl, R.; Muraus U.; Helml, F.; Prantl, M.: Vertical Focus Probing for High-Precision Optical Dimensional Metrology. *International Symposium of measurement technology and Intelligent Instruments (ISMTII)* Niigata, 2019.
- [25178, 2015] ISO 25178-606:2015: Geometrical product specification (GPS) Surface texture: Areal – Part 606: Nominal characteristics of non-contact (focus variation) instruments. ISO, Genf, 2015.
- [10360, 2013] ISO 10360-8:2013: Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) — Part 8: CMMs with optical distance sensors. ISO, Genf, 2013.

# METHODE ZUR BEWERTUNG DER FLEXIBILITÄT VON PROZESSEN

**Manfred Schmidt**

BMW Group, Instandhaltung Digitalisierung, Manfred.MS.Schmidt@bmwgroup.com

---

*Abstract: „Schneller, Sicherer, Genauer und Flexibler“ gelten als Herausforderungen und Trends der Fertigungsmesstechnik. Flexibilität wird dabei als ein strategisch wertvoller Erfolgsfaktor angesehen, mit dem gegenüber Konkurrenten Vorteile zu erzielen sind. Eine Herausforderung ist die Messung von Flexibilität. Es ist somit für Unternehmen nur schwer möglich, Flexibilität durch vorhandene Potenziale gezielt und strukturiert aufzubauen. Auch die Planung und Umsetzung geeigneter Maßnahmen zur Deckung des geforderten Flexibilitätsbedarfs gilt als sehr komplex. Die Bewertung und Beurteilung des vorhandenen Flexibilitätsgrads ist zwar vereinzelt möglich, allerdings hat sich in der wissenschaftlichen Literatur bisher noch kein einheitliches Vorgehen zur Operationalisierung der Flexibilität etabliert. Die Ursache hierfür liegt vor allem darin, dass Flexibilität ein komplexes, mehrdimensionales und schwer zu fassendes Konstrukt bildet. Hierbei ist es insbesondere eine Herausforderung, einheitliche Kennzahlen und Messgrößen zu identifizieren. Vor diesem Hintergrund wird im folgenden Artikel eine Methode vorgestellt, welche die Bewertung der Flexibilität unter Berücksichtigung der geltenden Rahmenbedingungen ermöglicht.*

**KEYWORDS:** FLEXIBILITÄT, BEWERTUNGSMETHODE, PROZESS, BEFÄHIGER, FLEXIBILITÄTSARTEN

---

## 1. FLEXIBILITÄT VON PROZESSEN IN PRODUZIERENDEN UNTERNEHMEN

Die wirtschaftliche Produktion in Deutschland ist zu einer anspruchsvollen Herausforderung geworden [Nyhuis, 2006]. Hierbei gelten die Attribute „Schneller, Sicherer, Genauer und Flexibler“ als wesentliche Trends der Fertigungsmesstechnik [Imkamp, 2016]. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen sich Produktionssysteme schnell an Veränderungen des wirtschaftlichen Umfeldes anpassen können. Der ständige Veränderungsdruck hat dazu geführt, dass sich heutige erfolgreiche Unternehmen mit einem Paradigmenwechsel konfrontiert sehen, der nun einen Wandel von der reinen Funktions- hin zur Prozessorientierung vorsieht [Weber, 2013]. Die Prozesse eines Unternehmens lassen sich in Management-, Geschäfts- und Unterstützungsprozesse unterteilen, wobei die Geschäfts- oder auch Kernprozesse im Unternehmen alle Tätigkeiten und ggf. Teilprozesse erfassen, die der Wertschöpfung dienen [Porter, 1989; Rüegg-Stürm, 2014]. Ideal konfigurierte Wertschöpfungsprozesse machen die Individualität, die Wirtschaftlichkeit und damit auch die Flexibilität einer Organisation aus [Porter, 1989]. Um innerhalb eines Produktionsprozesses ein angemessenes Maß an Flexibilität zu ermöglichen, muss dieser daher über Eigenschaften verfügen, welche die Flexibilität kennzeichnen. Diese Eigenschaften werden auch als Befähiger bezeichnet [Hernández Morales,

2003]. Es gilt das Maß an Flexibilität zu finden und zu installieren, welches die Prämissen der Wirtschaftlichkeit erfüllt und ein Gleichgewicht zwischen dem Produktionssystem und dem turbulenten Umfeld schafft [Westkämper, 2002; Zäh, 2006].

## 2. ENTWICKLUNG EINER FLEXIBILITÄTSMETHODEN

### 2.1 Ableitung der Methodenschritte

Vorherige Untersuchungen des Autors haben gezeigt, dass es derzeit kein Verfahren gibt, das eine allgemeine Bewertung der Flexibilität vollumfänglich zulässt. Die für den Betrachtungsraum relevanten Bewertungsverfahren bewerten die Flexibilität größtenteils mit Hilfe verschiedener Befähiger. Daraus kann die Ableitung getroffen werden, dass die neue Bewertungsmethode an dieser etablierten Richtung festhalten muss und von diesem Vorgehen nicht abweichen sollte. Als Ergebnis dieser Untersuchungen werden Mengen-, Produkt-, Personaleinsatz-, Arbeitsmittel- und Erweiterungsflexibilität als die entscheidenden Flexibilitätsarten für Prozesse in produzierenden Unternehmen identifiziert und definiert. [Schmidt, 2018]

Die untersuchten Bewertungsverfahren bedienen sich unterschiedlichster Befähigergrößen, nämlich genau der Größen, die der Ersteller des jeweiligen Verfahrens für den jeweiligen Betrachtungskontext als am wichtigsten erachtete. Einigkeit über relevante, allgemein anerkannte Befähiger und deren Einflüsse gibt es nicht. Daher müssen für eine neue Bewertungsmethode in einem ersten Schritt alle Befähiger, welche die Flexibilität von produzierenden Unternehmen beeinflussen, identifiziert werden. Daraufauf folgt es den Einfluss der identifizierten Befähiger zu ermitteln. Als letztes muss der Zusammenhang zwischen dem Erfüllungsgrad der einzelnen Befähiger und dessen Einfluss auf die Flexibilität untersucht werden. Aufgrund der gewählten Vorgehensweise, die relevanten Befähiger induktiv zu ermitteln, wurde der Methodenschritt „Ermittlung der Befähiger“ in die zwei Teilschritte „Ermittlung spezieller Befähiger“ und „Ermittlung allgemeiner Befähiger“ unterteilt. Die Schritte, die für eine allgemeine Flexibilitätsbewertung von Prozessen durchgeführt werden müssen, sind in Abb. 1 dargestellt.

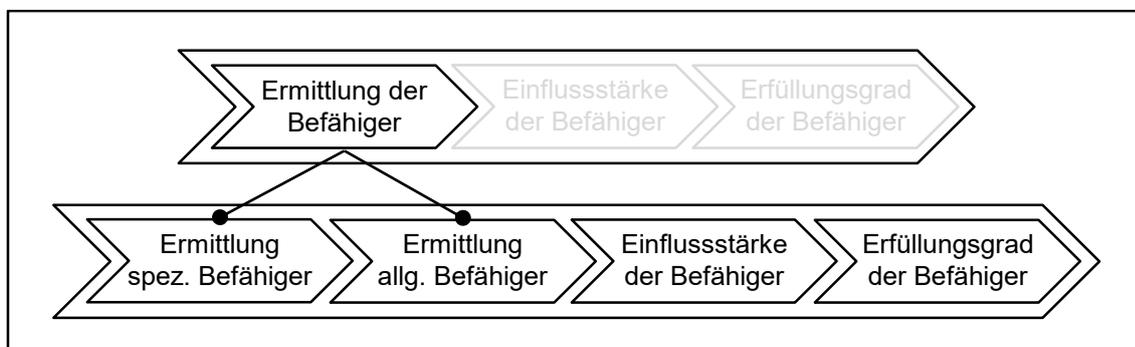


Abb. 1: Methodenschritte zur Flexibilitätsbewertung von Prozessen

Um die komplexen Zusammenhänge der Flexibilität erfassen, verstehen und somit die Methodenschritte durchführen zu können, bedarf es eines qualitativen Forschungsansatzes, da die zu untersuchenden Befähiger der Flexibilität nicht hinreichend erforscht sind, und somit ein besonderes Maß an Offenheit innerhalb der Vorgehensweise vonnöten ist [Lamnek & Krell 2016].

## 2.2 Methodisches Vorgehen

Für die empirische Untersuchung existieren verschiedene Verfahren wie etwa Dokumentenanalyse, Beobachtung, Fragebogen, Interviews, Fokusgruppendifkussionen. Die speziellen Befähiger eines Prozesses lassen sich durch teilstrukturierte Interviews ermitteln. Mit Hilfe von Experteninterviews lassen sich über noch unbekannte Felder Erkenntnisse sammeln und Probleme untersuchen. Als Basis für die Erstellung des Interviewleitfadens dient die Dokumentenanalyse und Prozessbeobachtung. Allgemeine Befähiger hingegen lassen sich mit Hilfe eines strukturierten Fragebogens ermitteln. Der Fragebogen sollte sich durch offene und geschlossene Fragen auszeichnen. Durch einen strukturierten Fragebogen mit geschlossenen Fragen lässt sich aus den bisher gewonnen Erkenntnissen die Einflussstärke der ermittelten Befähiger bestimmen. Um den Erfüllungsgrad, welchen ein Befähiger aufweist, bestimmen zu können, bedarf es mehrerer Teilschritte. Zu Beginn muss herausgefunden werden, welche Skalenniveaus zur Einteilung der Befähiger notwendig sind. Darauffolgend müssen die maximalen Niveausprungzahlen ermittelt und die jeweiligen Niveausprünge zugeordnet werden. Die Anpassungen der ermittelten Niveausprünge auf die jeweilige Flexibilitätsart stellt die Folgeaufgabe dar. Die letzte Herausforderung besteht darin, die Kriterien zur Erfüllung der Niveausprünge zu ermitteln und zu definieren. Aufgrund der Vielschichtigkeit der verschiedenen Teilschritte bietet sich die Fokusgruppendifkussion als Datenerhebungsinstrument an. Die einzelnen Methodenschritte und die dafür benutzten Werkzeuge zu Datenerhebung sind in Abb. 2 zusammenfassend dargestellt.

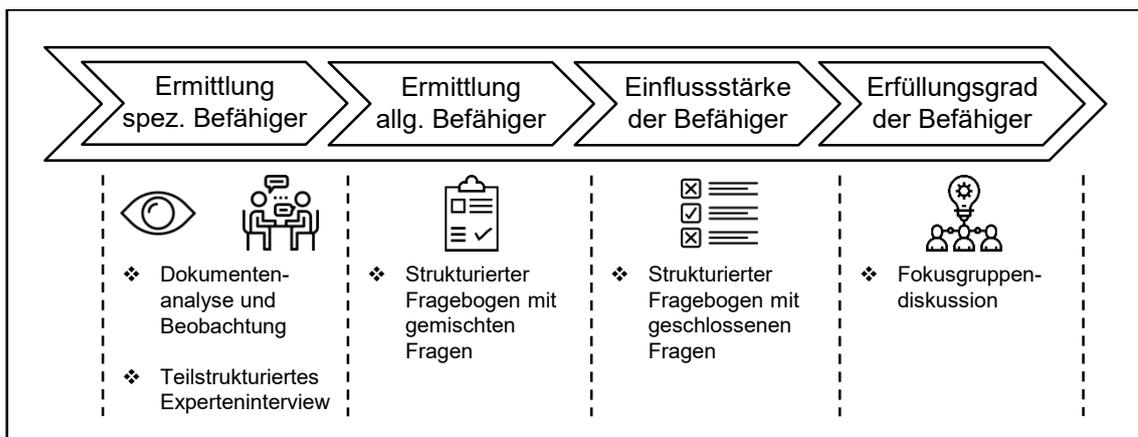


Abb. 2: Methode zur Flexibilitätsbewertung von Prozessen

## 2.3 Durchführung

In diesem Kapitel soll die Durchführung der eingangs entwickelten Methode erläutert und die daraus entstandenen Ergebnisse dargestellt werden. Hierfür werden die einzelnen Methodenschritte der Reihe nach mit den dazugehörigen Untersuchungsmethoden bearbeitet. Die neu entwickelte Methode soll mit Hilfe von Befähigern den Grundstein für eine allgemein gültige und zielorientierte Flexibilitätsbewertung von Prozessen in Produktionssystemen legen.

### 2.3.1. Ermittlung spezieller Befähiger

Als exemplarischer Beispielprozess für die „Ermittlung spezieller Befähiger“ wurde die Spalt- und Versatzmessung in der Montage im Automobilbau gewählt und Experteninterviews durchgeführt. An den Experteninterviews haben 20 Teilnehmer (acht Prozessexperten, sieben Messtechnikexperten und fünf Anwender) aus der Automobil- bzw. Fahrzeugindustrie teilgenommen. Die Interviews wurden transkribiert und mit der Software MAXQDA aufbereitet: Das gesamte Material wurde gesichtet, kodiert und daraus Kategorien abgeleitet, mit der Absicht daraus Befähiger zu bilden, ohne sich auf vorab verwendete Theoriekonzepte zu beziehen. Abgeleitet und definiert werden konnten die sechs Befähiger Automatisierung, Digitalisierung, Standardisierung, Mobilität, Kommunikation und Skalierung [Schmidt, 2018].

### 2.3.2. Ermittlung allgemeiner Befähiger

Die Bestätigung und Erweiterung der speziellen Befähiger, in Bezug auf die Gesamtheit aller Prozesse, erfolgt mit Hilfe einer Expertenbefragung. Hierzu wurden 20 Experten aus der Automobil- bzw. Fahrzeugindustrie unter Zuhilfenahme eines strukturierten Fragebogens mit gemischten Fragen befragt. Bei dieser Datenerhebung gelten Personen als Experten, welche in ihrem Arbeitsalltag ständig verschiedenste Prozesse analysieren, verändern und/oder optimieren, sogenannte Prozessspezialisten. Die mit Hilfe des ersten Methodenschritts identifizierten Befähiger wurden ausnahmslos von allen Experten als Befähiger bestätigt und somit als allgemeine, die Flexibilität eines industriellen Prozesses maßgeblich beeinflussende Faktoren, identifiziert. Zusätzlich wurden noch Normen/Richtlinien und Prozessreife als zwei weitere Befähiger genannt, erklärt und als maßgeblich erachtet [Schmidt, 2018].

### 2.3.3. Einflussstärke der Befähiger

Durch die ersten zwei Methodenschritte können alle relevanten Befähiger, welche im Allgemeinen die Flexibilität abbilden, identifiziert werden. Um anhand von identifizierten Befähigern Aussagen über die Flexibilität treffen zu können, ist es jedoch erforderlich zu wissen, mit welcher Stärke die einzelnen Befähiger die jeweilige Art der Flexibilität beeinflussen sowie Kenntnisse darüber zu haben, inwieweit dieser Einfluss die jeweilige Flexibilitätsart erhöht bzw. reduziert. Hierfür bietet sich als Methode der Informationsgewinnung ein strukturierter Fragebogen mit geschlossenen Fragen an. Für eine Allgemeingültigkeit wurde die

Befragung mit 47 Teilnehmern in verschiedenen produzierenden Unternehmen und deren Bereichen bzw. Technologien durchgeführt. Alle relevanten Flexibilitätsbefähiger wurden separat abgefragt und für ein einheitliches Verständnis unter jeder Frage erläutert. Der jeweilige Einfluss der acht identifizierten Befähiger in Bezug auf die fünf relevanten Flexibilitätsarten ist in Tab. 1 ausgewertet dargestellt.

		Befähiger							
		Automatisierung	Digitalisierung	Standardisierung	Mobilität	Kommunikation	Skalierung	Normen/Richtlinien	Prozessreife
<b>Mengenflexibilität</b>	Befähiger voll ausgeprägt	(++)	(++)	(++)	(++)	(+)	(+++)	(-)	(++)
	Befähiger nicht vorhanden	(--)	(--)	(--)	(--)	(-)	(---)	(+)	(--)
<b>Produktflexibilität</b>	Befähiger voll ausgeprägt	(--)	(++)	(++)	(++)	(+)	(++)	(-)	(++)
	Befähiger nicht vorhanden	(++)	(--)	(--)	(--)	(-)	(--)	(+)	(--)
<b>Personaleinsatzflexibilität</b>	Befähiger voll ausgeprägt	(--)	(++)	(++)	(+)	(+++)	(++)	(/)	(+)
	Befähiger nicht vorhanden	(++)	(--)	(--)	(-)	(---)	(--)	(/)	(-)
<b>Arbeitsmittelflexibilität</b>	Befähiger voll ausgeprägt	(/)	(+)	(++)	(++)	(+)	(+)	(-)	(+)
	Befähiger nicht vorhanden	(/)	(-)	(--)	(--)	(-)	(-)	(+)	(-)
<b>Routenflexibilität</b>	Befähiger voll ausgeprägt	(--)	(++)	(/)	(+++)	(+)	(+)	(/)	(+)
	Befähiger nicht vorhanden	(++)	(--)	(/)	(---)	(-)	(-)	(/)	(-)
		(---)	(--)	(-)	(/)	(+)	(++)	(+++)	
Legende:		reduziert stark	reduziert schwach	reduziert sehr schwach	keinen Einfluss	erhöht sehr schwach	erhöht schwach	erhöht stark	

Tab. 1: Einfluss der Befähiger auf die relevanten Flexibilitätsarten

### 2.3.4. Erfüllungsgrad der Befähiger

Für die Bestimmung des Erfüllungsgrades der einzelnen Befähiger wurde innerhalb der Automobilindustrie eine Fokusgruppendifkussion durchgeführt. Der Teilnehmerkreis der Fokusgruppendifkussion setzte sich aus vier Prozessspezialisten, zwei Experten aus dem Bereich des Lean-Management, zwei Qualitätsprüfingenieuren sowie zwei Messtechnikexperten zusammen. Anhand der Fokusgruppendifkussion konnte für die Befähiger Automatisierung und Digitalisierung das Skalenniveau auf einer Intervallskala festgelegt werden. Für Standardisierung, Mobilität und Kommunikation, Skalierung, Normen/Richtlinien sowie Prozessreife wurde eine Ordinalskala als am besten geeignet gesehen. Die Ermittlung der maximalen Niveausprungzahlen ist nach dem einheitlichen Meinungsbild der Fokusgruppenteilnehmer stark abhängig von den jeweiligen Befähigern. So müssen sich beispielsweise Automatisierung und Digitalisierung in 100 Niveausprunganzahlen unterteilen lassen. Auf Basis der Tab. 1 konnten die Niveausprungzahlen für die sechs weiteren Befähiger festgelegt werden. Für die Befähiger und die dazugehörigen Niveausprünge konnten mit Hilfe der Teilnehmer Synonyme definiert werden. Als Ausnahme für diese Einteilung kann der Befähiger Prozessreife gesehen werden. Bei ihm wird die Einteilung in Anlehnung an den Technologiereifegrad der DIN ISO 16290:2016, also eine neunstufige Einteilung durch die Fokusgruppe favorisiert [DIN ISO 16290: 2016]. Im weiteren Verlauf der Diskussion konnte eine Anpassung der Niveausprünge auf die jeweiligen Flexibilitätsarten vorgenommen werden. Als letztes galt es, noch mit Hilfe der Fokusgruppendifkussion Kriterien zu definieren, die erfüllt sein müssen, um die jeweiligen Niveausprünge der relevanten Befähiger erreichen zu können. So müssen zum einen Fragen oder Kriterien definiert werden, die zum Erreichen der Niveausprünge vonnöten sind, zum anderen müssen Antwortmöglichkeiten vorgegeben und deren Bedeutung für den Niveausprung des jeweiligen Befähigers festgelegt werden. Die zusammengetragenen und bestätigten Ergebnisse aus der Fokusgruppendifkussion für die ersten beiden Teilaufgaben sind in Tab. 2 zusammengeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse für die einzelnen Befähiger sind in Tab. 3 beispielhaft für alle Flexibilitätsarten zusammengetragen.

Befähiger	Skalenniveau	max. Niveausprunganzahl	Niveausprünge
Automatisierung	Intervallskala	100	1 bis 100
Digitalisierung	Intervallskala	100	1 bis 100
Standardisierung	Ordinalskala	5	sehr niedrig, niedrig, durchschnittlich, hoch, sehr hoch
Mobilität	Ordinalskala	7	sehr niedrig, niedrig, leicht unterdurchschnittlich, durchschnittlich, leicht überdurchschnittlich, hoch, sehr hoch
Kommunikation	Ordinalskala	7	sehr niedrig, niedrig, leicht unterdurchschnittlich, durchschnittlich, leicht überdurchschnittlich, hoch, sehr hoch
Skalierung	Ordinalskala	7	sehr niedrig, niedrig, leicht unterdurchschnittlich, durchschnittlich, leicht überdurchschnittlich, hoch, sehr hoch
Normen/Richtlinien	Ordinalskala	3	niedrig, durchschnittlich, hoch
Prozessreife	Ordinalskala	9	PRG 1 bis PRG 9

Tab. 2: Bestimmung der Skaleneinteilung

Befähiger	Frage/Kriterium	Antwortmöglichkeit inkl. Codierung	Bedeutung für die Niveausprünge
Automatisierung	Verhältnis zwischen der Gesamtanzahl der Prozessschritte zur Anzahl der automatisierten Prozessschritte.	$0 \leq x \leq 100$	$0 \leq x < 20 \rightarrow$ sehr niedrig, $20 \leq x < 40 \rightarrow$ niedrig, $40 \leq x < 60 \rightarrow$ durchschnittlich, $60 \leq x < 80 \rightarrow$ hoch, $80 \leq x \leq 100 \rightarrow$ sehr hoch
Digitalisierung	Verhältnis zwischen der Gesamtanzahl der zur Verfügung stehenden Informationen zur Anzahl der zur Verfügung stehenden digitalen Informationen.	$0 \leq x \leq 100$	$0 \leq x < 20 \rightarrow$ sehr niedrig, $20 \leq x < 40 \rightarrow$ niedrig, $40 \leq x < 60 \rightarrow$ durchschnittlich, $60 \leq x < 80 \rightarrow$ hoch, $80 \leq x \leq 100 \rightarrow$ sehr hoch
Standardisierung	Ist der Prozess im Produktionssystem mehrfach vorhanden?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	$0 \rightarrow$ sehr niedrig, $1$ bis $2 \rightarrow$ niedrig, $3$ bis $4 \rightarrow$ durchschnittlich, $5$ bis $6 \rightarrow$ hoch, $7 \rightarrow$ sehr hoch
	Sind die Medienanschlüsse des Prozesses genormt? (Falls keine Medienanschlüsse vorhanden sind bitte mit „ja“ Antworten)	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
	Sind die Elemente innerhalb des Prozesses modular austauschbar?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
	Sind die Vorgehen und Abläufe des Prozesses gleich oder ähnlich zu anderen Prozessen?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
	Ist der Aufbau der Dokumentation des Prozesses gleich oder ähnlich zu anderen Prozessen?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
	Sind die Qualitätsstandards des Prozesses gleich oder ähnlich zu anderen Prozessen?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
	Werden innerhalb des Prozesses besondere Hilfsmittel verwendet?	Ja $\rightarrow$ 0, Nein $\rightarrow$ 1	
Mobilität	Welches Volumen nimmt der Prozess ein (Länge * Breite * Höhe in m <sup>3</sup> )?	$> 1 \text{ m}^3 \rightarrow 0,$ $\leq 1 \text{ m}^3 \rightarrow 1$	$0 \rightarrow$ sehr niedrig, $1 \rightarrow$ niedrig, $2 \rightarrow$ leicht unterdurchschnittlich, $3 \rightarrow$ durchschnittlich, $4 \rightarrow$ leicht überdurchschnittlich, $5 \rightarrow$ hoch, $6 \rightarrow$ sehr hoch
	Welches Gewicht nimmt der Prozess ein (in kg)?	$> 100 \text{ kg} \rightarrow 0,$ $\leq 100 \text{ kg} \rightarrow 1$	
	Ist der Prozess fest/starr mit seiner Umgebung verbunden?	Ja $\rightarrow$ 0, Nein $\rightarrow$ 1	
	Ist der Prozess abhängig von Medien?	Ja $\rightarrow$ 0, Nein $\rightarrow$ 1	
	Sind die Bauteile, welche im Prozess Verwendung finden, größtenteils mit einer Kranöse und/oder Gabelstaplerlaschen versehen? (Falls das Gewicht der Prozessbauteile $\leq 5 \text{ kg}$ ist bitte mit „ja“ Antworten)	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
	Besitzen eines oder mehrere Bauteile, welche im Prozess Verwendung finden, eine feste Oberfläche und sind in sich stabil? (Falls das Gewicht der Prozessbauteile $\leq 5 \text{ kg}$ ist bitte mit „ja“ Antworten)	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
Kommunikation	Wie viel unterschiedlicher Informationsaustausch zwischen Mensch und Mensch findet statt?	$0$ bis $1 \rightarrow 0,$ $2$ bis $3 \rightarrow 2,$ $> 3 \rightarrow 4$	$0 \rightarrow$ sehr niedrig, $1 \rightarrow$ niedrig, $2 \rightarrow$ leicht unterdurchschnittlich, $3 \rightarrow$ durchschnittlich, $4 \rightarrow$ leicht überdurchschnittlich, $5 \rightarrow$ hoch, $6 \rightarrow$ sehr hoch
	Wie viel unterschiedlicher Informationsaustausch zwischen Mensch und Maschine findet statt?	$0$ bis $2 \rightarrow 0,$ $> 2 \rightarrow 1$	
	Wie viel unterschiedlicher Informationsaustausch zwischen Maschine und Maschine findet statt?	$0$ bis $1 \rightarrow 0,$ $> 1 \rightarrow 1$	
Skalierung	Können innerhalb des Prozesses verschiedene Arbeitszeitmodelle angewandt werden?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	$0 \rightarrow$ sehr niedrig, $1 \rightarrow$ niedrig, $2 \rightarrow$ leicht unterdurchschnittlich, $3 \rightarrow$ durchschnittlich, $4 \rightarrow$ leicht überdurchschnittlich, $5 \rightarrow$ hoch, $6 \rightarrow$ sehr hoch
	Sind der Prozess oder Prozesselemente modular aufgebaut?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
	Ist der Prozess anhängig von weiteren Prozessen?	Ja $\rightarrow$ 0, Nein $\rightarrow$ 1	
	Lässt sich der Prozess in Bezug auf die Durchführungszeit erweitern und/oder reduzieren?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
	Lässt sich der Prozess in Bezug auf die genutzte Fläche bzw. räumlich erweitern und/oder reduzieren?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
	Lässt sich der Prozess in Bezug auf den Durchsatz erweitern und/oder reduzieren?	Ja $\rightarrow$ 1, Nein $\rightarrow$ 0	
Normen/Richtlinien	Wie viele Normen und/oder Richtlinien sind von dem Prozess zu erfüllen?	$0$ bis $\infty$	$0 - 10 \rightarrow$ niedrig, $11 - 20 \rightarrow$ durchschnittlich, $> 20 \rightarrow$ hoch

Tab. 3: Einteilung der Automatisierung, Digitalisierung, Standardisierung, Mobilität, Kommunikation, Skalierung und Normen/Richtlinien

## 2.4 Vereinfachte Flexibilitätsbewertung

Aufgrund der entwickelten Bewertungsmethode besteht die Möglichkeit, ein vereinfachtes Vorgehen zur Bestimmung der Flexibilität von Prozessen in produzierenden Unternehmen abzuleiten. Hierfür muss der Anwender ausschließlich Kenntnis über den Erfüllungsgrad der verschiedenen Befähiger besitzen. Innerhalb des neuen Verfahrens kann der Anwender durch das systematische Beantworten von Fragen bzw. das Festlegen von Kriterien auf den Erfüllungsgrad schließen. Sind die Prozesskenntnisse gering oder unbekannt, bietet sich zur Beantwortung dieser Fragen oder Festlegung der Kriterien für den Anwender eine Dokumentenanalyse sowie die Beobachtung des Prozesses an. Das vereinfachte Vorgehen zur Bestimmung der Flexibilität von Prozessen in produzierenden Unternehmen ist mit den dazugehörigen Werkzeugen in Abb. 3 aufgezeigt.

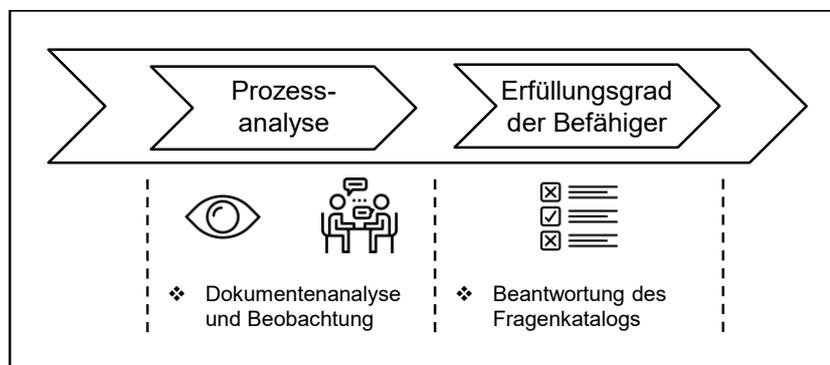


Abb. 3: Vereinfachte Flexibilitätsbewertung von Prozessen

## 3. SCHLUSSBETRACHTUNG

Die vierte industrielle Revolution kennzeichnet sich vor allem durch das Erlangen großer Flexibilität in der Produktion aus. Die Kernaufgabe hierfür liegt darin, verschiedenste Produktionssysteme auf neue Produkte und Produktvarianten bei gleichbleibenden Kosten einzustellen. Die Vision geht soweit, dass selbst kleine oder kleinste Losgrößen ohne eine Kostenexplosion ermöglicht werden. Ein wesentlicher Teil dazu wird durch die neue Bewertungsmethode beigetragen. So können beispielsweise auch KMUs die Flexibilität ihrer Produktionssysteme mit der neu entwickelten Methode leicht, kosteneffizient und intuitiv bewerten, ohne großen Unternehmen gegenüber einen Nachteil zu besitzen. Hierfür muss der Anwender der vereinfachten Flexibilitätsmethode ausschließlich Kenntnis über den Erfüllungsgrad der verschiedenen Befähiger besitzen. Durch das systematische Beantworten der Fragen bzw. das Festlegen von Kriterien kann auf den Erfüllungsgrad geschlossen und die Flexibilität direkt bestimmt werden. Um die Verbreitung der neuen Bewertungsmethode auf neue Branchen und Technologien voranzutreiben, bedarf es weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen. Es müsste untersucht werden, ob zwischen der einzelnen Befähigern Abhängigkeiten bestehen. Gegebenenfalls könnten so Aussagen getroffen werden, dass die Veränderung eines Befähigers immer eine oder mehrere Veränderungen von weiteren Befähigern zur Folge hat. Eventuell kann

es von Nöten sein, den Fragen- bzw. Kriterienkatalog für das Erreichen des Niveausprungs des jeweiligen Befähigers und seine Grenzen unternehmensspezifisch anzupassen.

#### 4. QUELLEN

- [Hernández Morales, 2003] Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. In: VDI Verlag GmbH [Hrsg.]: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft, Bd. 149. VDI-Verl., Düsseldorf, 2003.
- [Imkamp, 2016] Imkamp, D.; Berthold, J.; Heizmann, M.; Kniel, K.; Manske, E.; Peterek, M.; Schmitt, R.; Seidler, J.; Sommer, K.-D.: Herausforderungen und Trends in der Fertigungsmesstechnik – Industrie 4.0. In: tm – Technisches Messen, 83: S. 417-429, 2016.
- [Lamnek, 2016] Lamnek, S.; Krell, C.: Qualitative Sozialforschung. Beltz Verlag, Weinheim [u.a.], 2016.
- [Nyhuis, 2006] Nyhuis, P.; Kolakowski, M.; Heger, C. L. H.: Evaluation of Factory Transformability – a Systematic Approach. In: Production Engineering. Research and Development, 13 (1): S. 147–152, 2006.
- [Porter, 1989] Porter, M. E.: Wettbewerbsvorteile (Competitive Advantage) – Spitzenleistungen erreichen und behaupten. Campus-Verlag, Frankfurt am Main, 1989.
- [Rüegg-Stürm, 2014] Rüegg-Stürm, J.; Grand, M.: Das St. Galler Management-Modell. Haupt, Bern, 2014.
- [Schmidt, 2018] Schmidt, M.: Flexibilitätsbefähiger von Prozessen in produzierenden Unternehmen. In: Riedel, R. & Bullinger-Hoffmann, A. C. [Hrsg.]: Smarte Produktion und digitale Vernetzung - VPP2018. Institut für Print- und Medientechnik der TU Chemnitz, Chemnitz, 2018.
- [Weber, 2013] Weber, P. H.: Von der funktions- zur prozessorientierten Organisation: Mit Prozessmanagement zum Erfolg. Diplomatica Verlag, Hamburg, 2013.
- [Westkämper, 2002] Westkämper, E.: Wandlungsfähige Unternehmensstruktur für die variantenreiche Serienproduktion: Forschungsstrategien, Ergebnisse, Anwendungen. In: Westkämper, E. [Hrsg.]: Wandlungsfähigkeit – Herausforderung und Lösung im turbulenten Wettbewerb. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2002.
- [Zäh, 2006] Zäh, F. M.; Bredow, M.; Möller, N.; Müssig, B.: Methoden zur Bewertung von Flexibilität in der Produktion. In: Industrie Management, 22 (4): S. 29–32, 2006.



# ISO GPS-SYSTEM ALS PROZESSÜBERGREIFENDE SPRACHE IM PRODUKTENTSTEHUNGSPROZESS

**Juliane Schuldt, Robert Hofmann, Sophie Gröger**

TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Fertigungsmesstechnik,  
juliane.schuldt@mb.tu-chemnitz.de

---

*Abstract: Seit mehr als 25 Jahren wird mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) das Ziel verfolgt, ein einheitliches Konzept zur geometrischen Spezifikation aufzubauen, mit dem die an ein Produkt gestellten funktionalen geometrischen Anforderungen eindeutig, vollständig und nonverbal beschrieben werden können. Um das System kennenzulernen bzw. die Anwendung zu erlernen, ist es üblich, dass ausgewählte Mitarbeiter, meist Konstrukteure oder Entwickler, mehrtägige Schulungen erhalten. Dabei wird ein Großteil der derzeit 150 existierenden Einzelnormen überblicksartig vorgestellt, die umfangreiche Symbolsprache erläutert und an fiktiven Beispielen angewendet. Zurück in der Praxis, ist es für die geschulten Fachexperten nahezu unmöglich das GPS-System anzuwenden, da es weitreichende Einschnitte in alle Produktentstehungsprozesse inkl. der Schnittstellen unter Berücksichtigung der internen und externen Kunden-Lieferanten-Beziehungen hat. Das vorliegende Paper beschreibt den Ansatz, das GPS-System als eine eigene Sprache zu verstehen und mit Hilfe von agilen Methoden prozessübergreifend in den gesamten Produktenstehungsprozess zu integrieren. Gepaart mit einem Reifegradmodell, soll vor allem KMUs dadurch ermöglicht werden, das GPS-System iterativ und inkrementell anzuwenden und sich zu einer lernenden Organisation zu entwickeln.*

**KEYWORDS:** GEOMETRISCHE PRODUKTSPEZIFIKATION, GPS-SYSTEM, GPS-NORMEN, PROZESSE, PRODUKTENTSTEHUNG, AUSBILDUNG, REIFEGRADMODELL

---

## 1. AUSGANGSSITUATION

### 1.1 Geometrische Produktspezifikation

Am Anfang stehen die Anforderungen und am Ende? Jedes Projekt, jedes Produkt und jede Dienstleistung basieren auf Anforderungen. Diese werden vom Auftraggeber formuliert und vom Auftragnehmer umgesetzt. Klingt einfach und schlüssig, jedoch liegt hier das Hauptproblem: Sprechen alle Beteiligten die gleiche Sprache?

Mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) wird seit über 25 Jahren das Ziel verfolgt, ein einheitliches Konzept zur geometrischen Spezifikation aufzubauen, mit dem die an ein Produkt gestellten funktionalen geometrischen Anforderungen eindeutig, vollständig und nonverbal beschrieben werden können [Gröger, 2013]. Das heißt, das GPS-Normensystem ist heute eine interdisziplinäre Sprache im gesamten Produktentstehungsprozess.

Form- und Lagetolerierung werden neben den traditionellen Plus- und Minustoleranzen bereits seit vielen Jahren in der Lehre und Praxis angewendet. [Henzold, 2011], [Schütte, 2017] In den Jahren 2010 und 2011 erfuhr das GPS-System eine starke normative regelbasierte Weiterentwicklung indem 33 neue oder überarbeitete Normen veröffentlicht wurden. Heute existieren knapp 150 Einzelstandards, welche aufgrund neuer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ständig überarbeitet werden und somit zunehmend komplexer werden. Unzählige Kurzzeichen, Modifikationssymbole und Regeln sind in relativ kurzer Zeit entstanden, die sich auf den ersten Blick Ungeschulten nicht erschließen und zu Akzeptanzschwierigkeiten führen. Insgesamt ist hier eine Norm-Komplexität entstanden, die durch die Fachexperten in den unterschiedlichen Unternehmensbereichen nicht mehr bewältigt werden kann.

Das ISO-GPS-System behandelt im Wesentlichen neun geometrische Merkmale, welche nach ISO 14638 in einer Matrix dargestellt werden können. Des Weiteren wurde folgende Normenhierarchie festgelegt (vgl. Abb. 1). [14638, 2015]

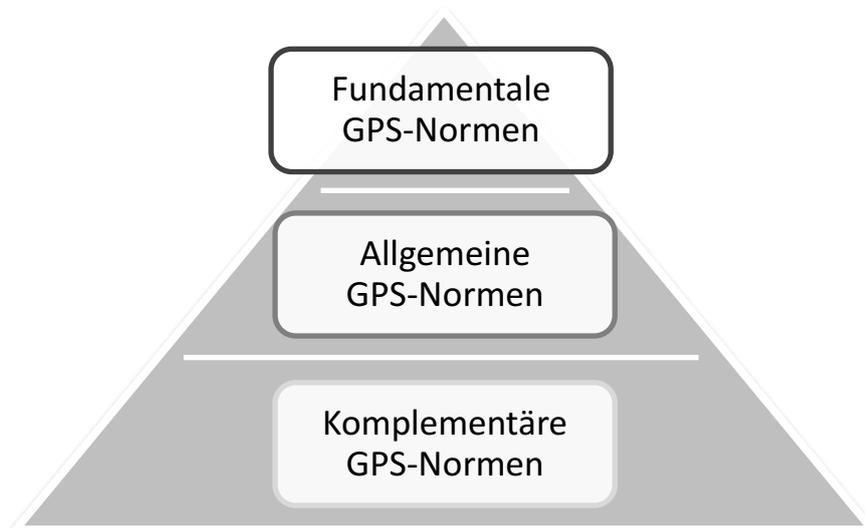


Abb. 1: Normenhierarchie im GPS-System [14638, 2015]

Die fundamentalen Normen enthalten Regeln und Grundsätze, die für alle Kategorien und alle Kettenglieder in der Matrix gelten. Die allgemeinen GPS-Normen beziehen sich auf die geometrischen Eigenschaften. Und die komplementären GPS-Normen enthalten weitere Regeln und Definitionen, die sich auf spezifische Herstellungsprozesse oder spezifische Maschinenelemente beziehen. Die Normen eines höheren Niveaus, z. B. die fundamentalen Normen, gelten auch in den nachfolgenden untergeordneten Niveaus, außer es gibt spezielle Regeln in den Normen eines niedrigeren Niveaus, die diese Regeln außer Kraft setzen. [Gröger, 2013]

Des Weiteren wurden 13 Grundsätze als Voraussetzungen zur Interpretation von Zeichnungen sowie zur Reduzierung der Mehrdeutigkeiten festgelegt [8015, 2011].

Bis heute ist in den meisten Unternehmen nicht ausreichend bekannt, was hinter dem GPS-Normensystem wirklich steckt und welche Chancen eine betriebliche Einführung mit sich bringt. Nur eine konsequente Anwendung des GPS-Systems kann durch eindeutige Spezifikationen finanzielle Einsparungen erreichen und durch die Anwendung von Toleranzzonen die nötige Genauigkeit der Produkte sichergestellt werden. [Morse, 2018]

Nachfolgend werden Kriterien vorgestellt, wie das GPS-System reifegradgestützt unter Anwendung agiler Methoden in den Produktentstehungsprozess integriert werden kann. Vor allem kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sollen so befähigt werden, das GPS-Normensystem nutzenbringend anzuwenden und sich selbst zu lernenden Organisationen weiterzuentwickeln.

## 1.2 Produktentstehungsprozess

Ein Produkt durchläuft während seines Lebenszyklus verschiedene Lebensphasen. In der Literatur wird der Produktentstehungsprozess unterschiedlich abgegrenzt, häufig aber in Produktplanung und -entwicklung unterteilt [Pahl/Beitz, 2013]. Für eine branchenneutrale prozessübergreifende GPS-Integration ist es aber zielführend, den Produktentstehungsprozess von der Produktplanung über die -entwicklung, Prozessplanung/ -entwicklung, Beschaffung und Fertigung inkl. aller Schnittstellen zu betrachten. Dabei können die Produktlebenszyklusphasen und Aktivitätsmatrizen nach DIN EN ISO 15226:2017 sowie DIN EN ISO 9004:2018 genutzt werden. Abb. 2 zeigt schematisch den notwendigen Produktentstehungsprozesses. Dabei ist es für die GPS-Integration wichtig, jede Phase mit Aktivitäten zu untergliedern und prozessorientiert mit In- und Output zu versehen.

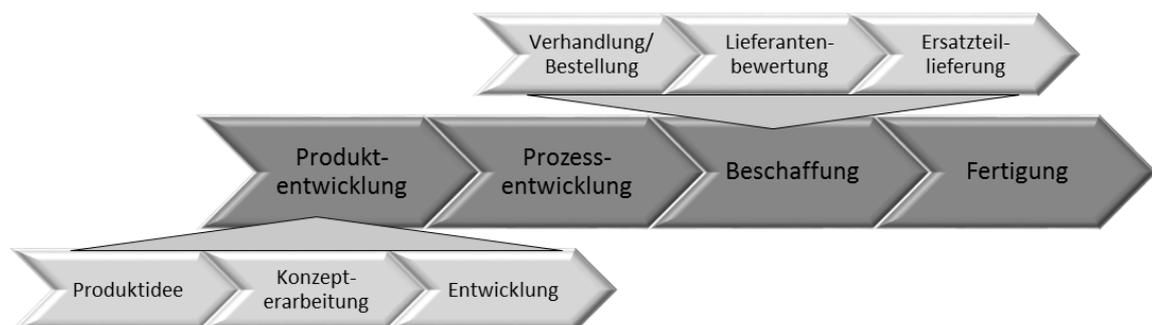


Abb. 2: Auszug Phasen Produktlebenszyklus [nach DIN EN ISO 15226, 9004]

### 1.3 Anwendung agiler Methoden in selbstlernenden Organisationen

Eine (selbst)lernende Organisation ist fähig, sich an externe und interne Einflüsse anzupassen und mit Veränderungen erfolgreich umzugehen. Sie zeichnet sich durch Flexibilität und eine hohe Lernbereitschaft aus. Eine gemeinsame Vision, Teamarbeit sowie systemisches Denken stehen dabei im Vordergrund. [Senge, 2017]

Agile Methoden finden durch das Management komplexer Projekte sowie im Rahmen des Changemanagements zunehmend Anwendung in der unternehmerischen Praxis. Ganz entscheidend dabei sind das Beschreiben eines planmäßigen Vorgehens, um Ziele zu erreichen, Bereitstellen von Teillösungen, um zeitnah mit geringem Aufwand Feedback zu bekommen und den „value“, also den Wert in den Mittelpunkt zu stellen. [Senge, 2017]

Durch die Anwendung agiler Methoden erfolgt nicht nur eine initiale Entwicklung, sondern auch eine konstante Weiterentwicklung, was für die praxisbezogene Integration des GPS-System eine ideale Grundlage bildet.

Da KMU lt. dem Institut für Mittelstandsforschung 99,5% aller Unternehmen in Deutschland ausmachen, müssen die Konzepte zur GPS-Integration vordergründig KMU-spezifisch entwickelt werden. Nur dadurch kann eine flächendeckende Verbreitung und Anwendung des GPS-System sichergestellt werden. KMU bieten dabei den Vorteil von überschaubaren Organisationen mit informellen Strukturen, weisen meist einen geringen Formalisierungsgrad auf sowie eine hohe Flexibilität bei vergleichsweise geringem Planungsaufwand.

## 2. ANSATZ ZUR INTEGRATION DES GPS-SYSTEMS IN UNTERNEHMEN

Die Integration des GPS-Systems im Unternehmen ist mit der Einführung eines Qualitätsmanagementsystems, EFQM-Modells und/oder PPS-Systems vergleichbar und setzt das systemische Denken, welches das Unternehmen als Ganzes betrachtet voraus. Des Weiteren ist die Einführung ein Veränderungsprozess und erfordert heutzutage agile Strukturen. Nur mit klaren Visionen, gemeinsamen Zielen, Orientierung an den Interessierten Parteien, Vertrauen, Teamgeist und Prozessorientierung kann die konsequente Anwendung des GPS-Systems langfristig erfolgreich sein. Das heißt, es bedarf einer gründlichen Planung, konsequenten Umsetzung, regelmäßigen Prüfung und Bewertung sowie fortlaufenden Verbesserung.

Auf Basis von umfangreichen Recherchen zu GPS-Ausbildungen [Henzold, 2011], [Schütte, 2017], Anwendung von Projektmanagementmethoden [Kusay-Merkle, 2018], [Senge, 2017], Best-Practice-Einführungsstrategien von Managementsystemen, Industrie-4.0-Konzepten [VDMA, 2019], ARIS-Konzepten, praxisorientierten Werkerschulungen usw. wurden für eine effiziente betriebliche GPS-Integration folgende Voraussetzungen formuliert:

- Ausbildungsmodell, welches in mehrere Erfahrungsstufen untergliedert ist,
- Inhalte und Anforderungen des GPS-Systems müssen fachgruppenspezifisch geclustert sein,
- Selbstbewertungsmodell auf Reifegradbasis, welches die Key-Performance-Indikatoren (KPIs) mit einer Bewertungsskala beinhaltet.

In Abb. 3 werden diese drei formulierten Voraussetzungen zusammengefügt dargestellt, das heißt, für eine reifegradgestützte GPS-Integration ist es notwendig, das Ausbildungsmodell mit den GPS-Anforderungen KPI-bezogen zu verbinden.

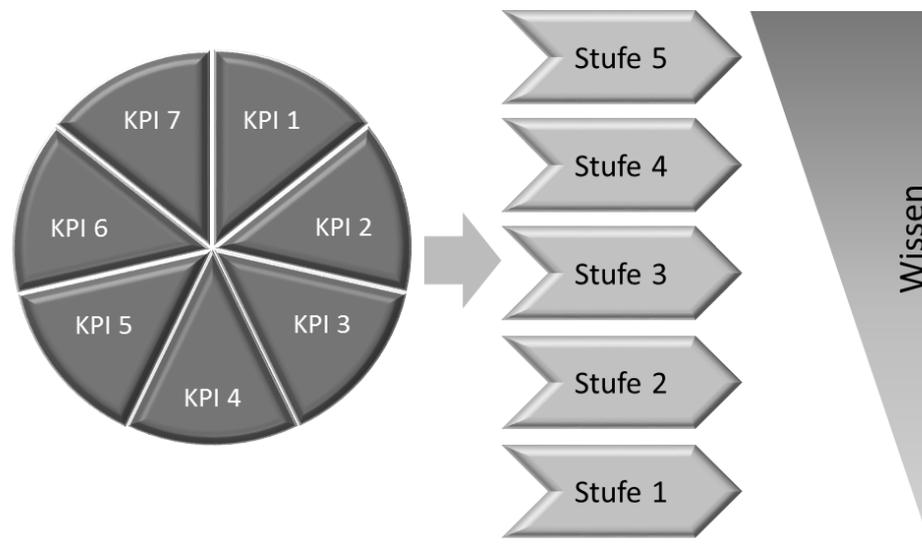


Abb. 3: Ansatz zur GPS-Integration im Unternehmen (in Anlehnung an [VDMA, 2019])

Im Kapitel 3 werden diese möglichen Verbindungsstrukturen beispielhaft an einem kritischen Erfolgsfaktor KPI, welcher z. B. die Bezugselemente beinhaltet, vorgestellt.

### 3. KONZEPT ZUR GPS-INTEGRATION MITTELS REIFEGRAD-UNTERSTÜTZUNG

Grundlage der GPS-Integration mittels Selbstbewertung sind die zuvor definierten kritischen Erfolgsfaktoren, welche als KPIs des GPS-Systems ausgedrückt werden. Diese können z. B. Normenhierarchie und Grundsätze, Bezugselemente, Allgmeintoleranzen, Profiltolerierung, Positionstolerierung, Operatoren usw. sein.

Für jedes KPI werden fachgruppenspezifische Inhalte festgelegt. Diese werden in einem gestuften Modell messbar gemacht. Dabei beinhaltet jede Stufe festgelegte Mindestanforderungen, ohne deren Erfüllung eine Stufe als nicht erreicht gilt.

Aus diesen KPIs wird ein Ausbildungsmodell zur Messung der GPS-Integration abgeleitet. Dabei soll das Wissen vom Einsteiger bis zum Master/Coach wachsen. Zur Bewertung der einzelnen Stufen wird sich an den Taxonomiestufen (Wissen, Verstehen, Anwenden, Umsetzen, Synthese) nach Bloom [Bloom, 2001] orientiert. Beispielhaft ist dies in Abb. 4 dargestellt.

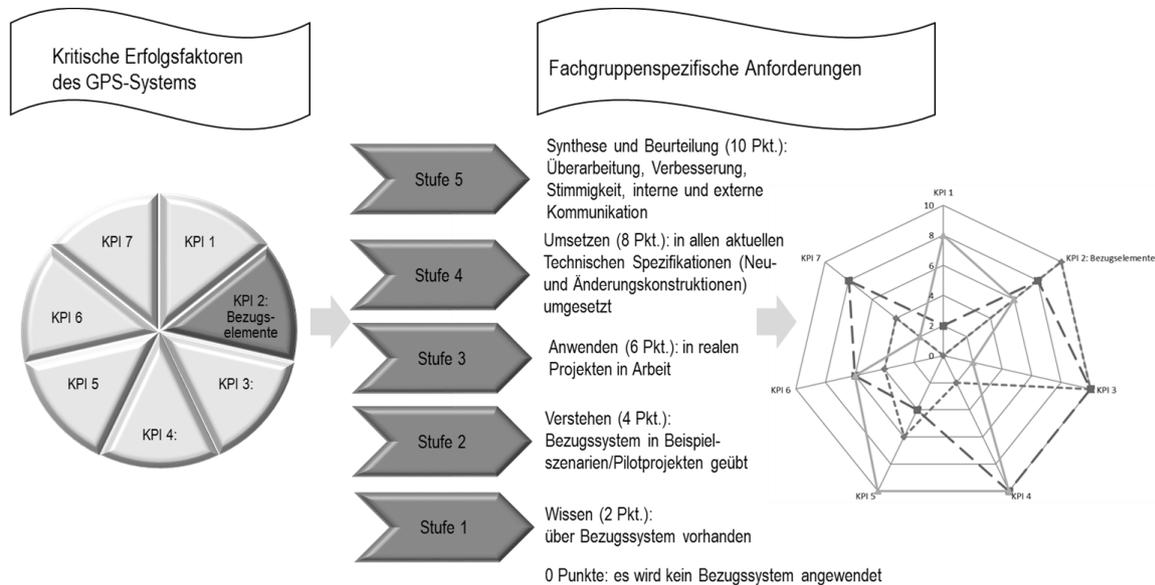


Abb. 4: Beispielhafte GPS-Integration mit Reifegradunterstützung

Aufbauend auf dem Ausbildungsmodell sowie den geclusterten GPS-Inhalten ist es anschließend möglich, das GPS-System iterativ und inkrementell im Unternehmen einzuführen. In Anlehnung an das agile Projektmanagement [Kusay-Merkle, 2018], können dabei folgende Schritte durchlaufen werden:

**Schritt 1:** Es sind alle am jeweiligen Produktentstehungsprozess Beteiligte und Betroffene sowie jeder, der ein berechtigtes Interesse an dem Produkt und/oder Prozess hat, zu identifizieren. Nach der Analyse der interessierten Parteien muss Klarheit über Einfluss der Betroffenheit geschaffen und Kommunikationsregeln (partizipativ, diskursiv, repressiv oder restriktiv) aufgestellt werden. Durch das klare Bekenntnis des TOP-Managements mit strategischen Zielen werden die Mitarbeiter auf die GPS-Integration vorbereitet und über die Voraussetzungen, Grundlagen, Anwendungsgebiete usw. informiert, so dass jeder die 1. Erfahrungsstufe „Einsteiger“ erreicht.

**Schritt 2:** Aus dieser ersten, anschaulichen und verständlichen Vision und Basisschulung lassen sich die weiteren Vorgehensweisen der GPS-Einführung ableiten und es wird sichtbar, welche Ressourcen dafür benötigt werden.

Mittels der KPIs werden die Beteiligten in Erfahrungsstufen eingeteilt und anwenderspezifisch für die Erreichung der nächsten Stufe geschult sowie ggf. Defizite der vorhergehenden Stufe aufgeholt.

**Schritt 3:** Es werden Teams zusammengestellt, konkrete Anforderungen formuliert, Beispielprojekte ausgewählt und Arbeitspakete geschnürt.

Anschließend werden Prioritäten zu Elementen und Funktionen, Zufriedenheit der Anwender, Machbarkeit usw. vergeben.

Schritt 4: In einer ersten Besprechung (Planungsphase) werden die Rahmenbedingungen (Meetings, Ergebnisse, Teilziele, Meilensteine, Besonderheiten usw.) abgesteckt sowie Spielregeln und die Struktur für das weitere Vorgehen festgelegt.

Schritt 5: Die einzelnen Aufgaben (Tickets) werden zu Arbeits- und Maßnahmenplänen (Sprints) zusammengefasst und entsprechend des GPS-Integrations-Guides verteilt.

Schritt 6: Die Teammitglieder arbeiten an ihren Tickets und es werden Teillösungen gemäß des Aufgabenplanes entwickelt.

Schritt 7: Während der täglichen, 15-minütigen Aus- und Bewertung werden die erledigten Aufgaben vorgestellt, Hindernisse diskutiert und beseitigt sowie ggf. neue Tickets erstellt. Mit Hilfe des Reifegradmodells werden die verschiedenen Ausbildungsstufen und damit auch die GPS-Integration bewertet.

Schritt 8: Jeder Sprint wird durch einen Rückblick abgeschlossen. Das Team stellt die Ergebnisse vor, diskutiert die Zusammenarbeit, leitet Best Practice und Verbesserungspotenziale ab. Die Erkenntnisse fließen sowohl in den nächsten Sprint, als auch in das Reifegradmodell ein und unterstützen somit die Entwicklung zur selbstlernenden Organisation nachhaltig

Schritt 9: Der nächste Sprint wird geplant, das heißt der „Loop“ (Schritt 4 bis Schritt 8) wird wiederholt.

In Abb. 5 auf der Folgeseite sind die beschriebenen Schritte grafisch schematisch dargestellt.

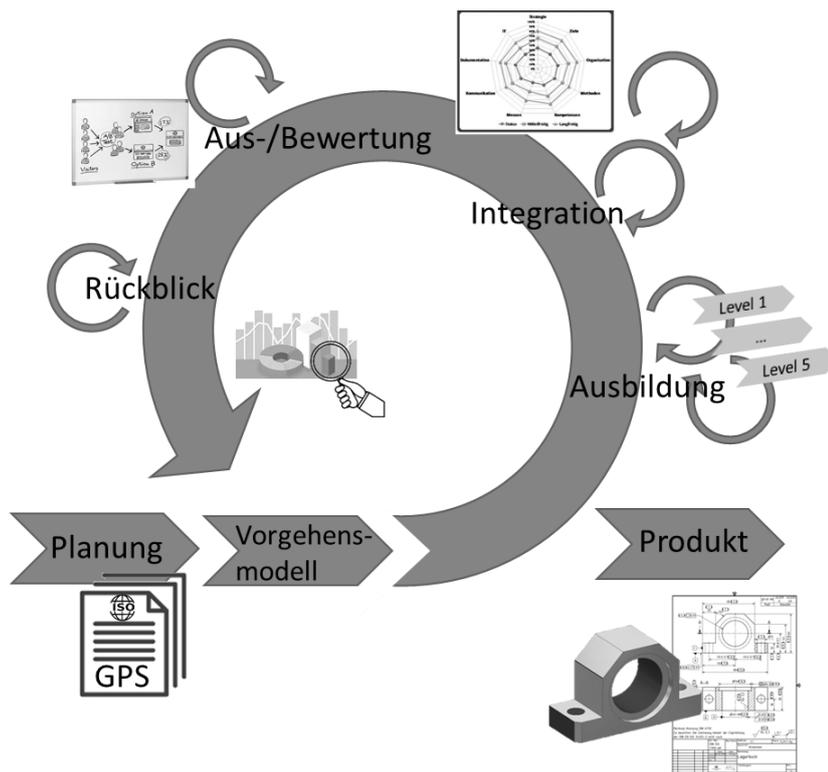


Abb. 5: Zusammenfassung GPS-Integration mittels agiler Vorgehensweise

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Grundsätzlich existieren in jedem Unternehmen etablierte Prozesse und Dokumente, die durch die Integration von GPS maßgeblich verändert werden. Da die Geometrische Produktspezifikation ein interdisziplinäres System ist, das als eine komplexe und hoch entwickelte geometrische Sprache zwischen Experten aus allen Unternehmensbereichen agiert, müssen auch alle diese Unternehmensbereiche, inklusive der Kunden-/Lieferantenbeziehung, bei der Integration und Anwendung des GPS-Systems aktiv beteiligt werden. Der beschriebene Ansatz zur inkrementellen und iterativen Einführung des GPS-Systems soll dem gerecht werden. Dazu ist es notwendig das GPS-System fachexpertenspezifisch zu clustern, den Produktentstehungsprozess systemisch abzugrenzen und das Reifegradmodell zu untergliedern.

Perspektivisch soll eine Roadmap erarbeitet werden, die einen Integrations-Guide auf Basis eines innovativen Schulungskonzeptes enthält, gepaart mit einem Reifegradmodell, welches die langfristige Entwicklung der GPS-Integration vorgibt und damit der Fahrplan für die unternehmensinterne Einführungsstrategie ist. Mit Hilfe der beschriebenen „Schritt für Schritt“-Integrationsstrategie wird eine Komplexitätsreduzierung erreicht, welche den Aufwand für die Einführung des GPS-Systems erheblich reduziert. Durch die ganzheitliche Vorgehensweise mit lexikalischer Erarbeitung des Wissens und fortlaufender Reifegradbewertung werden die KMUs befähigt, zukünftige Neuerungen im GPS-System selbstständig umzusetzen.

## 5. QUELLEN

- [Bloom, 2001] Bloom, B.: Taxonomie von Lernzielen im kognitiven Bereich (Beltz Studienbuch), Beltz-Verlag, Weinheim, Basel, 2001
- [Gröger, 2013] Gröger, S.: "Funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation, Habilitation, TU Chemnitz, 2013.
- [Henzold, 2011] G. Henzold: Form und Lage, 3. überarbeitete Auflage, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin, 2011.
- [Kusay-Merkle, 2018] Kusay-Merkle, U.: "Agiles Projektmanagement im Berufsalltag", Springer Gabler, Wiesbaden, 2018.
- [Morse, 2018] E. Morse, C. Shakarji, V. Srinivasan: A Brief Analysis of Recent ISO Tolerancing Standards and Their Potential Impact on Digitization of Manufacturing; Procedia 15th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing – CIRP CAT 2018; S. 11–18.
- [Pahl/Beitz, 2013] J. Feldhusen, K.-H. Grote (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8. vollständig überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Schütte, 2017] W. Jorden, W. Schütte: Form- und Lagetoleranzen, Handbuch für Studium und Praxis, 9. neu bearbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2017.
- [Senge, 2017] Senge, P. M.: Die fünfte Disziplin: Kunst und Praxis der lernenden Organisation (Systemisches Management), 11. Auflage, Schäfer Poeschel, Stuttgart, 2017.
- [VDMA, 2019] Impulsstiftung des VDMA: Industrie 4.0-Readiness Online Selbstcheck für Unternehmen, <https://www.industrie40-readiness.de/>, aufgerufen am: 30.9.2019.
- [8015, 2011] DIN EN ISO 8015:2011: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [9004, 2018] DIN EN ISO 9004:2018: Qualitätsmanagement – Qualität einer Organisation, Anleitung zum Erreichen nachhaltigen Erfolgs. Beuth-Verlag, Berlin, 2018.
- [14638:2015] DIN EN ISO 14638:2015: Geometrische Produktspezifikation – Matrix-Modell, Beuth-Verlag, Berlin, 2015.
- [15226, 2017] DIN ISO 15226:2017: Technische Produktdokumentation – Lebenszyklusmodell und Zuordnung von Dokumenten, Beuth-Verlag, Berlin, 2017.
- [17450-1, 2011] DIN EN ISO 17450-1:2012: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung. Beuth-Verlag, Berlin, 2012.



# DIGITALISIERUNG UND GEOMETRIEMESSUNG IN DER PRODUKTION IM WANDEL DER ZEIT

**Dietrich Imkamp, Beata Schönberg**

Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Systems Bridge, dietrich.imkamp@zeiss.com

---

*Abstract. Die Messtechnik zur Bestimmung der Produktgeometrie spielt eine entscheidende Rolle für die modernen industrielle Produktion. Durch den Vergleich zwischen der Sollgeometrie und der messtechnisch erfassten Istgeometrie wird die Einhaltung der Produktspezifikationen geprüft und damit Austauschbarkeit von mechanischen Komponenten sichergestellt. Der Einsatz der digitalen Datenverarbeitung hat die Leistungsfähigkeit der dabei eingesetzten Messtechnik schon vor Jahrzehnten gesteigert und vielen messtechnischen Verfahren und Systemen zum Durchbruch verholfen. Die rasante technische Entwicklung bei der Digitalisierung hat das Umfeld der Messtechnik in der Produktion verändert. In diesem Umfeld ist die Messtechnik wichtiger Informationslieferant zum Zustand der Produktion, der Informationen (z. B.: Sollgeometrie) digital übernimmt, verarbeitet und seine Informationen ebenfalls digital bereitstellt.*

**KEYWORDS:** AUSTAUSCHBAU, DIGITALISIERUNG, INDUSTRIE 4.0, KOORDINATENMESSTECHNIK

---

## 1. EINFÜHRUNG

Die heutige Darstellung des Themas Digitalisierung in der Produktion erzeugt den Eindruck, als ob diese gerade erfunden worden ist. Dabei spielt die Digitalisierung in der Messtechnik schon seit Jahrzehnten eine wichtige Rolle. Sie wird nicht nur bei etablierten Verfahren eingesetzt (z. B.: Digitalanzeige eines Messschiebers), sondern sie hat verschiedenen Verfahren der Messtechnik (z. B.: Koordinatenmesstechnik) erst zum Durchbruch verholfen. Dennoch hat die Digitalisierung durch ihre rasante technische Entwicklung die Produktion in den letzten Jahren erheblich beeinflusst, was beispielsweise durch den Begriff „Industrie 4.0“ beschrieben wird. Eine besondere Rolle bei der Digitalisierung der Produktion spielen Informationen, die digital verarbeitet und übertragen werden. Gerade die Messtechnik liefert einen erheblichen Teil dieser Informationen in der Produktion und ist daher ein wesentliches Element des Trends zur Digitalisierung der Produktion [Imkamp, 2016].

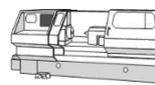
## 2. GEOMETRIEMESSUNG IN DER PRODUKTION – VORAUSSETZUNG FÜR DEN AUSTAUSCHBAU

Es ist heute selbstverständlich, dass Teile technischer Produkte aus der industriellen Produktion sich ohne Anpassungen mit beliebigen anderen Teilen kombinieren lassen. Diese Fähigkeit zum Austausch von Bauteilen setzt hinsichtlich der Bauteilabmessungen voraus, dass die Teile mit Anschluss an eine einheitliche Längenmaßeinheit produziert werden.

Dieses Produktionsprinzip wird als „Austauschbau“ bezeichnet [Trumpold, 2006]. Dazu sind neben einheitlichen (Längen-) Maßeinheiten und Produktionsmaschinen, die nach diesen Einheiten arbeiten, geeignete Messgeräte erforderlich, mit denen die geometrischen Produktmerkmale mit ausreichend geringer Messunsicherheit für eine eindeutige Konformitätsaussage [Imkamp, 2019] bestimmt werden können (Abb. 1).



- **Maßsystem**  
zur eindeutigen  
Festlegung der  
Produktkonstruktion



- **Maschinen**  
zur Produktion  
nach den  
festgelegten Maßen



- **Messtechnik**  
zur Bestimmung und  
Prüfung der Maße

Abb. 1: Kennzeichen des "Austauschbaus" in der industriellen Produktion

### 3. DIGITALISIERUNG UND GEOMETRIEMESSUNG

Digitalisierung bezeichnet ursprünglich das Umwandeln analoger Werte in digitale Formate und ihre Verarbeitung oder Speicherung in einem digitalen System. In der Signalverarbeitung wird mit Digitalisierung der Übergang von analogen zu digitalen Signalen mittels Abtastung bezeichnet [Beucher, 2016]. Diese Vorgehensweisen kommen in vielfältiger Form in der geometrischen Messtechnik zur Anwendung.

Bei digitalen Messschiebern ersetzt eine digitale Anzeigeeinheit den analogen Nonius. Die Erfassung des Messwertes erfolgt mittels eines zumeist kapazitiven Linearencoders [Baxter, 1986], dessen Signal digitalisiert wird.

Auch bei Koordinatenmessgeräten werden Linearencoder in Verbindung mit Glas- oder Glaskeramikmaßstäben verwendet, um die Position der einzelnen Bewegungsachsen zu erfassen. Diese Informationen werden mit den Informationen aus dem Sensor (Messkopf) des Gerätes verknüpft, um Raumpunkte auf der Bauteiloberfläche innerhalb eines durch die Bewegungsachsen definierten Koordinatensystems zu bestimmen [Pfeifer, 2010]. Diese Punkte werden mit den Methoden der Ausgleichsrechnung zu Merkmalsparametern (z. B.: Durchmesser einer Bohrung) der Produktgeometrie verdichtet (Abb. 2).

Damit die ermittelten Merkmale die Produktgeometrie auch ausreichend repräsentieren, müssen sehr viele Punkte aufgenommen werden. Diese Punktemengen lassen sich mit den zuvor genannten Verdichtungsmethoden nur digital verarbeiten. Daher konnte die Koordinatenmesstechnik erst erfolgreich in der industriellen Produktion zur Anwendung kommen, als geeignete Rechner zur Verfügung standen [Imkamp, 2019a].

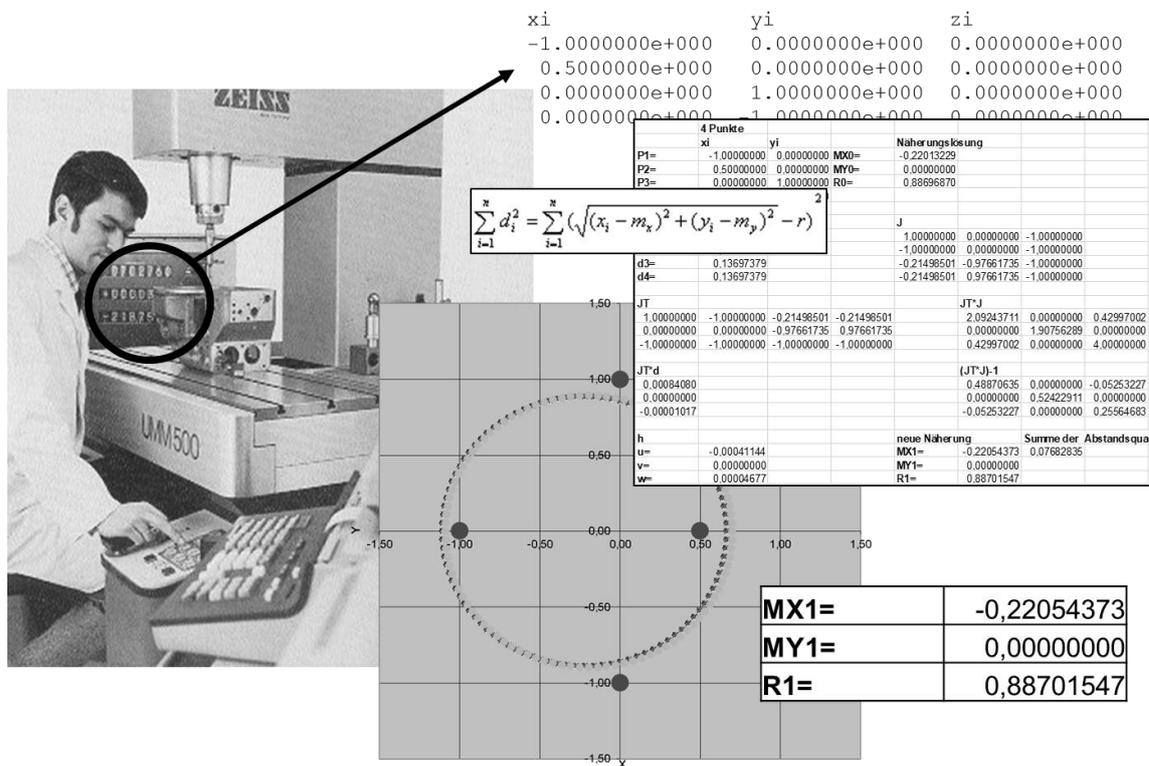


Abb. 2: Berechnung des Gauß-Ausgleichskreises (LSCI = Least Square Circle nach DIN EN ISO 12181-1, GG nach DIN EN ISO 14405-1) aus 4 Punkten mit einer Tabellenkalkulationssoftware

Optische Koordinatenmesssysteme, wie die Streifenprojektion und die Photogrammetrie, bei denen das Koordinatensystem durch den optischen Aufbau und die Verknüpfung mehrerer Ansichten des Bauteils gebildet wird, sind noch viel stärker von ausreichend hoher Rechenleistung abhängig, da sie wesentlich mehr Daten (>10.000 Punkte) verarbeiten müssen. Nur damit erreichen sie eine ausreichend hohe Auflösung, um die Genauigkeit für die Prüfung mechanischer Bauteile zu erreichen [Imkamp, 2019a].

Noch einmal höhere Anforderungen an die digitale Datenverarbeitung werden an die messtechnische Anwendung der Computertomographie gestellt, da hier nicht nur die Daten der Oberfläche, sondern das gesamte Volumen des Produktes erfasst wird [Imkamp, 2019a] (Abb. 3).

Schließlich findet die digitale Datenverarbeitung zur virtuellen Durchführung von Messungen Anwendung [Imkamp, 2018]. Diese virtuelle Durchführung wird bei der Off-Line Programmierung von Messabläufen zur Verfahrenswegbestimmung und Kollisionskontrolle durch Simulation der Abläufe genutzt (siehe Abb. 4).

Weiterhin dient die virtuelle Messung zur Bestimmung der Messunsicherheit durch Simulation. Unter dem Begriff des virtuellen Messgerätes ist besonders das virtuelle Koordinatenmessgerät bekannt geworden und auch kommerziell verfügbar [Franke, 2017]. Schließlich lassen sich Resultate von Fertigungssimulationen virtuell messen [Haas, 2019].

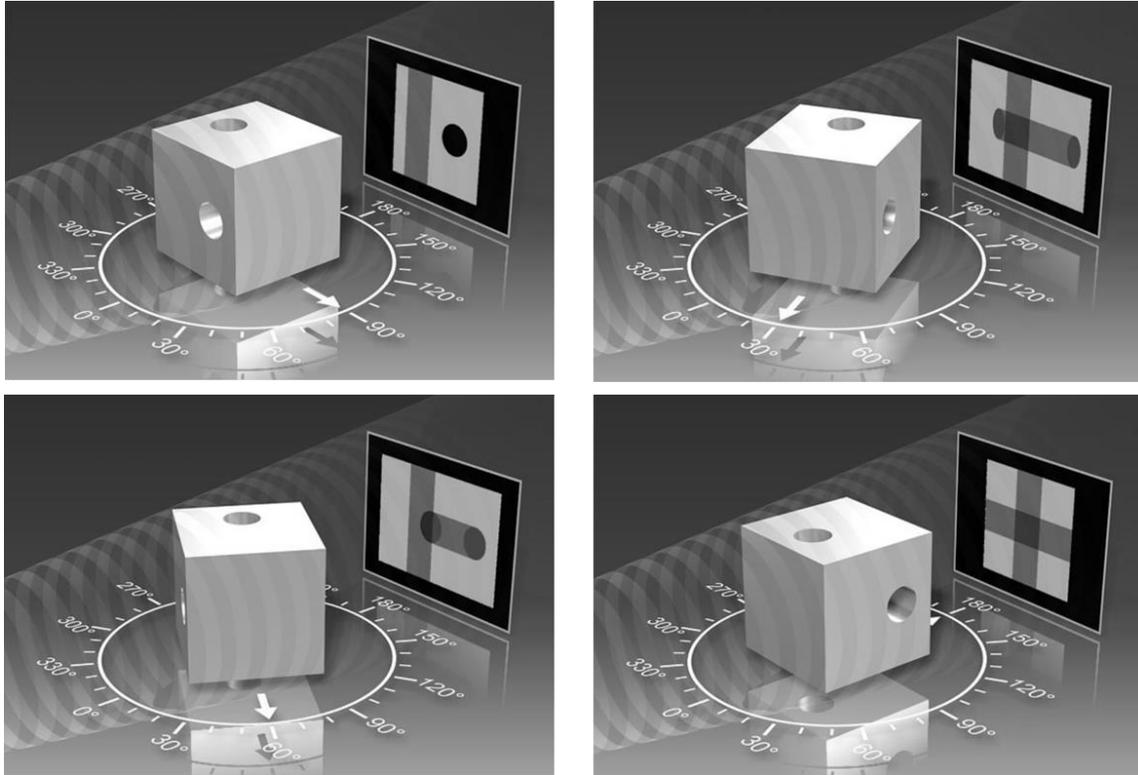


Abb. 3: Volumenrekonstruktion aus den Durchstrahlungsbildern bei der Computertomographie

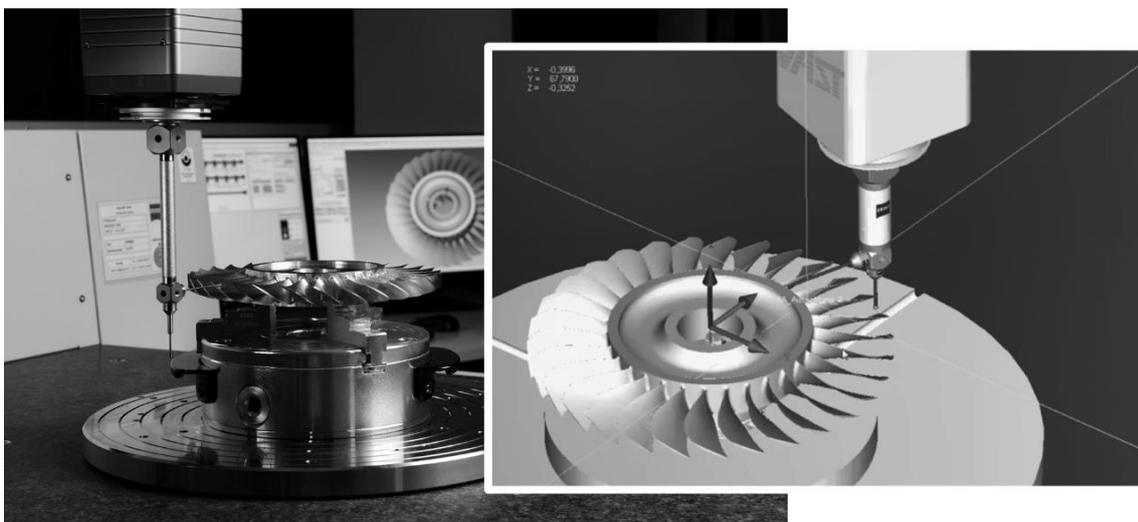


Abb. 4: Off-Line Programmierung an einer Blisk (Blade Integrated Disk einer Flugzeugturbine)

#### 4. GEOMETRIEMESSUNG IN DER DIGITALEN PRODUKTION

Der Begriff der Digitalisierung wird zwischenzeitlich immer seltener im Sinne der ursprünglichen Bedeutung (s. o.) verwendet, sondern vermehrt im Sinne des umfassenden Trends der Veränderung der industriellen Produktion durch den Einsatz digitaler Technik. Dabei findet er sehr vielfältige und teilweise widersprüchliche Anwendungen (z. B.: Automation, Veränderung von Geschäftsmodellen) [Mertens, 2017].

Zur Beschreibung des Umfeldes der geometrischen Messtechnik wird hier der Begriff der „Digitalen Produktion“ aus [Westkämper, 2013] genutzt. Darunter wird eine Produktionsweise verstanden, in der die Informationen durchweg in digitaler Form erzeugt, verwaltet, gespeichert, verteilt, verarbeitet und kommuniziert werden. Diese Definition betont den Begriff der Information, der für die Messtechnik, als der „Informationslieferant“ zur Qualität der Produktion, besonders wichtig ist.

Wenn man den Prozess der Geometriemessung als Informationsverarbeitungsprozess betrachtet, kann man zunächst zwischen den Eingangsinformationen, in Form von Informationen zur Produktspezifikation und den Ausgangsinformationen in Form der Messergebnisse zu dieser Spezifikation unterscheiden [Pfeifer, 2004]. Bei den Eingangsinformationen handelt es sich um Daten der Produktgeometrie und Informationen zu ihren Merkmalen einschließlich ihrer Toleranzen. Diese Informationen dienen zur Festlegung eines Messablaufes.

Die anschließende Messung liefert nach einer geeigneten Auswertung (z. B.: Berechnung der zugeordneten Ausgleichselemente, s. o.) die Messergebnisse zu den Merkmalen und ermöglicht damit eine Bewertung der geometrischen Qualität der gefertigten Produkte. Diese Ausgangsinformationen werden in verschiedenen Bereichen der Produktion genutzt. Sie werden auf operativer Ebene direkt in der Messtechnik zur Dynamisierung der Messumfänge oder in der Fertigung zur Korrektur der Prozesse genutzt. Darüber hinaus werden die Informationen in Bereichen, die vor der Fertigung liegen, verwendet. Die Fertigungsplanung und -steuerung benötigt Informationen über die Anzahl von Teilen außerhalb der Toleranz, um Nacharbeit und gegebenenfalls die Fertigung von Ersatz zu beauftragen. In der Entwicklung und Konstruktion werden die Informationen zur Verbesserung der Produktgestaltung genutzt. So bilden sich kleine und große Regelkreise [Pfeifer, 2010] (Abb. 5).

Zur digitalen Übertragung dieser Informationen stehen verschiedene Datenformate zur Verfügung, die je nach Anwendung in unterschiedlichem Umfang genutzt werden [Pfeifer, 2004], [Imkamp, 2012].

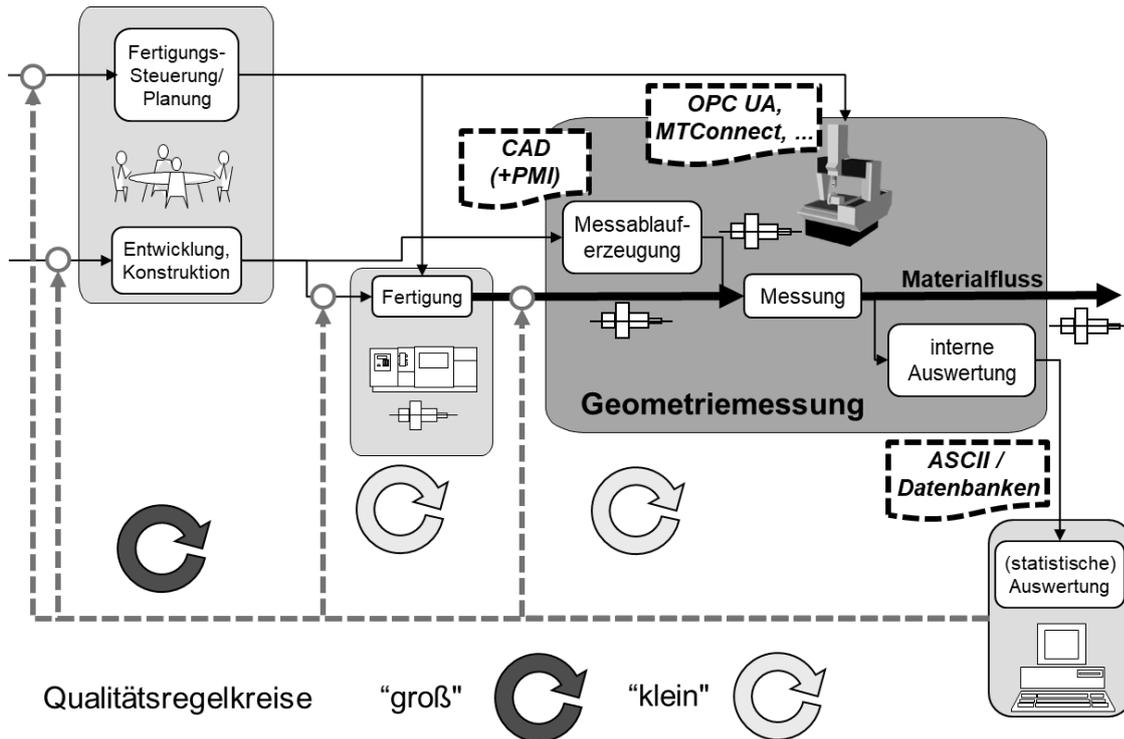


Abb. 5: Prozess der Koordinatenmesstechnik (Geometriemessung) im Informationsfluss für Qualitätsregelkreise [Imkamp, 2019a]

Im Bereich der Eingangsinformationen setzt sich die integrierte Übertragung von Produktgeometrie und Toleranzen in CAD-Daten durch die Nutzung der CAD-Datenerweiterung PMI (Product Manufacturing Information) durch [Imkamp, 2014] (Abb. 6).

Im Bereich der Ausgangsinformationen ist aufgrund der unterschiedlichen Nutzung der Daten kein durchsetzungsfähiger digitaler Standard absehbar. Neben verschiedenen ASCII-Formaten (Textdateien) [Pfeifer, 2004] werden individuelle Schnittstelle zur Übertragung der Messergebnisse in Datenbanken verwendet.

Bei den Ausgangsinformationen hat eine zweckmäßige Verknüpfung zu den Eingangsinformationen große Bedeutung, um die Messergebnisse einzelner Merkmale durchgängig zu identifizieren. Weiterhin geht es bei der Analyse von Messergebnissen auch um die Rückverfolgbarkeit einzelner Bauteile. Dazu müssen die Messergebnisse um Informationen zu den Bauteilen und ihrer Fertigungshistorie ergänzt werden.

In den USA gibt es den Versuch einen Standard für alle zuvor beschriebenen Eingangs- und Ausgangsinformationen zu etablieren [Zhao 2012]. Der Standard ist allerdings sehr komplex und umfangreich, was seine Implementierung erschwert.

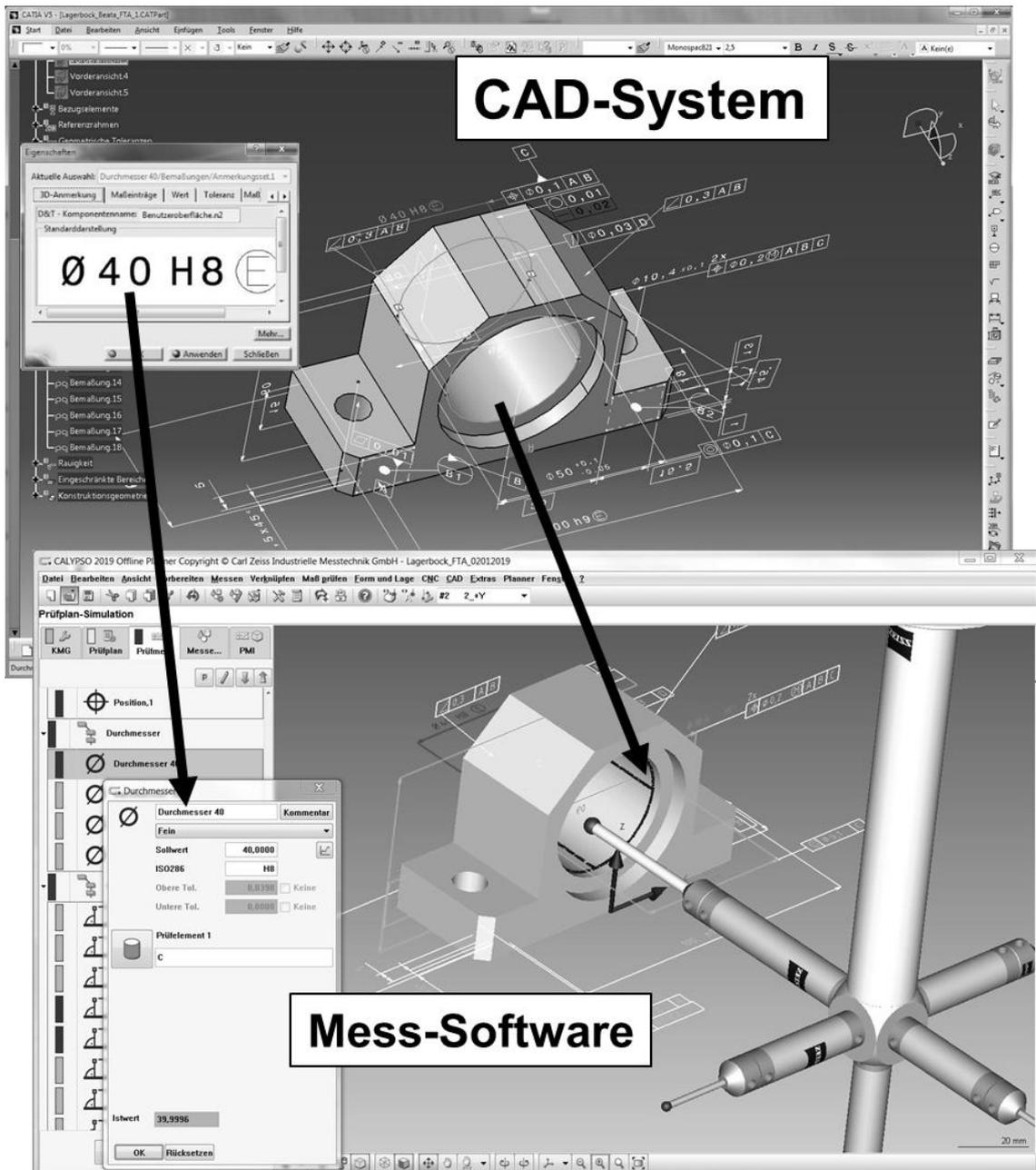


Abb. 6: Prozess der Koordinatenmesstechnik (Geometriemessung) im Informationsfluss für Qualitätsregelkreisen [Imkamp, 2019a]

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Digitalisierung in ihrer eigentlichen Bedeutung (Abschnitt 3) hat wesentlich dazu beigetragen die Leistungsfähigkeit der geometrischen Messtechnik zu steigern. Durch die Digitalisierung wurden und werden nicht nur analoge Methoden verbessert, sondern auch neue Methoden zur Anwendung gebracht. Darüber hinaus wird die gestiegene Rechenleistung in der Messtechnik auch zur virtuellen Messung verwendet.

Der Begriff der Digitalisierung wird heute in der Produktion aber über die ursprüngliche Wortbedeutung hinausgehend genutzt. In der digitalen Produktion werden alle Informationen digital übertragen und verarbeitet. Dabei steht die Messtechnik als wesentlicher „Informationslieferant“ zur Qualität in der Produktion vor der Aufgabe, sich in dieses Umfeld nahtlos zu integrieren.

## 6. QUELLEN

- [Baxter 1986] Patent US4586260: Capacitive displacement measuring instrument. Published 29. May 1986, The L. S. Starrett Company, Larry K. Baxter, Robert J. Buehler.
- [Beucher, 2016] Beucher, O.: Signale und Systeme: Theorie, Simulation, Anwendung, Springer Vieweg; Auflage: 2., 2015.
- [Franke, 2017] Franke, M., Kistner, T., Hausotte, T., et al. (2017). Bestimmung der Messunsicherheit für Koordinatenmesssysteme. *tm - Technisches Messen*, 84(5), pp. 325-335. Retrieved 19 Jan. 2020, from doi:10.1515/teme-2017-0016.
- [Haas, 2019] Haas, G., Schönberg, B.: Synergien im Produktentwicklungsprozess: Simulation mit virtuellen und realen Daten in der Mess- und Auswertesoftware ZEISS CALYPSO, Industriekolloquium der Forschungsgruppe FOR 2271 „Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden“, Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) 05.02.2019.
- [Imkamp, 2012] Imkamp, D., Wanner, J.: Vom Messablaufplan über die Programmierung, Durchführung und Auswertung bis zur Ergebnisdarstellung, in: Weckenmann, A. (Hrsg.): *Koordinatenmesstechnik: Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Carl Hanser Verlag, München 2012.
- [Imkamp, 2014] Imkamp, D., Gabbia, A.: Nutzung des PMI Standards zur automatisierten Übertragung von Merkmalsdaten in die dimensionale Messtechnik, in: *ITG-Fachbericht 250, Sensoren und Messsysteme 2014 zur 17. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2014 vom 03. bis 04. Juni 2014 in Nürnberg*.
- [Imkamp, 2016] Imkamp, D., Berthold, J., Heizmann, M., et al. (2016). Herausforderungen und Trends in der Fertigungsmesstechnik – Industrie 4.0. *Prozessmesstechnik und Präzisionsmesstechnik / Thomas Fröhlich, Eberhard Manske. tm - Technisches Messen*, 83(7-8), pp. 417-429. Retrieved 19 Jan. 2020, from doi:10.1515/teme-2015-0081.
- [Imkamp, 2018] Imkamp, D.: Digitalisierung und Virtualisierung für die Dimensionelle Messtechnik, Vortrag auf der Tagung „Metrologie für virtuelle Messgeräte“ bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig 13. – 14. März 2018. (Internet, 20.01.2019: <https://www.ptb.de/cms/fileadmin/>

- internet/PSt/pst1/Vortraege\_VirtMess2018/VirtMess2018\_Digitalisierung\_Dimensionelle\_Messtechnik\_Fa\_Zeiss.pdf)
- [Imkamp, 2019] Imkamp, D., Sommerhuber, C.: Konformitätsbewertung bei geometrischen Messaufgaben in der Produktion: ISO 14253 und industrielle Praxis, in: Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, 9. VDI Fachtagung, Erfurt, 13. bis 14. November 2019 (VDI Berichte 2365), VDI-Verlag, Düsseldorf 2019.]
- [Imkamp, 2019a] Imkamp, D. & Tutsch, R. (2019). Koordinatenmesstechnik, taktil und optisch – schon immer digital. *tm - Technisches Messen*, 86(9), pp. 450-463. Retrieved 20 Jan. 2020, from doi:10.1515/teme-2019-0064.
- [Imkamp, 2019b] Imkamp, D.: Dimensionale Messtechnik in der digitalen Produktion – Aufgaben, Vernetzung und Schnittstellen, 20. GMA/ITG Fachtagung, Sensoren und Messsysteme 2019, 25. und 26. Juni 2019 in Nürnberg.
- [Mertens, 2017] Mertens, P., Barbian, D., Baier, S.: Digitalisierung und Industrie 4.0 – eine Relativierung, Springer, 2017.
- [Pfeifer, 2004] Pfeifer, T., Imkamp, D.: Koordinatenmesstechnik und CAX-Anwendungen in der Produktion – Grundlagen, Schnittstellen, Integration, Carl Hanser Verlag, München 2004.
- [Pfeifer, 2010] Pfeifer, T., Schmitt, R.: Fertigungsmesstechnik, Oldenbourg Verlag, München 2010.
- [Trumpold, 2006] Trumpold, H.: Austauschbau im Wandel der Zeiten, Vorlesung am 29. September 2006 aus Anlass 50 Jahre Austauschbau in Lehre und Forschung an der TU-Chemnitz.
- [Westkämper, 2013] Westkämper, E. Spath, D., Constantinescu, C., Lentes, J.: Digitale Produktion, Verlag: Springer, 2013.
- [Zhao 2012] Zhao, Y. F., Horst, J. A., Kramer, T. R., Rippey, W., Brown, R. J.: Quality Information Framework – Integrating Metrology Processes, in: IFAC Proceedings Volumes 45, Issue 6, 23–25 May 2012, Pages 1301-1308, (06.05.2019: <https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00113>).



# FAHR SICHERHEIT UND KOMFORT: GEOMETRIEANFORDERUNGEN IM FAHRWERK

**Ralph Mayer, Fridtjof Körner**

TU Chemnitz, Professur Fahrzeugsystemdesign, ralph.mayer@mb.tu-chemnitz.de

---

*Abstract: Das Fahrverhalten eines Straßenfahrzeugs wird hinsichtlich der Hauptanforderungen Fahrsicherheit und Fahrkomfort bewertet. Diese beiden Kriterien stellen i. A. nicht nur einen Zielkonflikt in der Entwicklung eines Fahrwerks dar, sondern resultieren aus dem Zusammenspiel verschiedener Oberflächen im statischen und vor allem dynamischen Lastfall: Fahrbahn - Reifenlauffläche, Reifenwulst - Felge, Brems Scheibe - Bremsbelag, Dämpferrohr - Kolbendichtung, ... Vielfach sind Anforderungen an die Geometrien oder Oberflächen einer Fahrwerkkomponente als Konstruktionsmerkmal im Lastenheft definiert. Sie besitzen dabei jedoch in der Regel keine hinreichende Aussagekraft über das Betriebsverhalten aufgrund individueller Lasteinflüsse des Fahrzeugnutzers. Radlastschwankungen sind stark sicherheitsrelevant. Ihnen begegnet man durch eine adäquate Auslegung von Feder und Dämpfer, die wiederum mit einem spezifischen Ansprechverhalten Bedeutung im Komfortempfinden der Fahrzeuginsassen haben. Im Beitrag wird anhand ausgewählter Beispiele von Reifen, Radbremse und Dämpfer der aktuelle Forschungsbedarf und Ergebnisse vorgestellt.*

**KEYWORDS:** REIFENAUFSTANDSFLÄCHE, FAHRBAHN, NVH, HIGH SPEED UNIFORMITY, BREMSEN RUBBELN, BREMSEN QUIETSCHEN

---

## 1. EINLEITUNG

Mit der Fahrsicherheit, die im Wesentlichen durch das Kriterium Radlastschwankung bewertet wird, und den Komfort, der hauptsächlich durch die Vertikalbeschleunigung des Aufbaus charakterisiert wird, stehen zwei gegensätzliche Anforderungen im Fokus einer Fahrwerkauslegung. Der Übertragungspfad ist durch Straßenanregung, ob Einzelhindernis wie Schlagloch oder kontinuierliche Welligkeit der Fahrbahn, über Rad-Reifen-Kombination, Federung und Dämpfung sowie Achskonzept geprägt. Im Falle einer Bremsung kommt noch das tribologische System von Bremsbelag mit Brems Scheibe bzw. -trommel hinzu. Das Zusammenspiel dieser Komponenten ist für das subjektive Empfinden eines Fahrzeuginsassen essentiell und wird als Qualitätsmerkmal mitunter sehr differenziert sowohl im Entwicklungsprozess eines Kraftfahrzeugs als auch bei Vergleichstest durch die Fachpresse bewertet: z. B. Stuckern, Prellen, Lenkungsstößigkeit, Shimmy, Zittern, etc. im Bereich Schwingungskomfort Fahrwerk.

Mit mehr als 60% wird die Qualität eines Fahrzeugs als wesentliches Kaufkriterium in der Gruppe der 18- bis 65-Jährigen beurteilt (Abb. 1). Entsprechend hoch ist der Aufwand der beteiligten Industrien an der Fertigungspräzision der jeweiligen Module und Submodule bis zum Zusammenwirken im Gesamtfahrzeug. Dass dennoch die Oberflächenbeschaffenheit einer

Komponente noch nicht die Gesamteigenschaften ausmachen, soll anhand nachfolgender Ausführungsbeispiele verdeutlicht werden. In Verbindung mit neuen oder höheren Anforderungen an die Fahrwerkskomponente, Fortschritte in der Fertigungstechnik oder Errungenschaften in der Werkstoffentwicklung wird auf den erweiterten Forschungsbedarf verwiesen.

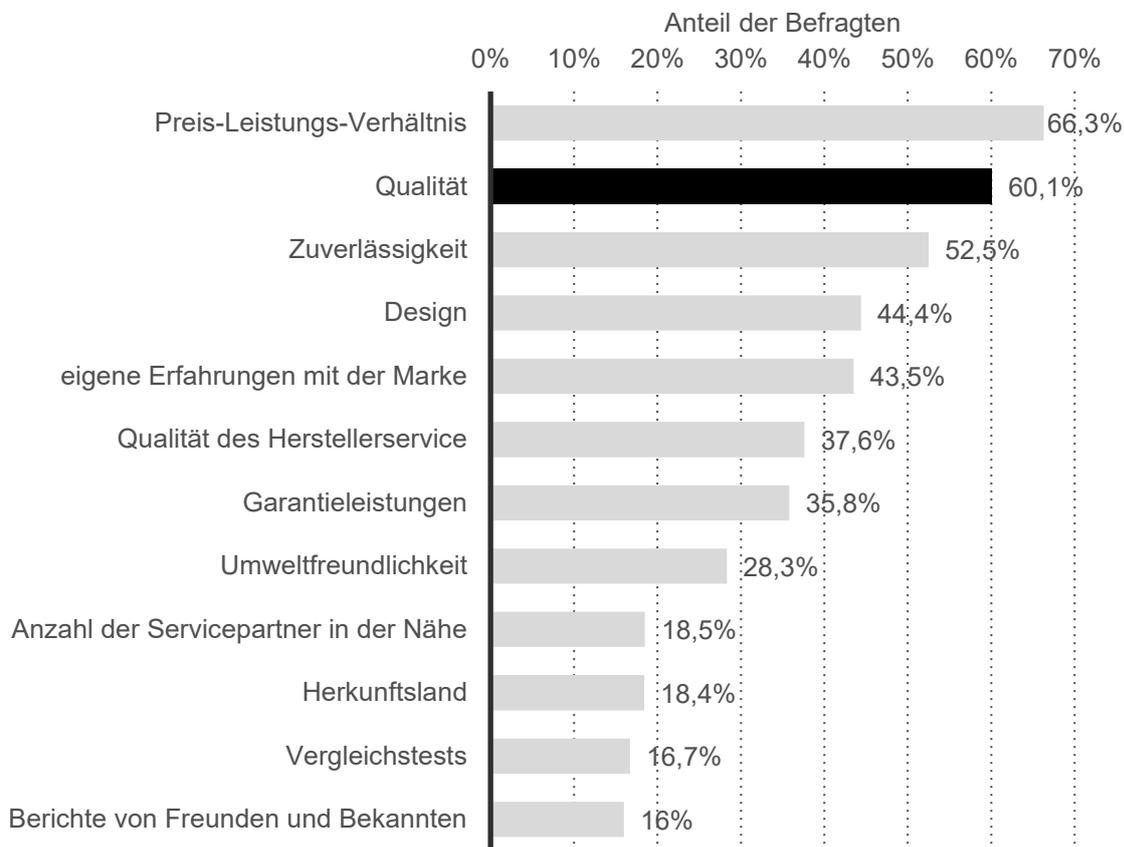


Abb. 1: Kriterien für die Markenwahl beim Autokauf (Erhebung 2017)

## 2. GEOMETRIEANFORDERUNGEN IM ZUSAMMENWIRKEN REIFEN-FAHRBAHN

Der Reifen als Bindeglied zwischen Fahrbahn und Fahrzeug vollzieht essentielle Funktionen in Bezug auf:

- Fahrsicherheit (Kraftschluss)
- Fahrverhalten (Lenkverhalten, Kurvenstabilität, Geradeauslaufstabilität)
- Fahrkomfort (Federung, Dämpfung, Laufruhe)
- Haltbarkeit (strukturelle Dauerhaltbarkeit, Platzdruck, Geschwindigkeitstüchtigkeit, Durchschlagfestigkeit)

Qualitätsmerkmale des Reifens bilden u.a. die geometrischen Größen Kontur in Radial- und Lateralrichtung (Abb. 2), die die Laufruhe geschwindigkeitsabhängig

beeinflussen. Radialkonturschwankungen führen zu Radialkraftschwankungen, die durch Vibrationen im Aufbau oder auch akustisch wirksam werden können. Laterale Geometrieabweichungen mit Lateralkraftschwankungen als Folge werden z. B. als Schütteln wahrgenommen. Sollten diese geometrischen Ungleichförmigkeiten auf ein produktionstechnisch mögliches Minimum reduziert sein, so ist dies trotzdem kein Garant für optimale Laufruhe: Steifigkeitsschwankungen können ebenso lateral wie radial zu störenden Schwingformen führen.

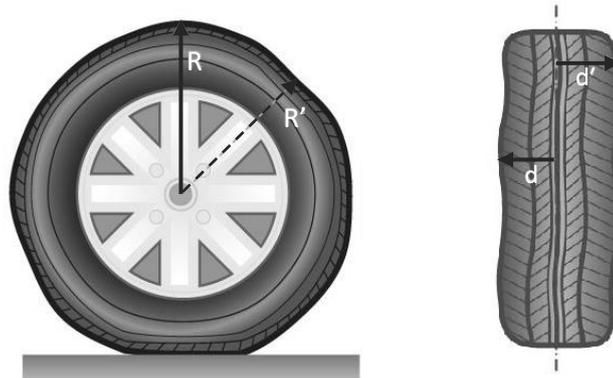


Abb. 2: radiale und laterale Konturabweichungen (Quelle: Michelin)

Eine thermisch induzierte Ungleichförmigkeit bildet der sog. Standplatten (flatspot), der sich durch Erwärmen im Fahrbetrieb und Abstellen auf kälterem Untergrund ausprägt. Ein weiterer Entstehungsgrund ist die mitunter hohe Umgebungstemperatur beim Seetransport von Neufahrzeugen. Biegesteifigkeit von Laufstreifen und Karkasse variieren lokal begrenzt. Diese Form von Geometrieabweichung ist i. A. reversibel [Leister, 2015] und hat nach wenigen Kilometer Laufleistung keinen spürbaren Effekt mehr. Bei vergangenen Modellwechsel vieler Automobilhersteller gab es einen Trend zu größeren Rädern (sog. „Zollsprung“), die im Bereich großer SUVs z. T. an das Grenzmaß von 22,5“ Felgendurchmesser beim Schwerlast-Lkw heranreichen. Höhere Anforderungen an Tragfähigkeit, dynamisches Fahrverhalten (Grip) und Komfort in allen Geschwindigkeitsbereichen stellen zudem Herausforderungen an die Fertigungstechnik dar und bilden auch im Bereich Fahrdynamiksimulation durch geeignete Reifenmodelle Forschungsbedarf.

Erst durch das Zusammenwirken mit der Straßenoberfläche entfaltet der Reifen seine spezifischen Eigenschaften. Somit hat die Straßenrauigkeit ebenso Einfluss auf Komfort, Rollwiderstand, Verschleiß und Fahrsicherheit. Die Oberfläche einer Fahrbahn besteht beispielsweise aus mineralischem Granulat (Mixtur aus gemahlenem Hartstein, Sandstein oder Granit und aus Sand und Feinkorn) mit Bitumen als Bindemittel (Abb. 3). Dabei variiert die Korngröße des Granulats im Bereich von etwa 6 mm bis 14 mm (makrorau). Kleinere Korngrößen sowie der Verschleiß der Fahrbahn führen zu makroglatten Zuständen [Michelin, 2005]. Die Kornoberfläche des Granulats haben einen Abstand Spitze-Spitze von etwa 0,001 mm bis 0,1 mm (mikrorau).

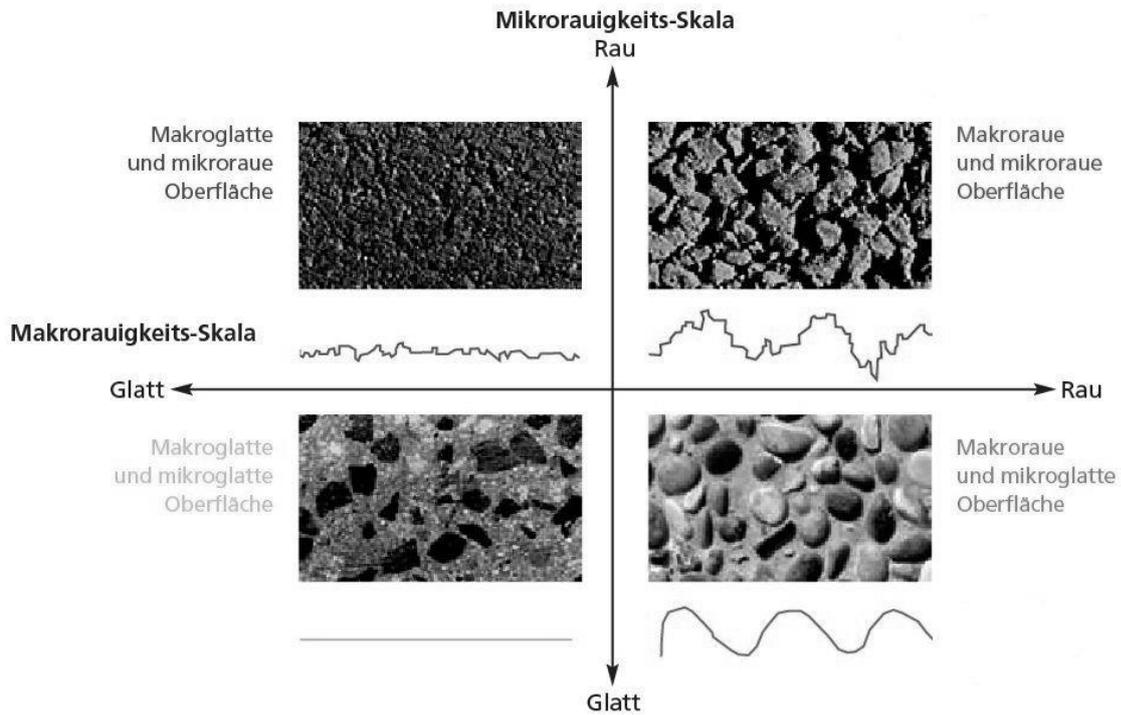


Abb. 3: Oberflächenbeschaffenheit der Fahrbahn (Quelle: Michelin)

Die Reifenhaftung (Grip) wird maßgeblich bestimmt durch Mikrorauigkeit sowie Profilierung, Härte und viskoelastischer Eigenschaften der Lauffläche (Abb. 4). Kursorisch wird darauf hingewiesen, dass auf trockener Fahrbahn auch Kraftschlusswerte > 1 erreicht werden können.

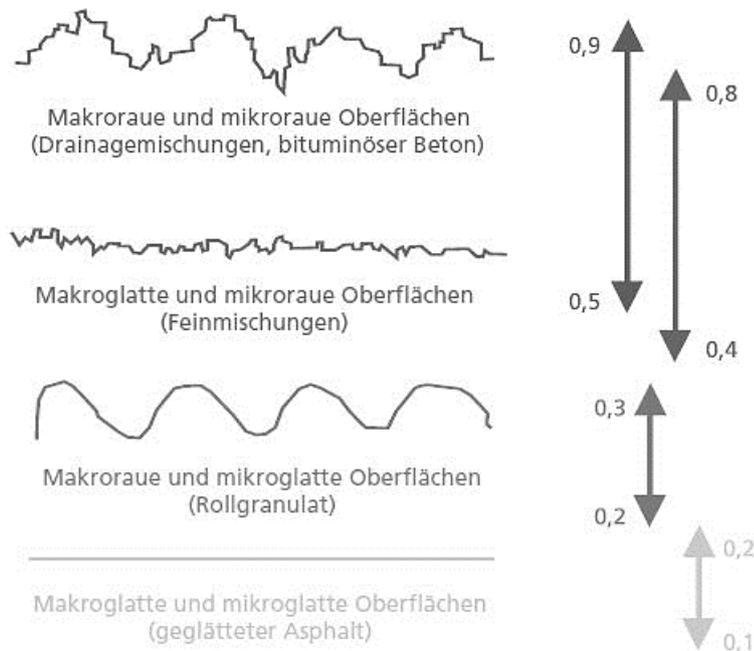


Abb. 4: Fahrbahnrauigkeit und Kraftschlusswerte (Quelle: Michelin)

### 3. GEOMETRIEANFORDERUNGEN IN DER RADBREMSE

Größten Verbreitungsgrad insbesondere an Vorderachsen hat bei fast allen Arten von Straßenfahrzeugen inkl. Nutzfahrzeug die Scheibenbremse (Abb. 5), die in den 50ern des letzten Jahrhunderts für die Pkw-Anwendung entwickelt worden ist.

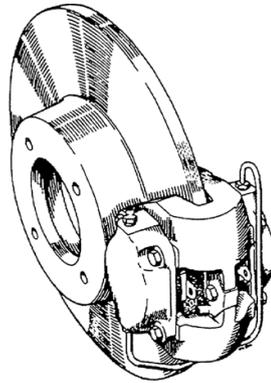


Abb. 5: Dunlop Festsattel-Scheibenbremse, 1957 [Bill, 2017]

Zu den Schwingungserscheinungen der Radbremse gehören das akustisch wirksame Bremsenquietschen und das tieffrequente Bremsenrubbeln (bis unter 100 Hz als sog. Kaltrubbeln) [Mayer, 2007]. Obwohl allgemein nicht sicherheitsrelevant, sondern komfortmindernd, werden bei der Brems Scheibe hohe Geometrieanforderungen in engen Toleranzfeldern gestellt. Die für das Bremsenrubbeln ursächliche Dickenschwankungen (DTV – Disc Thickness Variation) werden dabei seitens des Fahrzeugherstellers in Abhängigkeit der Welligkeit des Bremsrings mitunter bei weniger als 10  $\mu\text{m}$  toleriert. Planschlagabweichungen (SRO – Side face Run Out) haben einen vergleichbaren Effekt erst bei deutlich mehr als 100  $\mu\text{m}$  und werden in dieser Größenordnung nicht akzeptiert.

Am Beispiel einer Brems Scheibe für ein schweres Nutzfahrzeug (Abb. 6) werden Anforderungen an Rundlauf und Parallelität von Reibringfläche zu Kühlkanal aufgezeigt. Das Bauteil aus hochgekohtem Grauguss mit einer Mindeststreckgrenze von 150 N/mm<sup>2</sup> wiegt in dieser Fahrzeugklasse mehr als 30 kg bei einem Außendurchmesser von ca. 430 mm, was der Bauraumbegrenzung der standardisierten Radgröße von 22,5“ geschuldet ist. Die Lagetoleranz des Kühlkanals verkörpert ein Qualitätsmerkmal, das u. a. im Betrieb die gleichmäßige Verteilung der durch Bremsung anfallenden Wärmemenge im Reibring sicherstellen soll. Eine ungleichmäßige Temperaturverteilung begünstigt u. a. Rissbildung im Bremsring, Bremsdruckschwankungen (→Bremsenrubbeln) und lokale Hitzeflecken mit begrenzt stattfindender Gefügeumwandlung, die wiederum einen über den Umfang ungleichmäßigen Verschleiß verursachen kann.

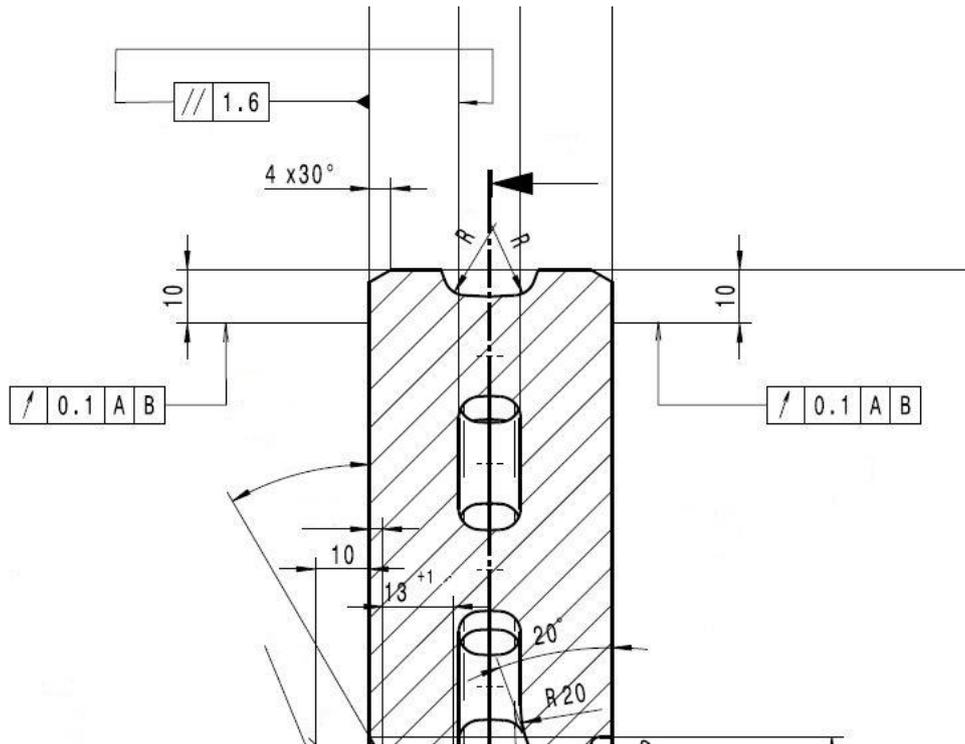


Abb. 6: Auszug einer Nfz-Bremsscheibenzeichnung (Stand ca. 2010)

Herausforderung aktueller Forschung besteht in einer gesamtheitlichen Betrachtung der Radbremse, die unter Berücksichtigung aller relevanten Komponenten wie Radlager, Bremsscheibe und Bremssattel mit Bremsbelägen das Toleranzfeld definiert auch bei veränderten Rahmenbedingungen wie anderen Werkstoffen oder Beschichtung von Bremsscheiben zur Bremsstaubreduktion [Lem, 2010].

## 4. GEOMETRIEANFORDERUNGEN IM DÄMPFERSYSTEM VON FAHRZEUGEN

### 4.1 Grundlagen der Dämpfung im Fahrzeug

Die Hauptaufgabe der Dämpfer im Fahrzeug ist immer im Zusammenhang mit den parallel verbauten Aufbaufedern zu verstehen. Die für eine elastische und gelenkige Anbindung der Räder an das Fahrzeug notwendigen Fahrwerksfedern sowie die Masse des Fahrzeuges bilden ein schwingfähiges System. Die Massen werden zusätzlich unterschieden in die Aufbaumasse (Karosserie, Antrieb, Insassen/Ladegut, etc.) sowie die radgefederten Massen (Komplettrad, Bremsscheibe, -sattel, etc.), die sich zwischen Fahrbahn und Aufbaufeder befinden. Daraus ergibt sich in der Modellvorstellung des Viertelfahrzeuges ein Zweimassenschwinger wie in folgender Abbildung (Abb. 7) dargestellt.

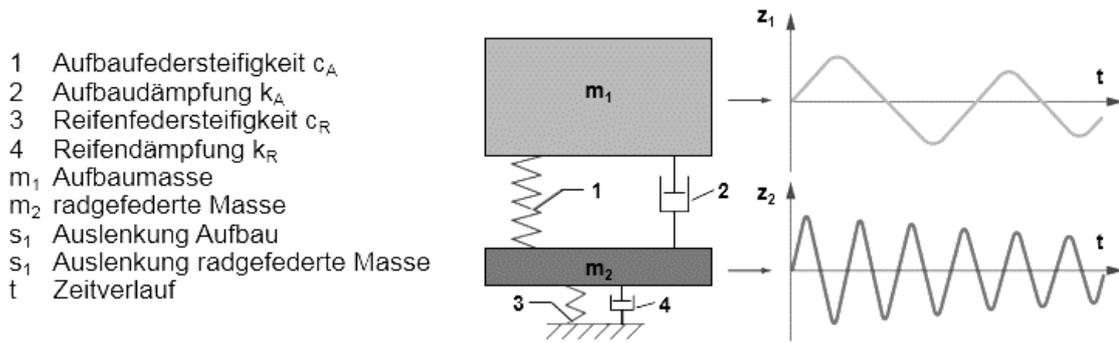


Abb. 7: Viertelfahrzeugmodell mit idealisiertem Bewegungs-Zeitverlauf [MAN, 2004]

Dieser Zweimassenschwinger hat naturgemäß zwei Eigenfrequenzen, in denen das System zur Resonanz neigt. Die Bewegungsgleichung sowie die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz eines derartigen Systems lautet (vereinfacht für einen Einmassenschwinger dargestellt) wie folgt:

$$m \cdot \ddot{z} + k_A \cdot \dot{z} + c_A \cdot z = 0 \quad (1)$$

$$\omega_e = \sqrt{\frac{c_A}{m}} \quad (2)$$

Wobei  $k_A$  die Dämpfungskonstante des Aufbaudämpfers und  $c_A$  die Federsteifigkeit der Aufbaufeder darstellen. Die Verhinderung des Aufschwingens einer der beiden Massen im Resonanzbereich wird durch die gezielte Implementierung eines Dämpfers realisiert. Dieses Bauteil dient dementsprechend vornehmlich der Reduktion der Aufbaubeschleunigung im Aufbaueigenfrequenzbereich (Fahrkomfort, auf Insassen wirkende Beschleunigungen) sowie der Begrenzung der Radlastschwankung im Radeigenfrequenzbereich (Fahrsicherheit, Kontakt zw. Rad und Fahrbahn). Im Sinne einer guten Abstimmbarkeit des Systems sowie aufgrund der Ausnutzung hydraulischer Effekte im Dämpfer ist die Dämpfungskraft geschwindigkeitsproportional nach Gleichung 3.

$$F_D = k_D \cdot \dot{z}^n \quad (3)$$

Der Zusammenhang zwischen der aufbaubezogenen Dämpfung  $k_A$  und der Dämpfung des Bauteils  $k_D$  ergibt sich durch die Hebelübersetzung der Achsgeometrie. Der Exponent  $n$  spiegelt die geschwindigkeitsabhängige Variation des Kraftgradienten für eine optimale Abstimmung wider.

## 4.2 Bauformen und resultierende Geometrieinflüsse in der Fahrzeugdämpfung

In der Kraftfahrzeugtechnik hat sich mit äußerst wenigen Ausnahmen der hydraulische Teleskopschwingungsdämpfer durchgesetzt und wird flächendeckend in Pkw und Nfz eingesetzt. Grundsätzlich sind zwei Bauformen etabliert, die sowohl in geregelter als auch ungeregelter Form Verwendung finden.

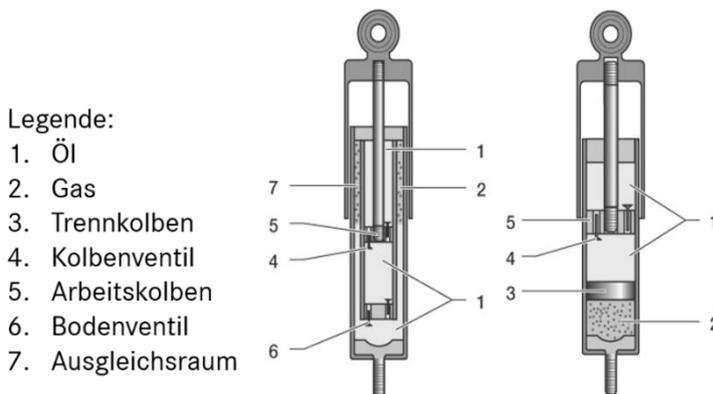


Abb. 8: Hauptbauformen von Schwingungsdämpfern in der Fahrzeugtechnik [MAN, 2004]

Sowohl der Einrohrdämpfer (ERD, rechts in Abb. 8) als auch der Zweirohrdämpfer (ZRD) weisen prinzipbedingt relativ zueinander gleitende Kontaktstellen auf. Die Kolbenstange mit dem daran befestigten Kolben bewegt sich bei einer Federbewegung des Fahrzeugaufbaus relativ zum Dämpferrohr und dem darin befindlichen Fluid (Öl). Hierdurch strömt dieses Fluid durch federbelastete Ventile in Kolben- und, sofern vorhanden, Bodenventil und ermöglicht damit eine Energiedissipation sowie eine definierte, geschwindigkeitsproportionale Gegenkraft. Dabei tritt an den Kontaktstellen zwischen Kolbenstange und Dichtungs-Führungspaket, Dämpferkolben und Dämpferrohr sowie (nur bei ERD) zwischen Trennkolben und Dämpferrohr Reibung auf, da hier die relativ zueinander gleitenden Kontaktpunkte verortet sind. Diese Reibung kann sich negativ auf das Übertragungsverhalten von Schwingungen auswirken. Durch seine Einbaulage ist der Dämpfer Bestandteil der Übertragungstrecke (siehe Abb. 9 rechts) von Schwingungen höherer Frequenz, die sich als Vibrationen und/oder Geräusche (Noise, Vibration, Harshness - NVH) im Innenraum bemerkbar machen können und somit potentiell Einfluss auf den Komforteindruck des Fahrzeuges haben.

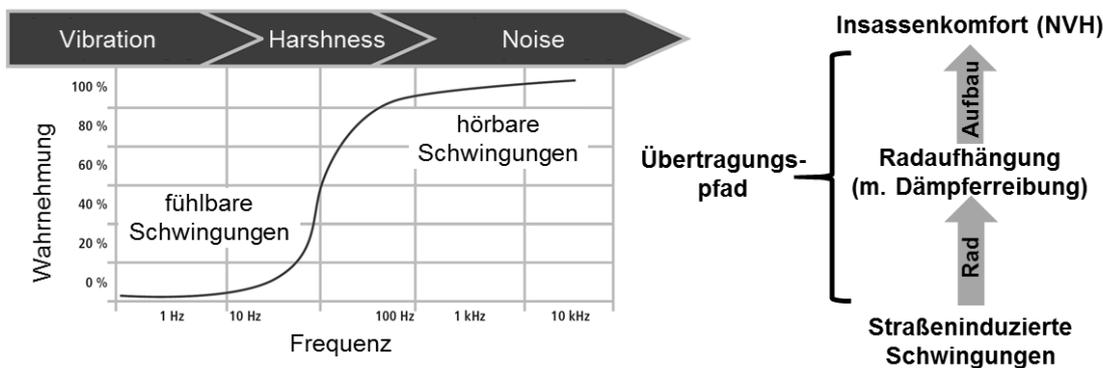


Abb. 9: Frequenzschaubild NVH [Tre, 2015] und Übertragungstrecke Fahrbahn-Insasse

Wie in Abb. 9 links erkennbar, werden Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen unterschiedlich wahrgenommen. Von ca. 20-100 Hz erstreckt sich der Harshnessbereich (Rauigkeit), welcher den Übergang zwischen rein fühlbaren Schwingungen < 20 Hz und rein hörbaren, >100 Hz darstellt. Durch eine Verhärtung der Übertragungstrecke infolge der Reibung im Dämpfer

können derartige Schwingungen besser übertragen bzw. weitere, in der Übertragungstrecke folgende Komponenten, mit entsprechenden Komfortbeeinträchtigungen zur Schwingung angeregt werden.

Bei der Reibung im Dämpfer handelt es sich um hydrodynamische bzw. elasto-hydrodynamische Reibung, da ein Schmierfilm zwischen den Reibpartnern besteht und diese, wie im Falle der Dichtung, elastisch sind. Für eine genaue Analyse und Charakterisierung der Reibung in Dämpfern werden an der Professur Fahrzeugsystemdesign Reibkraftmessungen an entsprechenden Bauteilen durchgeführt. Diese Messungen erfolgen auf einem servo-hydraulischen Prüfstand bei unterschiedlichen Randbedingungen und Anregungsparametern. Folgende Abbildung 10 zeigt einen Versuchsdämpfer zur Reibkraftmessung auf dem Prüfstand.

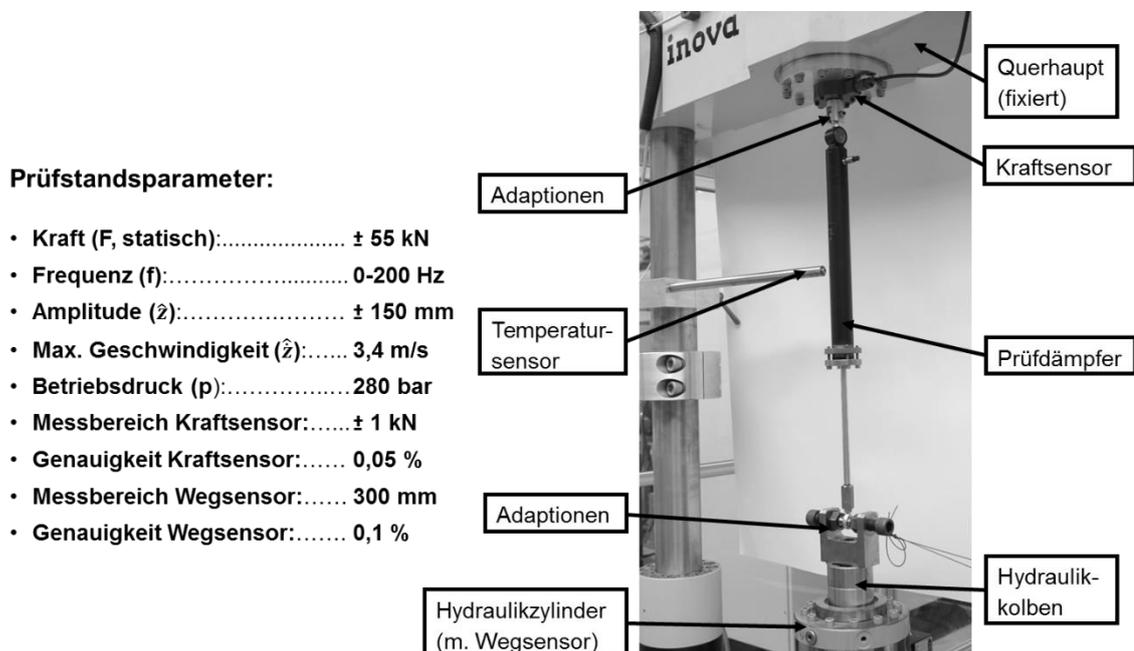


Abb. 10: Verwendeter Prüfaufbau und Prüfsparameter (Auswahl)

Auf dieser Anlage wird der Versuchsdämpfer zyklisch (i. d. R. sinusförmig) in Zug- und Druckrichtung bewegt und die aus dieser Bewegung resultierende Kraft mit diesem Zweck entsprechender Messtechnik erfasst. Die Messungen erfolgen an speziell hierfür präparierten Dämpfern. Zur Verhinderung des Quereinflusses der Dämpfkraft auf die Reibkraftmessung, insbesondere bei hohen Bewegungsgeschwindigkeiten, werden die Versuchsbauteile im Vorfeld geöffnet und das Dämpferöl größtenteils sowie die Ventilbeplattung komplett entfernt. Eine definierte Menge Öl verbleibt im Dämpfer, um die Schmierung der in Kontakt stehenden Bauteile, an denen die Reibung auftritt, zu gewährleisten. Ebenfalls aus diesem Grund wird der Dämpfer in umgekehrter Lage vermessen, damit die verbleibende Ölmenge am Dichtungspaket anliegt. Nach den genannten Veränderungen wird der Dämpfer verschlossen und der ursprüngliche Innendruck wiederhergestellt. Für Reibkraftmessungen über einem großen Geschwindigkeitsbereich wird der Dämpfer mit einer Amplitude von 25 mm und

schrittweise steigender Frequenz angeregt, so dass sich im Weg-Nulldurchgang der Schwingungen die gewünschten Bewegungsgeschwindigkeiten ergeben. Die Kraftmessung erfolgt ebenso im Weg-Nulldurchgang, wobei hier der Mittelwert aus mehreren Zyklen (geschwindigkeitsabhängig) ausgewertet wird. Bei derartigen Messungen der Reibkraft über einem großen Geschwindigkeitsbereich (analog zu einem Standard-Messprogramm für Pkw-Dämpfer) ergibt sich diese für einen handelsüblichen Mittelklasse-Einrohrdämpfer wie in der folgenden Abbildung (Abb. 11) zu sehen. Die Kompensation der Messwerte um 242,23 N erfolgt zum Ausgleich der infolge des Gasdrucks im Inneren des Dämpfers vorliegenden Gasausschubkraft, die Normierung auf den Kraftwert bei 100 mm/s erfolgt aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit mit weiteren Ergebnissen, auf die hier nicht eingegangen wird.

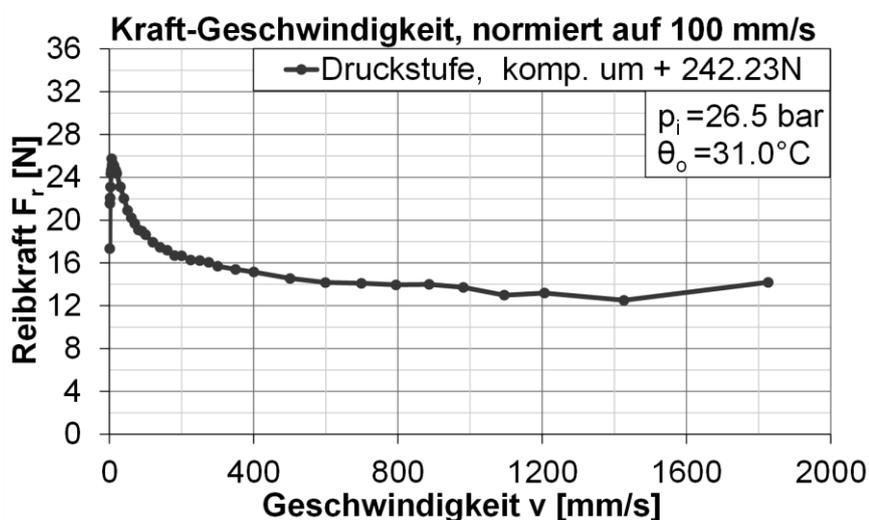


Abb. 11: Reibkraft über Relativgeschwindigkeit eines ERD, gaskraftkompensiert (normiert auf Kraft bei 100mm/s)

Gut zu erkennen ist hier der typische Kraftverlauf ähnlich einer Stribeck-Kurve, da es sich hier um einen gleitenden, hydrodynamischen Kontakt handelt. Dieser ist neben der Ölviskosität und weiteren Parametern von der Oberflächengeometrie der Reibpartner, speziell von Kolbenstange und Dämpferrohr, abhängig. Zu Fertigungszwecken werden hier in aller Regel beispielsweise Oberflächenrauheitswerte angegeben ( $R_t = 0,2 \mu\text{m}$ , [Rei, 2015]). Inwiefern die Reibung von der Rauigkeit oder der Oberflächengeometrie abhängig ist, ist ebenso Gegenstand aktueller Untersuchungen der Professur Fahrzeugsystemdesign, wie der Einfluss der Ölviskosität bzw. deren Temperaturabhängigkeit und die Auswirkungen substituierter Materialien der Reibpartner wie beispielsweise Dämpferrohre aus Aluminium Matrix Composites (AMC) o. Ä.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND FORSCHUNGSBEDARF

Sicherheitsrelevante Komponenten des Fahrwerks haben einen erheblichen Einfluss auf das Fahrerlebnis und den Komfort eines Fahrzeugs: z. B. Reifen, Radbremsen und Schwingungsdämpfer. Die geometrischen Anforderungen

gemäß Zeichnungsangabe gewähren oftmals noch nicht die seitens der Fahrzeughersteller geforderten Funktionseigenschaften im Gesamtfahrzeug, so dass weitere Präzisierungen per Lastenheft definiert werden. Defizite ergeben sich auch aus der etablierten Produktionsstrategie (vgl. Plattform-, Modul- und Baukastenstrategien) der Fahrzeughersteller mit unterschiedlichen Lieferanten innerhalb einer Prozesskette. Abhilfe kann hier durch zumindest eine systemische Entwicklung der Komponenten eines Moduls oder, aufgrund zunehmender Komplexität des Gesamtsystems Kraftfahrzeug, durch einen neuen Entwicklungsansatz [Mayer, 2019] geschaffen werden, wie er derzeit in einem Konsortium aus sieben Professuren der TU Chemnitz als Forschungsprojekt behandelt wird.

Leichtbau stellt mittlerweile eine Standardanforderung, auch im Bereich Fahrwerk, dar. Zusätzliche Forderungen ergeben sich aus den Umweltaspekten wie Verzicht auf Verchromung und Reduzierung von Reifenabrieb und Bremsstaub: neue Materialien wie Synthesekautschuk oder Hartmetallbeschichtungen auf Bremsscheiben stellen zusätzlichen Herausforderungen im Bereich Forschung und Vorentwicklung dar, die den bereits umfangreichen Lastenheftkatalog erweitern, ohne zulässige Abstriche bisheriger Eigenschaften.

## 6. QUELLEN

- [Bill, 2017] Breuer, B., Bill, K.: Bremsenhandbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [Leister, 2015] Leister, G.: Fahrzeugräder – Fahrzeugreifen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [Lem, 2010] Lembach, O., Mayer R.: Bremsscheibe für ein Fahrzeug, Europäische Patentschrift EP 2 746 613 B1, erteilt am 21.06.2017.
- [MAN, 2004] N.N.: Schulungsmaterial. MAN SE, München, 2004.
- [Mayer, 2007] Mayer, R.: Bremseninduzierte Schwingungen am Kraftfahrzeug – Analysemethodik und konstruktive Optimierung. Dissertation. VDI Verlag, Düsseldorf, 2007.
- [Mayer, 2019] Mayer, R.; Prochatzki, G.; Wagner, F.: Integrativer Entwicklungsansatz bei zukünftigen Fahrzeuganforderungen. Fahrzeuge von morgen 2019 -- Konzepte - Werkstoffe - Konstruktion, Frankfurt, 2019.
- [Michelin, 2005] Société de Technologie Michelin, Frankreich – Clermont-Ferrand, 2005.
- [Rei, 2015] Reimpell, J.; Betzler, J. W.: Fahrwerktechnik: Grundlagen. Vogel, Würzburg, 2015.
- [Tre, 2015] TrelleborgVibracoustic GmbH: Schwingungstechnik im Automobil. Vogel Business Media, Würzburg, 2015.



# ZWEI-PHOTONEN LASERLITHOGRAFIE ZUR INDIVIDUELLEN HERSTELLUNG VON NORMALEN FÜR DIE OPTISCHE RAUHEITSMESSTECHNIK

**Jörg Seewig<sup>1,2</sup>, Matthias Eifler<sup>1,2</sup>, Julian Hering<sup>1,3</sup>, Georg von Freymann<sup>1,3,4</sup>**

<sup>1</sup> Opti-Cal GmbH, 67663 Kaiserslautern, [info@opti-cal.de](mailto:info@opti-cal.de)

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik, Technische Universität Kaiserslautern

<sup>3</sup> AG Optische Technologien und Photonik, Technische Universität Kaiserslautern

<sup>4</sup> Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Kaiserslautern

---

*Abstract: Die zwei-Photonen Laserlithografie ist ein additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von Strukturen auf der Mikro- und Nanoskala. Mit dem Verfahren können nahezu beliebige Strukturen (auch mit Hinterschneidungen) in nahezu beliebiger Kombination auf einem Probenträger gefertigt werden. Damit lassen sich z. B. real gemessene Oberflächen mit künstlich errechneten Geometrieelementen fusionieren, um so eine anwendungsorientierte Kalibrierung optischer Messeinrichtungen zu erreichen. Durch die hohe geometrische Flexibilität der Fertigung können verschiedenste metrologische Eigenschaften mithilfe eines Normals abgebildet werden. Weiterhin ergibt sich die Möglichkeit, Kalibriernormale im Hinblick auf spezielle zu kalibrierende Messaufgaben hin auszulegen.*

**KEYWORDS:** KALIBRIERUNG, RAUHEITSMESSUNG, ADDITIVE FERTIGUNG, DIRECT LASER WRITING

---

## 1. EINFÜHRUNG UND STAND DER TECHNIK

Die zunehmende Verbreitung flächenhafter Topographie-Messgeräte führt dazu, dass auch neue Ansätze für die Kalibrierung und Justierung der entsprechenden Messgeräte erforderlich werden, um deren sicheren Einsatz im industriellen Umfeld zu gewährleisten. So werden aktuell im Rahmen der internationalen Normung die Vorschriften für die Kalibrierung flächenhafter Messgeräte teilweise noch erarbeitet. Die gesamte Normung wird dabei aus folgenden drei Aspekten bestehen:

- Die Normenserie DIN EN ISO 25178-60x [25178-600, 2017] legt die zu prüfenden Eigenschaften fest, welche als messtechnische Merkmale bezeichnet werden.
- Die Norm DIN EN ISO 25178-70 [25178-70, 2014] definiert Kalibriernormale, mit denen diese Eigenschaften abgebildet werden können.
- Die Normenserie DIN EN ISO 25178-70x [25178-700, 2016] befindet sich noch in Vorbereitung und wird die Methoden und Vorschriften beschreiben, mit denen Kalibrierprozesse ausgeführt werden.

Aufgrund einer im Vergleich zur profilhaften Topographiemessung höheren Anzahl von zu prüfenden Eigenschaften ist eine Vielzahl verschiedener Kalibriernormale erforderlich, deren Herstellung je nach Geometrie herausfordernd sein kann. Für verschiedene Typen von Normalen wurden unterschiedliche Fertigungsverfahren untersucht, u.a. Ultrapräzisionsdrehen [Krüger-Sehm, 2007], Ätzen [Frühau, 2005], Schleifen [Gatzen, 2001], Läppen [Frühau, 2012], Mikrofräsen [Nemoto, 2009] u.a. auch in Kombination mit Abformungsmethoden [Leach, 2014], Elektronenstrahlolithographie [Dai, 2019] oder die Fertigung mit fokussiertem Ionenstrahl (FIB) [Uchida, 2011].

Die Autoren untersuchten in verschiedenen Projekten u.a. die Eignung von Mikrofräsprozessen für Kalibriernormale, wobei dieser Prozess eine Bearbeitung harter, metallischer Werkstoffe ermöglicht [Eifler, 2018a]. Weiterhin wurde die Machbarkeit der additiven Fertigung mithilfe des sogenannten direkten Laserschreibens demonstriert [Eifler, 2018b], [Hering, 2018], [Eifler, 2018c].

## 2. ADDITIVE FERTIGUNG VON KALIBRIERNORMALEN

Das direkte Laserschreiben ist ein Fertigungsverfahren, welches sich für verschiedene Anwendungen in der Mikrofertigung etabliert hat [Hohmann, 2015]. Bei dem Fertigungsverfahren wird ein Femtosekunden-Laser in einem Photolack fokussiert, welcher hierdurch lokal ausgehärtet wird. Die Polymerisierung des Photolacks erfolgt punktwise, bis die gewünschten Strukturen ausgehärtet sind. Der noch flüssige Photolack wird anschließend von der Oberfläche des Substrats entfernt, so dass nur die gewünschten Strukturen auf dem Substrat zurückbleiben. Ein Überblick über verschiedene Anwendungen des Verfahrens ist in der Literatur zu finden [Hohmann, 2015].

Chen et al. führten 2013 eine Untersuchung zur Fertigung von Kalibriernormalen mit dem Verfahren durch. Die Autoren untersuchten mit dem Verfahren insbesondere, welche standardisierten Kalibriernormale hergestellt werden können [Eifler, 2018b]. Abbildung 1 stellt mithilfe von zwei Beispielen dar, dass sowohl profilhafte als auch flächenhafte Geometrien im Mikrometer-Bereich zuverlässig abgebildet werden können. Es handelt sich um ein Tiefeneinstellnormal mit rundem Rillengrund und einer Rillentiefe von  $6\ \mu\text{m}$  sowie eine gekreuzte Sinusstruktur mit einer Wellenlänge von  $20\ \mu\text{m}$  in beide laterale Richtungen sowie einer Amplitude von  $3\ \mu\text{m}$ .

Bei der Fertigung wird ein Photolack, wie beschrieben, auf einem Substrat ausgehärtet, so dass die gewünschten Strukturen als Polymer auf dem Substrat zurückbleiben. Die Größe der belichteten Voxel lässt dabei auch eine Strukturgröße bis in den Submikrometerbereich zu [Hering, 2018]. Nach der Fertigung erfolgt eine UV-Belichtung der Probe, um eine vollständige Aushärtung sicherzustellen [Hering, 2018]. Aufgrund der hohen Transparenz des Materials erfolgt im Anschluss eine Beschichtung mit  $30\ \text{nm}$  Iridium, um die Reflektivität, die für eine optische Messung der Oberfläche erforderlich ist, sicherzustellen.

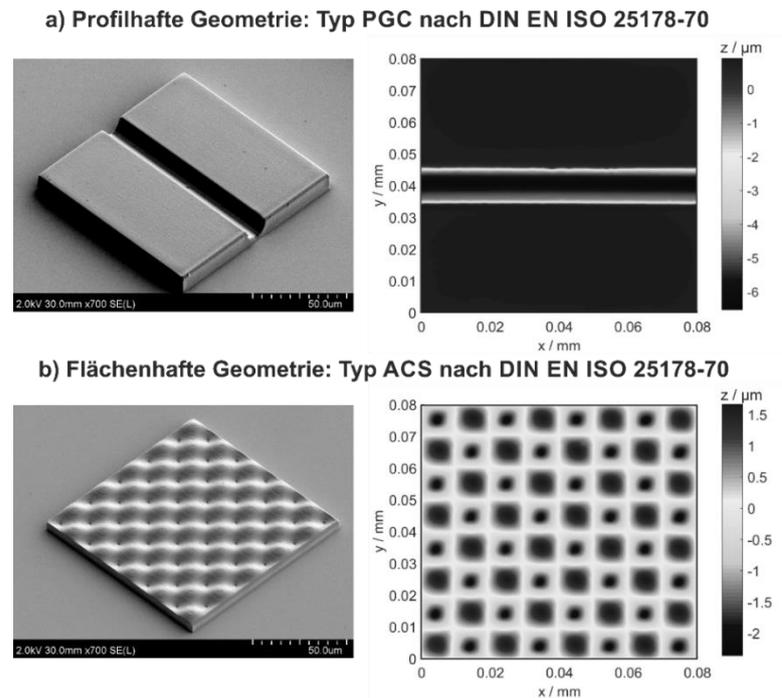


Abb. 1: Herstellung von Kalibriernormalen mittels direktem Laserschreiben – REM-Aufnahmen und Topographie-Messungen (Weißlichtinterferometer, 100x Vergrößerung)

In den Topographien lassen sich allerdings langwellige Artefakte feststellen, welche durch den optischen Fertigungsprozess, z. B. aufgrund von Vignettierung und Proximity-Effekt, hervorgerufen werden. Diese Artefakte sind z.T. nichtlinear und hängen u.a. von der zu fertigenden Struktur, dem eingesetzten Photolack sowie dessen Photochemie ab. Aus diesem Grund wurde zur Optimierung der Strukturgenauigkeit eine empirische Korrektur durchgeführt, die nachfolgend beschrieben wird.

### 3. OPTIMIERUNG DER STRUKTURGENAUIGKEIT

Um die Maßhaltigkeit der Normale weiter zu verbessern, wurden Strukturoptimierungen durchgeführt, wobei ein iteratives Vorgehen genutzt wurde, um für jede Struktur eine speziell auf die Geometrie abgestimmte Korrektur zu ermitteln und zu applizieren. Mit dem beschriebenen Vorgehen können Vignettierung und Proximity-Effekt iterativ verringert werden. Das hierzu erforderliche Vorgehen wurde in folgenden Schritten umgesetzt:

1. Messung des gefertigten Normalen.
2. Berechnung der Differenz zwischen gemessener Ist-Geometrie und Soll-Geometrie. Die bestmögliche Überlagerung erfolgt durch Maximierung des flächenhaften Korrelationskoeffizienten.
3. Entfernen der kurzwelligen Anteile aus der Differenztopographie durch Filteroperationen – Extraktion der langwelligen Gestaltabweichungen.

4. Addition der extrahierten Gestaltabweichungen auf die Daten für die Fertigung zur Kompensation der ganzheitlichen Differenz.
5. Zusätzliche optionale strukturspezifische Korrekturen, z. B. lokale Amplitudenkorrekturen.
6. Fertigung der korrigierten Struktur und Wiederholung des Vorgehens.

Durch die Optimierung erfolgt in mehreren Stufen eine Verringerung der Abweichungen zwischen Ist- und Soll-Oberfläche, indem eine Ermittlung dieser Abweichungen durchgeführt wird sowie eine anschließende Berücksichtigung in den Fertigungsdaten erfolgt. Typischerweise sind je nach Struktur 2-6 Iterationen ausreichend, um eine fast vollständige Kompensation der genannten Gestaltabweichungen zu erzielen.

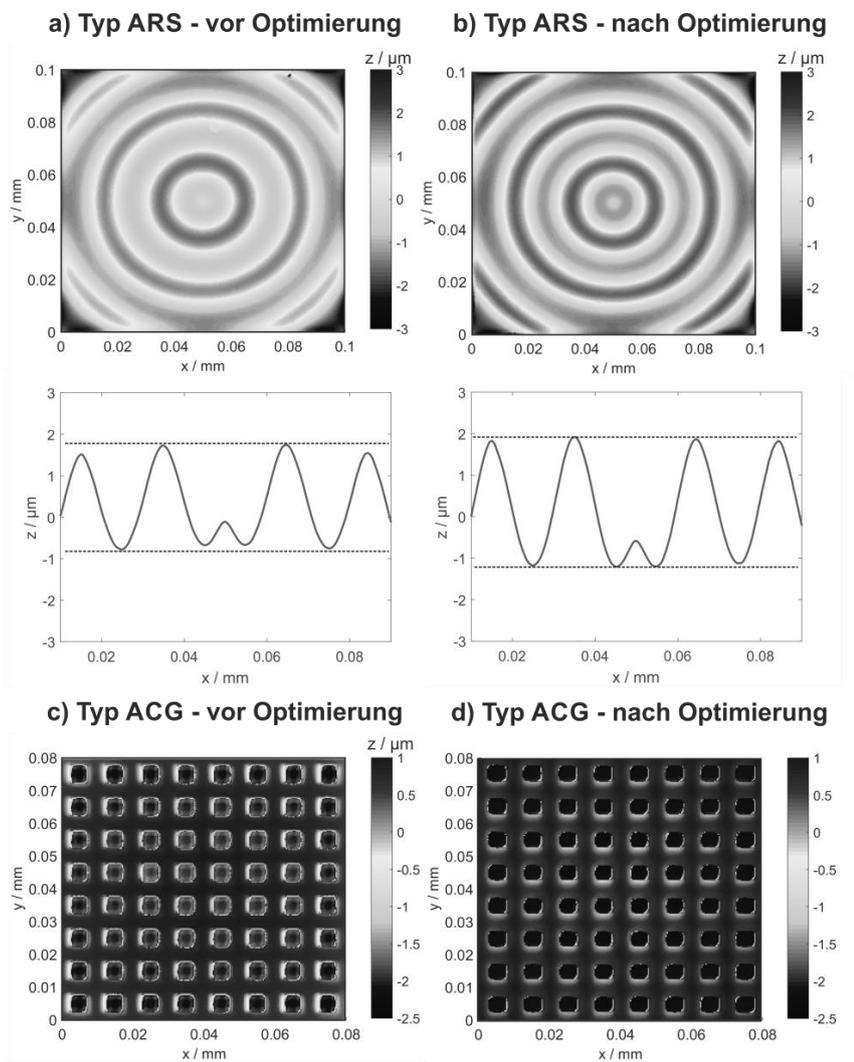


Abb. 2: Optimierung der Strukturgenauigkeit – Normale nach Typ ARS und Typ ACG nach DIN EN ISO 25178-70, Verringerung der langwelligen Gestaltabweichungen

Diese Optimierung wird in Abbildung 2 anhand von zwei Beispielstrukturen veranschaulicht. Abbildung 2a stellt die radiale Sinusstruktur (Normal nach Typ ARS in DIN EN ISO 25178-70) zunächst vor der Optimierung dar. Bei Extraktion

eines Profils aus der Mitte der Struktur wird deutlich, dass der Struktur eine Wölbung überlagert ist und die Amplitude der Sinuswelle nach außen hin abnimmt. Nach einigen Iterationen zur Korrektur lassen sich diese Effekte verringern (Abbildung 2b), was insbesondere bei der Betrachtung des extrahierten Sinusprofils sichtbar wird. Dabei stimmt die Amplitude nach der Korrektur deutlich besser mit dem Soll-Wert von 3  $\mu\text{m}$  überein und die Wölbung innerhalb der Struktur wurde erheblich reduziert. Ähnliche Ergebnisse lassen sich bei Optimierung des Kreuzgitters (Typ ACG nach DIN EN ISO 251758-70) feststellen: Abbildung 2c stellt die Struktur vor der Optimierung dar, wobei durch die Wölbung der Struktur signifikante Abweichungen zur ebenen Gitterstruktur existieren. Dabei ist zu beobachten, dass insbesondere das obere Plateau nach außen hin abfällt. Auch hier lässt sich durch eine iterative Korrektur eine deutliche Reduktion der Abweichungen erzielen, welche die Wölbung der Probe sowie die Abweichungen der Amplitude umfassen (Abbildung 2d).

Das genannte Vorgehen zur iterativen Optimierung der einzelnen Strukturen kann spezifisch für jede beliebige Struktur angewendet werden. So wurde dieses auch für jede Struktur des nachfolgend beschriebenen Universalnormals angewendet, um auch hier eine möglichst genaue Übereinstimmung zu den Soll-Daten zu erzielen.

#### **4. EIN UNIVERSALNORMAL ZUR KALIBRIERUNG METROLOGISCHER EIGENSCHAFTEN**

Nachdem die grundsätzliche Machbarkeit des direkten Laserschreibens zur Fertigung von Kalibriernormalen gezeigt wurde, wurde nicht nur eine Optimierung der Strukturgenauigkeit durchgeführt, sondern auch nachgewiesen, dass die resultierenden Kalibrierkörper eine ausreichende chemische Beständigkeit haben [Eifler, 2018c] und dass das Fertigungsverfahren die Auflösungsanforderungen für die Kalibrierung von Präzisionsmessgeräten erfüllen kann [Hering, 2018].

Auf dieser Basis wurde ein Universalnormal ausgelegt, welches sämtliche grundlegenden messtechnischen Merkmale nach DIN EN ISO 25178-600 mithilfe von nur einer Probe kalibrieren kann. Dazu werden verschiedene Kalibrierkörper auf einem Probenträger aufgebracht, wobei zusätzlich eine Skalierung erfolgt, um die Normale in verschiedenen Größen zur bestmöglichen Ausfüllung unterschiedlich großer Messfelder zur Verfügung zu stellen. Dabei wurde die beschriebene Strukturoptimierung ebenfalls für jede Skalierung einzeln durchgeführt, da auch hier ein nichtlineares Materialverhalten beobachtet werden kann. Die Artefakte sind von der lateralen Ausprägung abhängig, so dass bei der lateralen Skalierung für jede Strukturgröße eine separate iterative Korrektur erforderlich wird. Abbildung 3 gibt einen Überblick über das Design des Universalnormals. Zur zusätzlichen Kalibrierung der lateralen Achsen sind die größeren Strukturen mit Abmaßen von 400  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  sowie 800  $\mu\text{m}$  x 800  $\mu\text{m}$  mit einer Gitterstruktur überlagert.

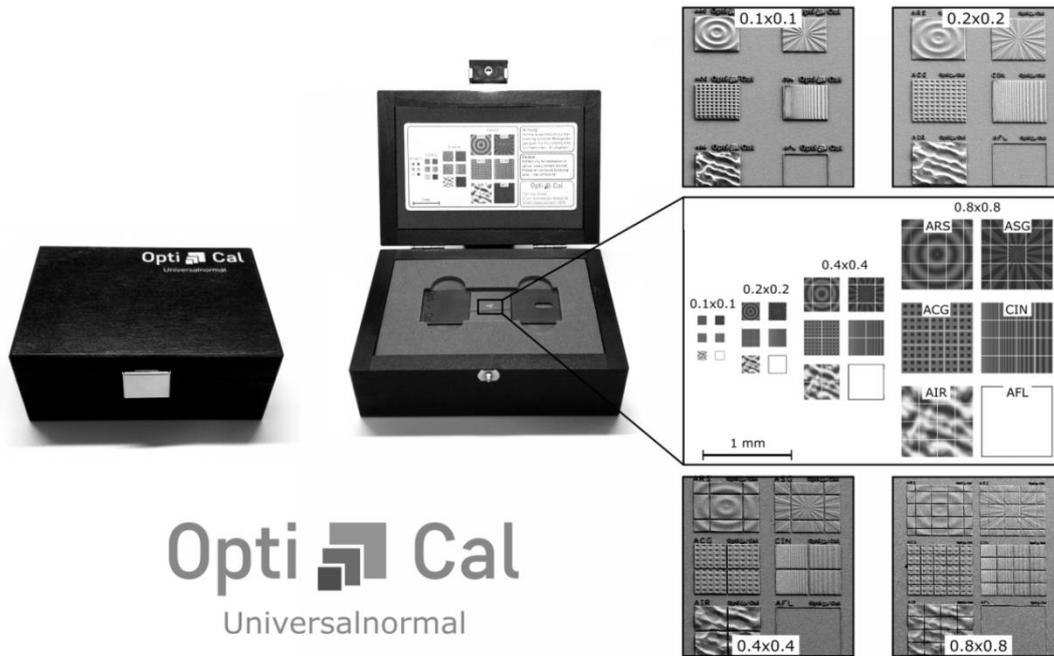
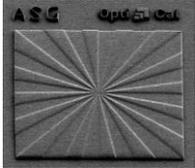
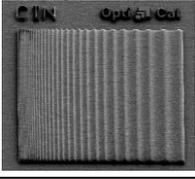
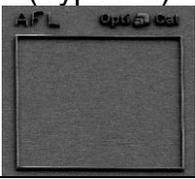
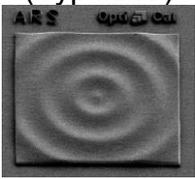
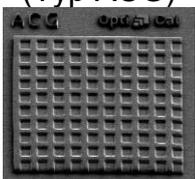
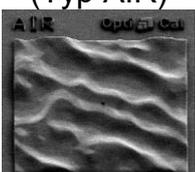


Abb. 3: Universalnormal zur Kalibrierung der grundlegenden messtechnischen Merkmale nach DIN EN ISO 25178-600: Das Universalnormal weist 24 Normale in 4 Größen auf.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die sechs enthaltenen Normale und die zugehörigen Eigenschaften, die mit ihnen abgebildet und überprüft werden können. Zur Einordnung der Strukturgrößen sind für die Größe der Normale von  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  weiterhin Informationen über die lateralen Größen sowie Amplituden der Strukturen angegeben. Die Amplituden werden dabei für alle lateralen Skalierungen konstant gehalten, nur die lateralen Ausprägungen werden linear variiert.

Mit einem Satz von Messungen lässt sich eine ganzheitliche Kalibrierung von optischen Topographie-Messgeräten ohne Wechseln der Probe durchführen. Durch die Anwendung des Universalnormals kann so für den industriellen Anwender eine signifikante Arbeits- und Zeitersparnis bei der Gerätekalibrierung erzielt werden. Damit wird durch eine anwenderfreundliche Umsetzung auch die Akzeptanz der zukünftigen umfangreichen Kalibriervorschriften erhöht.

Durch die hohe Design-Freiheit auf Basis des additiven Fertigungsprozesses können nahezu beliebige Oberflächen produziert werden. So kann wie in Abbildung 4 dargestellt z. B. eine irreguläre Oberfläche, die zur Kalibrierung der Höhenachse sowie zur Überprüfung des ganzheitlichen Messgeräte-Übertragungsverhaltens auf Basis flächenhafter Rauheitskenngrößen dient, ausgelegt und hergestellt werden. Die Oberfläche ist mit ihren Merkmalen an eine reale Bauteiloberfläche angelehnt. Abbildung 4a stellt dabei die Design-Daten dar und Abbildung 4b zeigt die gemessene Topographie eines Konfokalmikroskops mit einer  $100\times$  Vergrößerung, wobei eine hohe Übereinstimmung zu den Soll-Daten beobachtet werden kann. Entsprechend ist ersichtlich, dass eine zuverlässige Abbildung der realen Oberflächeneigenschaften für eine praxisnahe Kalibrierung möglich ist.

Normal	messtechnische Merkmale nach DIN EN ISO 25178-600	Erläuterung und Strukturgrößen für das Messfeld 100 µm x 100 µm
Siemens-Stern (Typ ASG) 	topographische räumliche Auflösung	Das Kriterium dient zur Beurteilung des lateralen Auflösungsvermögens. Eine Amplitude von 1 µm wird genutzt.
Chirp-Normal 	Genauigkeit der Topographie (Topographietreue)	Das Kriterium dient zur Beurteilung des lateralen Auflösungsvermögens. Es werden Wellenlängen von 9,46 µm – 0,47 µm mit einer Amplitude von 3 µm abgebildet.
Ebenheitsnormal (Typ AFL) 	Messrauschen, Ebenheitsabweichung	Durch Wiederholmessungen an identischer Position wird das Messrauschen ermittelt. Erfolgen Messungen an unterschiedlichen Stellen lässt sich die Ebenheitsabweichung berechnen.
Radialer Sinus (Typ ARS) 	-	Das Normal kann zur ganzheitlichen Überprüfung des Übertragungsverhaltens genutzt werden, in dem die flächenhaften Rauheitskenngrößen erfasst werden. Die Amplitude beträgt 3 µm bei einer Wellenlänge von 20 µm.
Kreuzgitter (Typ ACG) 	Laterale Verstärkungskoeffizienten und Linearitätsabweichungen, x-y-Abweichung	Das Normal ermöglicht eine ganzheitliche Überprüfung der lateralen Geräteachsen. Die Periodenlänge beträgt 10 µm, die Tiefe der Strukturen 3 µm.
Irreguläre Oberfläche (Typ AIR) 	Vertikaler Verstärkungskoeffizient und Linearitätsabweichung	Das Normal ermöglicht eine ganzheitliche Überprüfung der Höhenachse.

Tab. 1: Einzelnormale des Universalnormals sowie zugehörige messtechnische Merkmale zur ganzheitlichen Kalibrierung optischer Topographie-Messgeräte

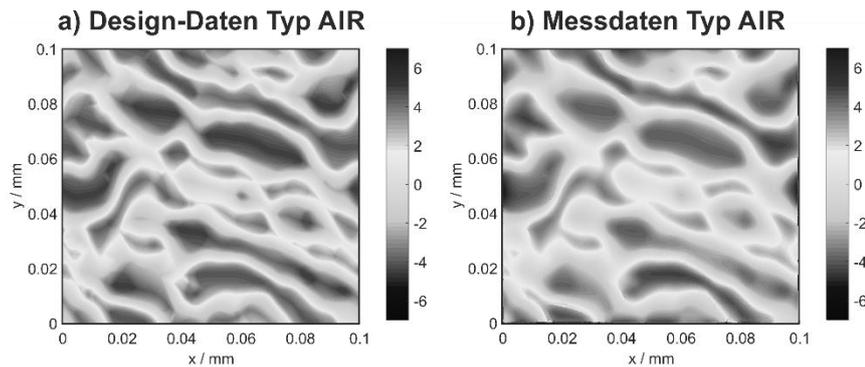


Abb. 4: Irreguläre Oberfläche (Typ AIR), Soll-Daten (a) sowie konfokal gemessene Daten (b) nach der Fertigung

## 5. FAZIT

Das direkte Laserschreiben bietet diverse Möglichkeiten zur Erzeugung flächenhafter Kalibriernormale. So wurde gezeigt, dass sowohl profilhafte als auch flächenhafte Kalibrierstrukturen auf einem Probenkörper aufgebracht werden können und so eine ganzheitliche Kalibrierung optischer Topographie-Messgeräte mit nur einer Probe ermöglicht wird. Dies stellt für den industriellen Anwender eine deutliche Verbesserung zum Stand der Technik dar und funktioniert für alle gängigen Mikroskopvergrößerungen. Durch eine Strukturoptimierung lassen sich hohe Strukturgenauigkeiten der gefertigten Kalibriernormale erzielen. Dabei können z. B. auch Kalibriernormale auf Basis realer Bauteiloberflächen ausgelegt und hergestellt werden.

## 6. QUELLEN

- [Dai, 2019] Dai, G.; Seeger, B.; Weimann, T.; Xie, W.; Hüser, D.; Tutsch, R.: Development of a novel material measure for characterising instrument transfer function (ITF) considering angular-dependent asymmetries of areal surface topography measuring instruments. Proc. of euspen's 19<sup>th</sup> International Conference & Exhibition, Bilbao, 2019, 516-519.
- [Eifler, 2018a] Eifler, M.; Klauer, K.; Kirsch, B.; Seewig, J.; Aurich, J.C.: Micro-milling of areal material measures - influences on the resulting surface topography. Procedia CIRP 71 (2018), 122-127.
- [Eifler, 2018b] Eifler, M.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: Manufacturing of the ISO 25178-70 material measures with direct laser writing: a feasibility study. Surface Topography: Metrology and Properties 6 (2018) 024010.
- [Eifler, 2018c] Eifler, M.; Hering, J.; von Freymann, G.; Seewig, J.: Calibration sample for arbitrary metrological characteristics of optical topography measuring instruments. Optics Express, 26 (2018), 13, 16609-16623.

- [Frühauf, 2005] Frühauf, J.; Krönert, S.; Wet etching of silicon gratings with triangular profiles. *Microsystem Technologies* 11 (2005), 1287–91.
- [Frühauf, 2012] Frühauf, J.; Krüger-Sehm, R.; Felgner, A.; Dziomba, T.: Areal roughness standards. *Proc. of euspen's 12<sup>th</sup> International Conference & Exhibition, Stockholm, 2012*, 133-136.
- [Gatzen, 2001] Gatzen, H.H., Kourouklis, C.: The fabrication of nano-roughness standards for the calibration of atomic force microscopes. *Proc. ASPE 16th Annual Meeting, Virginia, 2001*, 493-496.
- [Hering, 2018] Hering, J.; Eifler, M.; Hofherr, L.; Ziegler, C.; Seewig, J.; von Freymann G.: Two-photon laser lithography in optical metrology. *Proc. of SPIE Vol. 10544-12, San Francisco, 2018*.
- [Hohmann, 2015] Hohmann, J.H.; Renner, M.; Waller, E.H.; von Freymann, G.: Three-Dimensional  $\mu$ -Printing: An Enabling Technology. *Advanced Optical Materials* 3 (2015), 1488-1507.
- [Krüger-Sehm, 2007] Krüger-Sehm, R.; Bakucz, P.; Jung, L.; Wilhelms, H.: Chirp-Kalibriernormale für Oberflächenmessgeräte. *tm – Technisches Messen* 74 (2007) 11, 572-576.
- [Leach, 2014] Leach, R.; Giusca, C.; Rickens, K.; Riemer, O.; Rubert, P.: Development of material measures for performance verifying surface topography measuring instruments. *Surface Topography: Metrology and Properties* 2 (2014) 025002.
- [Nemoto, 2009] Nemoto, K.; Yanagi, K.; Aketagawa, M.; Yoshida, I.; Uchidate, M.; Miyaguchi, T.; Maruyama, H.: Development of a roughness measurement standard with irregular surface topography for improving 3D surface texture measurement. *Measurement Science and Technology* 20 (2009) 084023.
- [Uchidate, 2011] Uchidate, M.; Yanagi, K.; Yoshida, I.; Shimizu, T.; Iwabuchi, A.: Generation of 3D random topography datasets with periodic boundaries for surface metrology algorithms and measurement standards. *Wear* 271 (2011) 565-570.
- [25178-70] DIN EN ISO 25178-70: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 70: Maßverkörperungen. Beuth-Verlag, Berlin, 2014.
- [25178-600] DIN EN ISO 25178-600: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 600: Messtechnische Merkmale für flächentopographische Messverfahren. Beuth-Verlag, Berlin, 2019.
- [25178-700] ISO 25178-700.3: Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 700: Calibration and verification of areal topography measuring instruments, Working draft, 2016.



# UMFASSENDE TEXTURANALYSE AN ADDITIV GEFERTIGTEN BAUTEILEN

**Konrad L. Hoffmeier, Carl Bauer, Steffen Hahne**

Confovis GmbH, Entwicklung, hoffmeier@confovis.com, bauer@confovis.com,  
hahne@confovis.com

---

*Abstract: Die additive Fertigung (additive manufacturing) gewinnt gegenüber den konventionellen Fertigungsverfahren zunehmend an Bedeutung. Bei metallischen Bauteilen haben aktuell Verfahren die auf Pulver basieren den größten Anteil. Die dabei entstehenden Oberflächen sind sehr unregelmäßig und haben scharfe Vorsprünge und Aussparungen. Im Allgemeinen sind diese Oberflächen schwierig zu erfassen, insbesondere taktile Verfahren stoßen dabei an ihre Grenzen. Zur umfassenden Texturanalyse nach DIN ISO 25178 sind zudem flächenhafte Messdaten erforderlich. Die am meisten verwendeten optischen Verfahren sind Fokusvariation, konfokale Mikroskopie und Weißlichtinterferometrie. Die Charakterisierung der Oberfläche sollte mit Ihrer Funktion korrelieren. Die notwendige Nachbearbeitung (finishing) der additiv gefertigten Bauteile hat großen Einfluss auf die flächenhaften Parameter wie z. B. Spk, Ssk und Sdr. Zum Verständnis des additiven Fertigungsprozesses und zur Verifizierung der anwendungsspezifischen Anforderungen werden aktuell oft Teststrukturen eingesetzt. Dabei ist hauptsächlich die Oberflächentextur und Orientierung in Abhängigkeit der Fertigungsrichtung von Interesse. Die additive Fertigungsmesstechnik befindet sich noch in den „Kinderschuhen“. Sie wird diesen aber entwachsen und sich etablieren, wenn die Dauerfestigkeit in Abhängigkeit der Funktion nachgewiesen werden kann. Dazu ist es erforderlich die Wechselwirkung zwischen Dauerfestigkeit und Oberflächeneigenschaften zu quantifizieren.*

**KEYWORDS:** ADDITIVE MANUFACTURING, FOKUSVARIATION, KONFOKAL, RAUHEIT, OPTISCHE OBERFLÄCHEN MESSTECHNIK, TEXTURMESSUNG, ISO 25178

---

## 1. ANFORDERUNGEN DES MARKTES

### 1.1 Begriffsdefinition

Additive Fertigung (Additive Manufacturing, kurz AM) auch bekannt als 3D-Druck ist ein Sammelbegriff für verschiedenste Fertigungsverfahren, bei denen Material schichtweise aufgetragen und so dreidimensionale Werkstücke erzeugt werden. Typische Werkstoffe sind Kunststoffe, Kunstharze, Keramiken und Metalle. Im industriellen Umfeld sind vorrangig Verfahren die auf Metallpulvern basieren anzutreffen. Für die Erzeugung des Werkstückes wird keine Form (Gussform) benötigt. Das Werkstück wird direkt aus digitalen Modellen (CAD/ CAM) mittels sogenannter 3D-Drucker erzeugt. Diese schnelle und kostengünstige Fertigungsmethode hat Einzug in der Industrie, aber auch im Heim- und Unterhaltungsbereich gehalten. Verwendet werden die Verfahren zur Herstellung von Modellen, Mustern, Funktionsprototypen, Werkzeugen und Endprodukten. In diesem Paper liegt der Fokus auf Werkstücke, die aus Metallpulvern hergestellt wurden.

## 1.2 Vorteile

Ein Vorteil von AM besteht darin, dass es sehr komplexe Geometrien und interne Features erlaubt, welche mit konventionellen Verfahren nicht herstellbar sind. Dieser Vorteil ist hauptsächlich auf den notwendigen Werkzeugpfad konventioneller Verfahren zurückzuführen. Ein weiterer Vorteil ist das Potential zur Reduktion der Herstellzeit (time-to-market) sowie der Herstellungskosten durch Teilereduktion. Dadurch entfallen Rüst- und Montagezeiten.

## 1.3 AM Prozesskette

Alle AM Verfahren haben eine ähnliche Prozesskette, die grundlegend wie folgt aussieht:

- Fertigung des Rohlings
- Post Processing: Finishing der Oberfläche (optional)
- Beschichten der Oberfläche um gewünschte Eigenschaften herzustellen (optional)

Obwohl sich bei modernen Anlagen die Oberflächenqualität mittels der eingebrachten Leistung durchaus beeinflussen lässt, sind Nachbearbeitungsschritte für Funktionsoberflächen immer noch unabdingbar. Das sogenannte Finishing der Oberfläche wird meist mit konventionellen Fertigungsverfahren durchgeführt. Um gewisse Dauerfestigkeiten bzw. Verschleißschutz etc. zu erreichen, werden viele Funktionsoberflächen mit Hartschichten (Diamant, PKD, TLC) vergütet. Auch mit der notwendigen Nachbehandlung der Bauteile ist die Herstellung mittels AM immer noch kostengünstiger und effizienter.

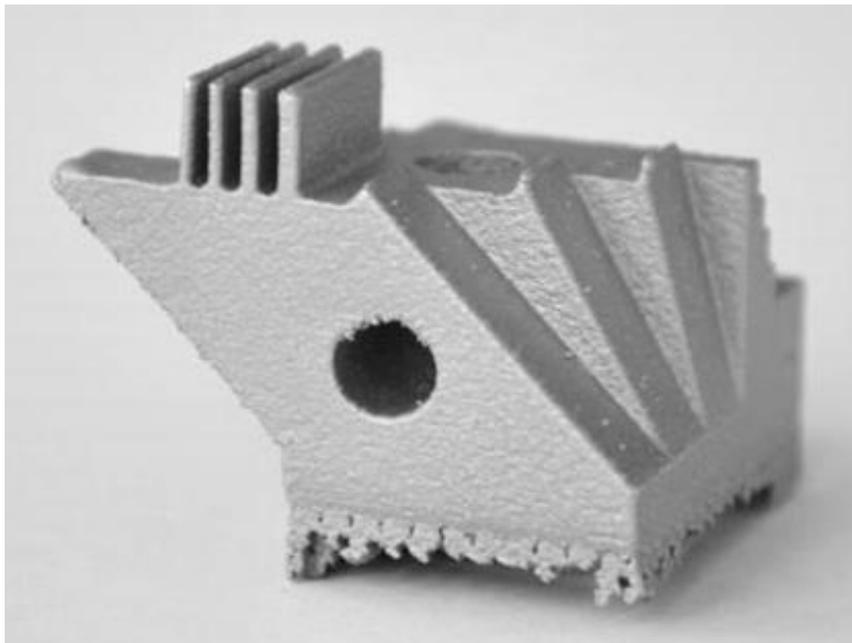


Abb. 1: Beispiel für additiv gefertigten Rohling

## 2. ERFÜLLUNG DER MESSAUFGABE

### 2.1 Textur der Oberfläche (Oberflächenbeschaffenheit)

Die Oberflächenmetrologie ist definiert als Messung und Charakterisierung von Oberflächentopographien. Typischerweise beschreibt die Topographie die Gesamtheit der geometrischen Oberflächeninformation. Diese wird unterteilt in Form und weitere Oberflächeninformationen, wie zum Beispiel Rauheit und Welligkeit, die hier zusammenfassend als Oberflächenbeschaffenheit oder Textur bezeichnet werden. Nach ISO 25178-2 [25178-2, 2012] ist die Oberflächentextur eine skalenbegrenzte Oberfläche, die nach Anwendung einer Serie von Operationen an der primären (gemessenen bzw. Lambda-S gefilterten) Oberfläche entsteht.

Die Oberflächen, die beim AM entstehen, sind sehr vielfältig. Die Oberflächen der AM-Rohlinge sind unregelmäßig, haben Vorsprünge, Aussparungen und Löcher. Durch nur teilweise zerschmolzenes Pulver entstehen steilen Gradienten. Die lateralen Ausdehnungen der zu betrachtenden Texturen decken mehrere Dekaden ab. Nachbearbeitete Oberflächen entsprechen in den meisten Fällen den Oberflächen der konventionellen Fertigung. Sie weisen Dreh- und Schleifriefen oder zufällig verteilte Strukturelemente auf, wie sie beim Läppen, Finishen oder Strahlen entstehen. Beschichtete Oberflächen sind meist sehr glatt, transparent oder schwarz, reflektieren also kaum Licht oder erzeugen optische Effekte. Sie können zudem Beschichtungsfehler aufweisen, wie z. B. Droplets oder Asperiten bei TLC Beschichtungen.

Die beschriebenen Messaufgaben und die sich ergebenden Anforderungen sind sehr unterschiedlich. Für die Messtechnik folgt daraus, dass eine hohe Messdatenqualität sichergestellt werden muss, um alle beabsichtigten Analysen zuverlässig und vollumfänglich durchführen zu können. Nicht jedes Messsystem bzw. Messverfahren ist für jede Messaufgabe geeignet. Für die Oberflächen der AM-Rohlinge eignet sich das Fokusvariationsmessverfahren. Damit können hohe Flankenwinkel und damit steile Gradienten an den Oberflächen gemessen werden. Durch die meist sehr große Rauheit ( $R_z > 10 \mu\text{m}$  nach [4287, 2010]) der Oberflächen ist dieses Verfahren, welches auf der Auswertung des lateralen Kontrastes in einem Bild beruht, sehr gut geeignet.

Polierte oder gehonte 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, da es nicht auf einem vorhandenen Objektkontrast beruht. Bei der *Structured Illumination Microscopy* (Mikroskopie mit Strukturierter Beleuchtung) wird ein Gitter phasenverschoben in die Probe projiziert und der Differenzkontrast bestimmt. Auf einem Planspiegel erreicht man auf diese Weise einen Kontrast von 100%.

## 2.2 Konfokalmessung (Structured Illumination Microscopy)

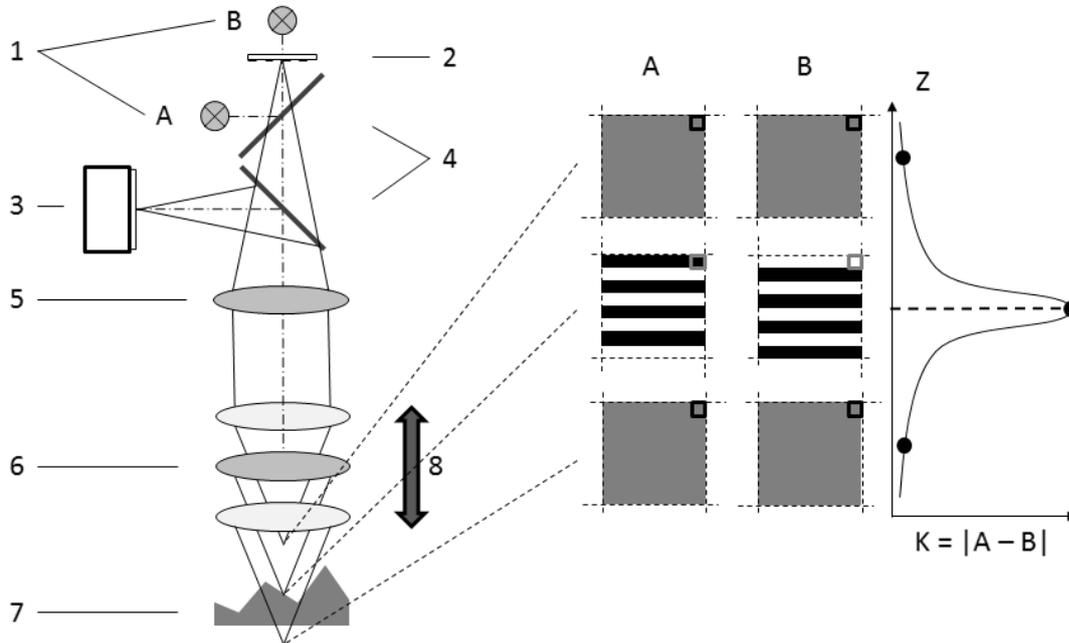


Abb. 2: Optische Elemente der Strukturierten Beleuchtung und Kontrastberechnung (1-LEDs, 2-Gitter, 3-Kamera, 4-Teilerspiegel, 5-Tubuslinse, 6-Objektiv, 7-Messobjekt, 8-Stellelement)

Bei der Messung im patentierten Konfokal-Modus „Structured Illumination Microscopy“ werden die beiden LEDs (1) abwechselnd betrieben. In definierten Z-Abständen (8) wird durch wechselseitige Beleuchtung des Gitters (2) in Reflexion (A) und Transmission (B) auf dem Messobjekt (7) ein Gittermuster projiziert, welches bei jedem Beleuchtungswechsel um  $180^\circ$  phasenverschoben ist. Befindet sich das Messobjekt im Fokus werden die Gittermuster scharf abgebildet und es ergibt sich ein starker Kontrast (K) zwischen den Einzelbildern. Außerhalb der Fokusebene wird das Gitter nicht scharf abgebildet, sodass zwischen den Einzelbildern nur ein sehr geringer Kontrast vorliegt. Die Höhe der Oberfläche wird durch das Maximum des Kontrastverlaufs für jedes Pixel bestimmt. [Patent, 2009]

## 2.3 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, welche sich im Fokus des Objektivs befinden.

Im Messprozess (Abb. 3) 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.

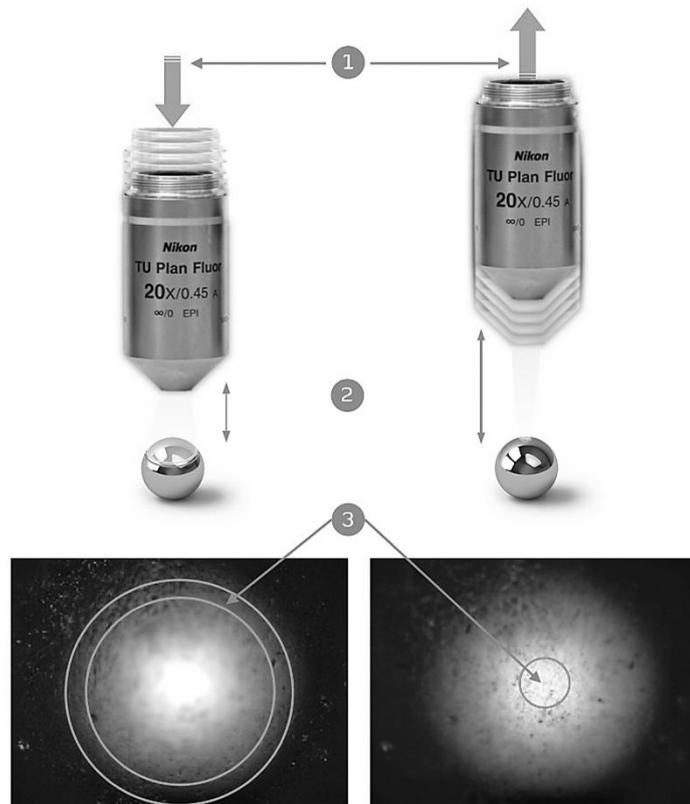


Abb. 3: Prinzip der Fokusvariations-Messung

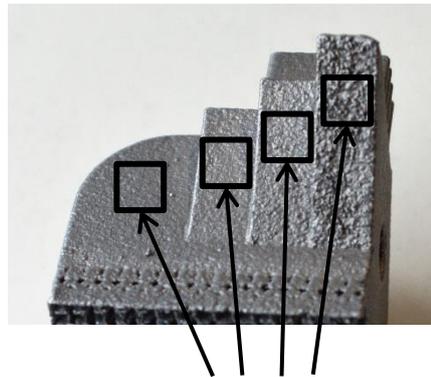
Die Schärfe der Abbildung, in Abhängigkeit von der Höhe, ermöglicht die Ermittlung der Höhe  $z$  für jeden Punkt auf der  $xy$ -Ebene. Diese Höheninformation kann dann für eine topographische Darstellung der gemessenen Oberfläche verwendet werden.

### 3. MESSDATENAUSWERTUNG

Bei der auf Normen rückführbaren Auswertung von Oberflächen hat sich die Software MountainsMap<sup>®</sup> des Herstellers Digital Surf durchgesetzt. Unabhängig von der Generierung der Messdaten kann MountainsMap<sup>®</sup> diverse Formate auswerten und umfangreiche Berichte erstellen. Dem Nutzer stehen dabei alle Parameter der ISO 25178-2 [25178-2, 2012] zur Verfügung. Die Norm bietet sowohl Amplitudenparameter ( $S_z$ ,  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ), räumlich Parameter ( $S_{al}$ ,  $S_{tr}$ ,  $S_{td}$ ) und hybride Parameter ( $S_{dq}$ ,  $S_{dr}$ ) als auch funktionsorientierte Parameter ( $S_{mr}$ ,  $S_{mc}$ ,  $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$ ,  $S_{Mr1}$ ,  $S_{Mr2}$ ,  $V_v$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{vc}$ ,  $V_m$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ). Zusätzlich stehen auch Qualitätskenngrößen, wie z. B. die Anzahl der nicht gemessenen Punkte in Prozent, zur Verfügung.

### 3.1 Rohling mit überhängenden Strukturen

Das Beispiel zeigt ein AM-Bauteil mit überhängenden Struktur unterschiedlicher Neigungswinkel. Deutlich zu erkennen ist der Zusammenhang zwischen Neigungswinkel und der Oberflächenbeschaffenheit. Prozessbedingt nimmt die mittlere Rauheit ( $S_a$ ) exponentiell mit dem Neigungswinkel zu.



Fläche: A, B, C, D

Abb. 4: Messstellen am Werkstück

Fläche A	Fläche B	Fläche C	Fläche D
$S_a = 8,33 \mu\text{m}$	$S_a = 9,07 \mu\text{m}$	$S_a = 14 \mu\text{m}$	$S_a = 53,8 \mu\text{m}$

Abb. 5: 3D Ansicht der Messungen und Ergebnisse

### 3.2 Nachbearbeitung durch Schleifen

Nachbearbeitungsschritte verändern die Oberflächen und damit vor allem die Amplitudenparameter erheblich. Sie eignen sich damit sehr gut zur Qualifizierung des Finishing-Prozesses, nachfolgend beispielhaft dargestellt am Prozess des Schleifens. Die Oberfläche des AM-Rohlings wurde durch mehrere Schleifprozesse bearbeitet.

In Abb. 6 (siehe Folgeseite) ist deutlich zu erkennen, wie die Spitzen, repräsentiert durch den Spk-Wert, abgeschliffen werden. Die Kernrautiefe  $S_k$  nimmt ab und der Traganteil der Oberfläche vergrößert sich. Diese Veränderungen sind auch in den dargestellten Abbott-Kurven sehr gut zu erkennen.

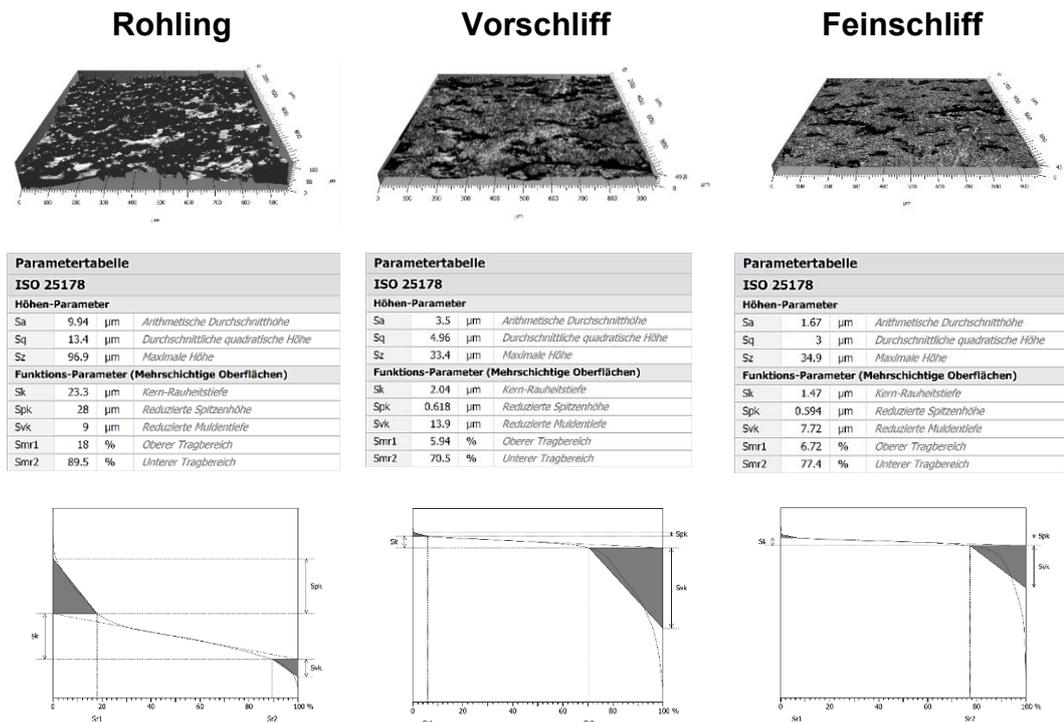


Abb. 6: Messungen, Parametertabellen und Abbott-Kurven vom Rohling sowie anschließenden Finishing-Prozessen

#### 4. FAZIT

Die Anforderungen an die Vermessung technischer Werkstückoberflächen steigen stetig. Neue Fertigungsverfahren, wie das Additive Manufacturing, stellen neue Herausforderungen an die Messtechnik. Die ISO 25178 bietet im Zuge dessen die Möglichkeit einer umfassenden Texturanalyse. 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 in Kombination mit der Fokusvariation, sehr gut geeignet.

#### 5. QUELLEN

[Patent, 2009] Confovis Patent EP 2 137 488 B1: Verfahren und Anordnung zur optischen Abbildung mit Tiefendiskriminierung, 2009.

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

[25178-2, 2012] EN ISO 25178-2:2010: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft, Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen. Beuth-Verlag, Berlin, 2012.



# GEOMETRISCHE OBERFLÄCHENCHARAKTERISIERUNG VON DURCH SPANENDE VERFAHREN HERGESTELLTEN MIKROSTRUKTUREN

**Roman Funke, Richard Börner, Andreas Schubert**

TU Chemnitz, Professur Mikrofertigungstechnik, andreas.schubert@mb.tu-chemnitz.de

---

*Abstract: Die zunehmende Leistungsdichte in technischen Systemen führt zu steigenden Anforderungen an die Bauteile und insbesondere deren Oberflächen. Die Eigenschaften der Oberfläche werden während der Endbearbeitung, abhängig vom eingesetzten Fertigungsverfahren, unterschiedlich beeinflusst. Eine Voraussetzung für die Auswahl und Gestaltung angepasster Fertigungsverfahren ist die Kenntnis funktionsrelevanter Oberflächeneigenschaften und deren Beschreibung anhand geeigneter Kenngrößen. Gegenüber den linienhaften Rauheitsparametern bieten die flächenhaften Oberflächenkenngrößen der Norm DIN EN ISO 25178 hierfür deutlich mehr Möglichkeiten. Diese sind jedoch wesentlich komplexer und erfordern beispielsweise die Festlegung von Bezugsgrößen. In diesem Beitrag werden Herausforderungen und Ansätze bei der geometrischen Beschreibung funktionaler Oberflächen aus den Bereichen Tribologie und Beschichtungstechnik beschrieben. Am Beispiel zweier Sonder-Fräsverfahren wird der Zusammenhang von Prozessparametern und Oberflächenfeingestalt an simulierten Oberflächenausprägungen beschrieben und unter Berücksichtigung der funktionalen Eigenschaften real gefertigter Oberflächen diskutiert. Hierbei wird aufgezeigt, dass bereits sehr kleine Veränderungen oder Abweichungen der Prozessparameter eine erhebliche Wirkung auf bestimmte Oberflächenkenngrößen besitzen können. Durch die kinematische Oberflächensimulation werden verschiedene Effekte sowohl visuell darstellbar als auch quantitativ beschreibbar. Somit kann der Einfluss auf die resultierenden Oberflächeneigenschaften und damit auch auf das Funktionsverhalten besser vorhergesagt und ggf. modifiziert werden.*

**KEYWORDS: MIKROSTRUKTURIERUNG, FUNKTIONALE OBERFLÄCHE,  
ULTRASCHALLSCHWINGUNGSÜBERLAGERTES FRÄSEN, DREHFRÄSEN**

---

## 1. EINLEITUNG & MOTIVATION

Die Funktion eines Bauteils wird erheblich von der Geometrie seiner Oberfläche sowie den physikalisch-chemischen Eigenschaften der oberflächennahen Randschicht bestimmt. Diese Eigenschaften werden während der Endbearbeitung des Bauteils erzeugt bzw. verändert und variieren in Abhängigkeit des eingesetzten Fertigungsverfahrens sowie der Prozessparameter. In diesem Beitrag soll die Geometrie der Oberfläche im Vordergrund stehen. Eine Herausforderung in der Fertigungstechnik besteht darin, die funktionsrelevanten geometrischen Eigenschaften einer Oberfläche einerseits zu bestimmen und andererseits geeignete Kennwerte für deren Beschreibung zu definieren, um im Fertigungsprozess gezielt Einfluss darauf nehmen zu können. Die Geometrie einer Bauteiloberfläche lässt sich in die Oberflächenfein- und -grobgestalt unterteilen. Die Oberflächengrobgestalt umfasst Maß-, Form- und Lageabweichungen sowie Makrorisse.

Zur Oberflächenfeingestalt zählen die Welligkeit und die Rauheit. Zur Charakterisierung der Bauteilfunktion sind linienhafte Kennwerte wie  $Rz$  und  $Ra$  jedoch nicht oder nur beschränkt zielführend [Dietzsch, 2009]. Eine deutliche Erweiterung der Möglichkeiten zur funktionsbezogenen Beschreibung geometrischer Oberflächeneigenschaften bilden die flächenhaften Kenngrößen der Norm DIN EN ISO 25178. Diese sind jedoch wesentlich komplexer, was sowohl die Algorithmen zu deren Bestimmung als auch das allgemeine Verständnis ihrer Bedeutung betrifft. Darüber hinaus erfordern sie beispielsweise die Festlegung von Bezugsparametern (z. B. flächenhafter Materialanteil  $p$  bei  $Vm(p)$  oder Höhenfilter bei der Motivanalyse). Zwar ist es teilweise möglich, Korrelationen zwischen genormten Oberflächenkenngrößen und der Bauteilfunktion nachzuweisen, jedoch stehen diese meist im Zusammenhang mit einem bestimmten Fertigungsverfahren. Beispielhaft zu nennen sind hier die Makrodrallkenngrößen für Dichtringgegenlaufflächen, die sich in erster Linie auf geschliffene Oberflächen beziehen, sowie die Rauheitskennwerte  $Spk$ ,  $Sk$  und  $Svk$ , mit denen die tribologischen Eigenschaften gehonter Zylinderlaufflächen beschrieben werden. Eine Übertragung der Aussagekraft dieser Kennwerte bezüglich der Funktion einer Oberfläche, die mit einem anderen Fertigungsverfahren erzeugt wurde, ist nicht auszuschließen, aber auch nicht grundsätzlich gegeben. Die geometrische Beschreibung der Oberflächen erfolgt deshalb auch in diesem Beitrag immer unter Berücksichtigung des jeweiligen Fertigungsverfahrens.

## 2. OBERFLÄCHENFUNKTIONALISIERUNG DURCH SPANENDE VERFAHREN

### 2.1 Zielstellung und Herangehensweise

Neben der Bauteilgeometrie bestimmen vor allem die angestrebte Funktionalität bzw. die daraus resultierenden Anforderungen an die Bauteiloberfläche die Auswahl und Gestaltung eines geeigneten Fertigungsverfahrens. An zwei Beispielen soll dies näher erläutert werden. In Stirnpressverbindungen wird eine hohe Haftreibung der Oberflächen angestrebt. Um dies zu erreichen, sind erhabene Mikrostrukturen großer Härte an einem der Reibpartner notwendig, die in die Oberfläche des weicheren Gegenkörpers eindringen und so einen Mikroformschluss erzeugen. Die industrielle Umsetzung erfolgt derzeit beispielsweise durch den Einsatz von Beschichtungen mit eingebetteten Hartstoffpartikeln oder die Erzeugung von Schmelzaufwürfen mittels Laserablation [Flores, 2016]. Das Drehfräsen mit angestelltem Werkzeug bietet das Potenzial einer Mikrostrukturierung der Oberfläche direkt während der Endbearbeitung. Hierdurch kann auf zusätzliche Prozessschritte verzichtet werden. Ein zweites Anwendungsbeispiel sind technische Oberflächen, auf denen CVD-Diamantschichten, bspw. zum Zwecke des Verschleißschutzes, abgeschieden werden. In diesem Fall besteht das Ziel der Mikrostrukturierung in der Gewährleistung bzw. Verbesserung der Schichthftung. Hierbei sollen die Effekte der elastischen Verformung beim Abkühlen des Schicht-Substrat-Verbundes ausgenutzt werden, um die hohen thermisch induzierten

Eigenstressen innerhalb der Diamantschicht zu kompensieren. Dabei wird der Einfluss der geometrischen Beschaffenheit der Mikrostrukturen auf die Haftung allgemein sowie die resultierenden Eigenstressen in Bezug auf die Schichtdicke analysiert. Insbesondere sollen die Verteilung der Eigenstressen sowie die Absolutbeträge für geometrisch unterschiedliche Substratoberflächenfeingestalten genau beschrieben werden. Die Oberflächenauslegung erfolgt auf Grundlage der Kennwerte stochastischer Oberflächen, welche durch das Verfahren Partikelstrahlen erzeugt werden. Diese werden bislang zur Gewährleistung der Haftung von CVD-Diamantschichten auf Stahlsubstraten eingesetzt, allerdings nur bis zu sehr geringen Schichtdicken von max. 2  $\mu\text{m}$ . Anhand ausgewählter Kenngrößen wurden relevante geometrische Merkmale dieser Oberflächen abgeleitet und auf deterministische Mikrostrukturen übertragen, welche insbesondere durch ultraschall-schwingungsüberlagertes Fräsen (USF) hergestellt werden können.

## 2.2 Kinematische Grundlagen der betrachteten Fräsverfahren

Das Drehfräsen ist eine Kombination aus den Fertigungsverfahren Drehen und Fräsen. Die Kinematik der hier vorgestellten Verfahrensvariante ähnelt der des Plandrehens, Abb. 1 a). Statt eines starren Werkzeugs kommt jedoch ein rotierender Schafffräser zum Einsatz, der mit einem Neigungswinkel  $\beta$  gegenüber der Stirnfläche des Werkstücks angestellt ist. Analog zum Fräsen bestimmt die Werkzeugdrehzahl  $n_{WZ}$  die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  und es kommt zu einem unterbrochenen Schnitt. Die Vorschubbewegung des Werkzeugs resultiert aus der Werkstückrotation ( $n_{WS}$ ) und einer translatorischen Vorschubbewegung des Werkzeugs in Richtung Werkstückachse ( $v_{f,rad}$ ). Pro Werkstückumdrehung legt das Werkzeug den radialen Vorschub  $f_{rad}$  zurück. Entlang dieser spiralförmigen Werkzeugbahn entstehen durch den unterbrochenen Schnitt deterministische Strukturen mit dem Abstand des Zahnvorschubs  $f_{z,tan}$ , die als Facetten bezeichnet werden. Das Oberflächenprofil in Vorschubrichtung weist die kinematische Rauheit  $R_{f,tan}$  auf. Als weitere Kenngröße dient der Profilspitzenwinkel  $\alpha_{pt}$ , welcher von der Geometrie der Schneidenecke abhängig ist.

Das schwingungsüberlagerte Planfräsen im Ultraschallbereich (ab Frequenzen von ca. 18 kHz) in Richtung der Werkzeugachse kann sowohl mittels angeregtem Werkzeug als auch Werkstück erfolgen. Für die Anregung des Werkzeugs ist eine entsprechend komplexe Spindelerweiterung notwendig, während die Anregung von Werkstücken vergleichsweise einfacher über berechenbare, resonante Systeme realisiert werden kann. Unabhängig von der Art der eingekoppelten Schwingung folgt die Werkzeugschneide einem definierten Pfad. Dieser resultiert aus der sinusförmigen Bewegung in Richtung der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  (Abb. 1 b) sowie der Zykloidenbahn, welche die Drehzahl  $n_{WZ}$  des Werkzeugs über einem translatorischen Vorschub  $f_z$  wiedergibt. Diese Trajektorie ist mathematisch eindeutig berechenbar. Zur erweiterten Beschreibung von mittels USF mikrostrukturierten Oberflächen eignen sich bspw. die Parameter Wellenlänge  $\lambda$  und Amplitude  $A_{US}$ , welche Strukturbreite bzw. -abstand (in Richtung der Schnittgeschwindigkeit) sowie

Profilhöhe wiedergeben und durch ein Aspektverhältnis (Strukturhöhe zu -breite) ausgedrückt werden können. Außerdem ist ebenso eine kinematische Rauheit in Vorschubrichtung errechenbar. Bei der Oberflächenauslegung sind die Randbereiche sowie ein potentieller Nachschnitt nicht zu vernachlässigen bzw. bei einer entsprechenden Prozessauslegung zu berücksichtigen.

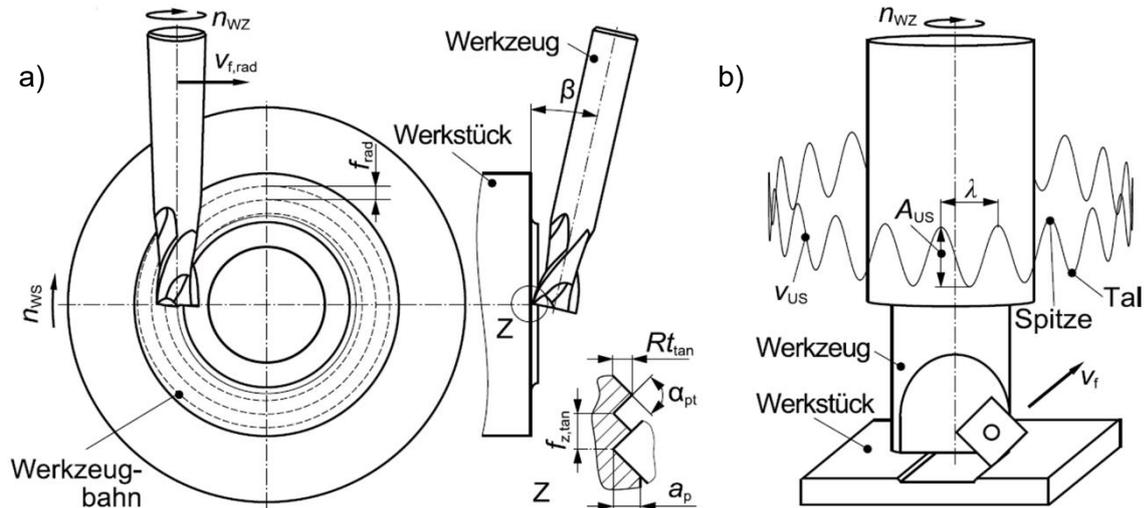


Abb. 1: Kinematik beim Drehfräsen (a) und ultraschallschwingungsüberlagerten Planfräsen (b)

	Spanwinkel	Freiwinkel	Eckenradius	Eckenwinkel
Drehfräsen	5°	14°	nominal „spitz“	90°
US-Fräsen	0°	40°	30 $\mu$ m	90°

Tab. 1: Geometrische Kenngrößen der verwendeten Werkzeuge

### 2.3 Zusammenhang zwischen Prozessparametern, resultierender Oberfläche und Funktionsverhalten

Die Wirksamkeit der mittels Drehfräsen erzeugten Mikrostrukturierung zur Erhöhung der Haftreibung wurde bereits nachgewiesen [Funke, 2016 und 2018]. Für die Materialpaarung 42CrMo4+QT (drehgefräst) mit C45 (gedreht) konnte ein Haftreibungskoeffizient von bis zu  $\mu_{0,1^\circ} = 0,6$  erzielt werden. Dieser liegt in der Größenordnung der mittels Beschichtungen oder der Laserstrukturierung erzeugten Werte. Experimentelle Untersuchungen, bei denen die Schneideneckengeometrie und die beiden Vorschubkomponenten  $f_{rad}$  und  $f_{z,tan}$  variiert wurden, zeigen einen qualitativen Zusammenhang zwischen der Oberflächenfeingestalt und dem Haftreibungskoeffizienten. Für eine festgelegte Werkzeuggeometrie führt eine durch die Veränderung des Vorschubs hervorgerufene Erhöhung des Spitzenmaterialvolumens  $V_{mp}$  tendenziell zu einer Steigerung des Haftreibungskoeffizienten. Ein werkzeugübergreifender Vergleich zeigt jedoch Unterschiede hinsichtlich der Größenordnung der gemessenen Werte für  $V_{mp}$ . Demnach stellt sich die Frage nach einer Vorgehensweise zur Festlegung der zur Bestimmung von  $V_{mp}$  notwendigen Bezugsgröße Materialanteil  $p$ . Einen Ansatz hierfür bildet die Gleichsetzung von  $p$  mit der realen Kontaktfläche, die sich beim Aufbringen einer Normalkraft  $F_N$

zwischen den beiden Probekörpern ergibt. Diese entspricht einer gedachten Schnittebene durch die Profilspitzen des mikrostrukturierten Körpers, deren Lage mit der Oberfläche des unstrukturierten Gegenkörpers übereinstimmt. Anpressversuche mit polierten Gegenkörpern zeigen jedoch, dass die reale Kontaktfläche mit dieser Methode nicht wiederholbar genau ermittelt werden kann. Hierzu sind weitere Untersuchungen vorgesehen.

Um den Einfluss der Substratoberflächenfeingestalt hinsichtlich ihrer Funktionswirkung auf die Eigenspannungsverteilung der darauf applizierten CVD-Diamantschichten zu validieren, wurden unter Variation der Eingangsparameter Strukturabstand und Amplitude fünf verschiedene Mikrostrukturvarianten experimentell erzeugt. Dies erfolgte durch ultraschallschwingungsüberlagertes Planfräsen eines Stahlwerkstoffs, welcher anschließend beschichtet wurde. Die Auswertung der Eigenspannungen erfolgte mittels Raman-Spektroskopie an 100 Einzelmesspunkten. In Abb. 2 ist der Einfluss der Mikrostruktur auf die Spannungsverteilung bei 10  $\mu\text{m}$  dicken Diamantschichten deutlich zu erkennen: Es treten sowohl unterschiedliche Verteilungen sowie Absolutbeträge der Eigenspannungen in Abhängigkeit der Muster auf. Auffällig ist der Trend, dass eine gleichmäßigere Verteilung sowie geringere Beträge der Eigenspannungen mit größerem Aspektverhältnis und steigenden Strukturabständen eintreten. Diese Erkenntnisse lassen darauf schließen, dass eine Modifizierung der Ausprägung von Eigenspannungen und somit eine direkte Einflussnahme auf die Haftung der CVD-Diamantschichten mittels einer gezielten Variation der geometrischen Substratoberflächeneigenschaften möglich ist.

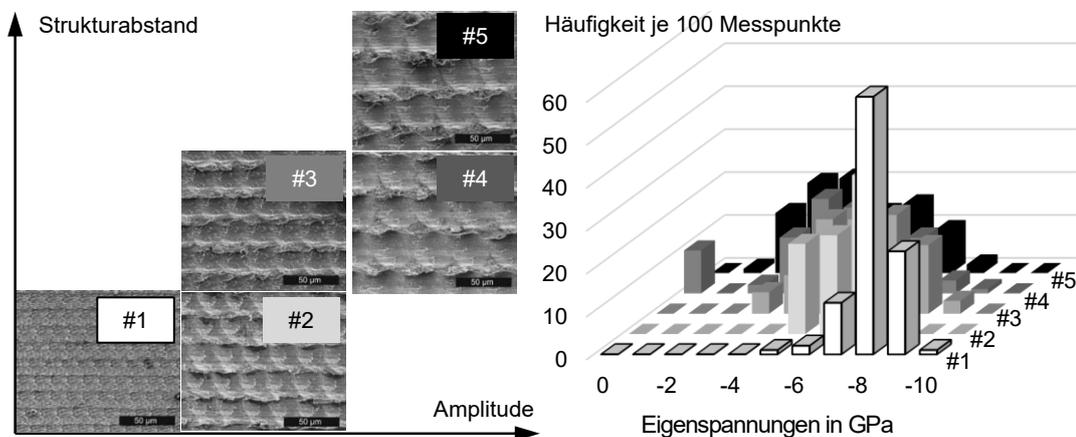


Abb. 2: Variation von Strukturabstand und Amplitude der fünf verschiedenen Substratoberflächenfeingestalten sowie Eigenspannungsverteilung über die verschiedenen Varianten bei 10  $\mu\text{m}$  Schichtdicke (gemessen mittels Raman-Spektroskopie)

## 2.4 Kinematische OF-Simulation

Um beispielsweise Überlagerungseffekte bei deterministischen Mikrostrukturen, welche durch Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide hergestellt werden, bereits vor der Fertigung zu erkennen oder Oberflächen mit bestimmter Feingestalt gezielt auszulegen und damit auch die notwendigen Prozessinformationen zu generieren, wurde ein kinematisches

Oberflächensimulationstool an der Professur Mikrofertigungstechnik entwickelt (siehe u. a. [Börner 2017, 2018 und 2019]). Dabei werden in MATLAB zur Berechnung der resultierenden Oberflächenfeingestalt virtuelle Werkzeuge entlang der mathematisch definierten Trajektorien mit den ebenfalls virtuellen Werkstücken verschnitten. Diese werden jeweils durch das Dixel-Modell in einer geeigneten Variante volumetrisch repräsentiert. Das entwickelte Oberflächensimulationstool ermöglicht die Integration beliebiger Werkzeugpfade (bspw. auch Plan- oder Längsdrehen) sowie -geometrien. Es können neben durch CAD-Konstruktion erstellten Werkzeugkörpern auch mittels 3D-Laserscanning-Mikroskopie erfasste reale Schneidkanten implementiert werden. Die Datenausgabe der simulierten Oberfläche erfolgt in Form einer Punktwolke, welche in der Oberflächenanalysesoftware MountainsMap® weiterverarbeitet werden kann.

### 3. OBERFLÄCHENANALYSE UND AUSWERTUNG

Für das Drehfräsen wurde mit Hilfe der kinematischen Oberflächensimulation der Einfluss des Zahnvorschubs  $f_{z,tan}$  auf die Oberflächenfeingestalt untersucht (Abb. 3). Es ist erkennbar, dass eine Veränderung des Zahnvorschubs im einstelligen Mikrometerbereich bei sonst identischen Prozessparametern bereits eine signifikante Veränderung der Oberflächenfeingestalt bewirkt. Durch die Überlagerung der Einzelfacetten kommt es zur Ausbildung regelmäßig angeordneter, kammförmiger Oberflächenstrukturen, die sich in ihrer Höhe deutlich von umliegenden Oberflächenbereichen abheben. Zerspanungsversuche bestätigen diesen Effekt. Beim Kontakt mit einem Gegenkörper mit hinreichend geringer Rauheit findet eine Berührung somit zunächst nur an den Spitzen dieses Profils statt. In diesen Mikrokontakten kommt es mit zunehmender Normalkraft zur elastischen bzw. plastischen Verformung. Wird ein ausreichend großer Härteunterschied zwischen den beiden Bauteilen sichergestellt, dringen die härteren Mikrostrukturen in die Oberfläche des weicheren Gegenkörpers ein und erzeugen somit eine Art Mikroformschluss.

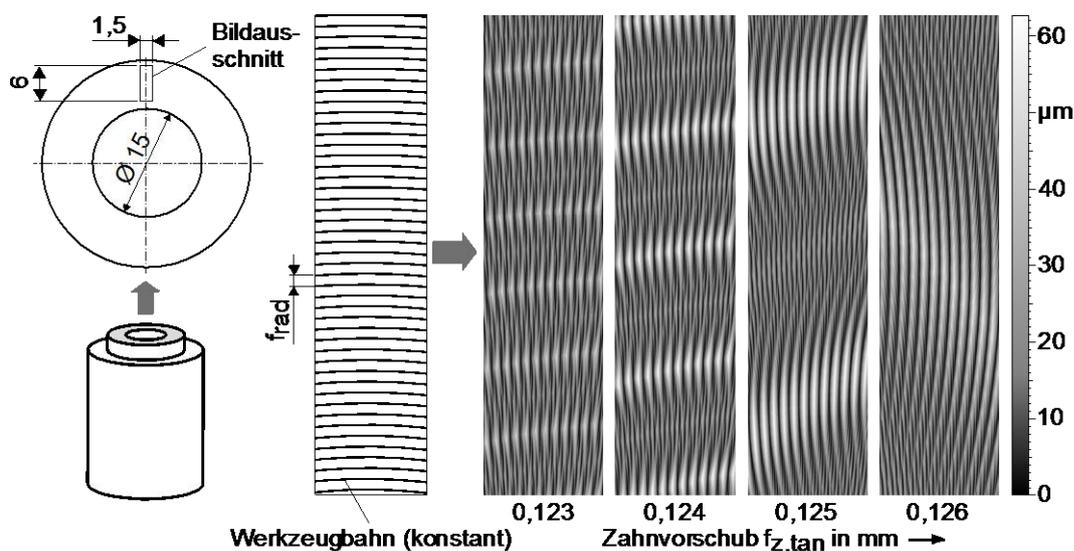


Abb. 3: Einfluss des Zahnvorschubs  $f_{z,tan}$  auf die Oberflächenfeingestalt beim Drehfräsen

Die Festlegung eines geeigneten Auswertebereichs der Oberfläche wird durch diese Heterogenität jedoch erschwert. Gemäß der Norm DIN EN ISO 25178 sollte der Auswertebereich quadratisch sein und mindestens fünf sich wiederholende Strukturelemente in jeder Richtung aufweisen. Werden die Kammstrukturen als entsprechende Elemente bewertet, resultiert daraus ein vergleichsweise großer Messbereich. Während dies bei der Simulation kaum ins Gewicht fällt, kommt es bei der messtechnischen Erfassung am Realbauteil zu einem überproportional hohen Zeitaufwand. Für die Ermittlung der Oberflächenkenngrößen in diesem Beitrag wurde ein rechteckiger Auswertebereich von  $(2 \times 9) \text{ mm}^2$  festgelegt. Eine Auswahl der ermittelten Kenngrößen ist in Abb. 4 dargestellt.

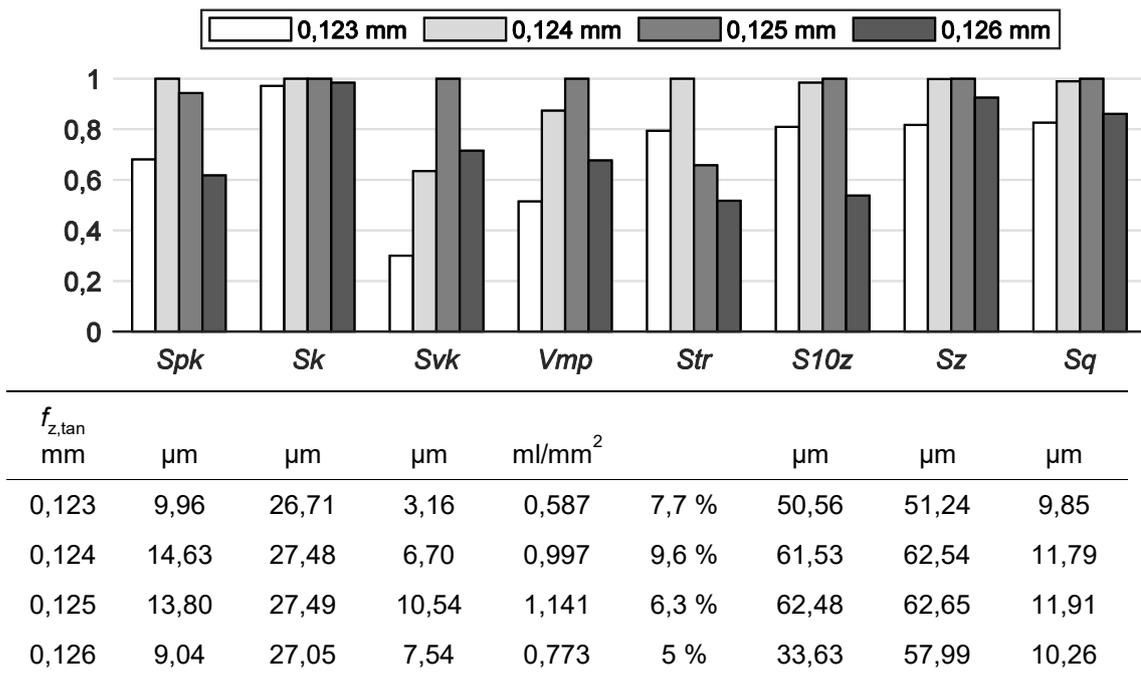


Abb. 4: Einfluss des Zahnvorschubs  $f_{z,tan}$  auf ausgewählte Oberflächenkenngrößen beim Drehfräsen (normierte Darstellung) und ermittelte Kennwerte

Aufgrund der teils unterschiedlichen Einheiten bzw. Größenordnungen der Messwerte sind diese in normierter Form dargestellt. Damit lassen sich die innerhalb des Betrachtungsraums auftretenden Abweichungen der einzelnen Kenngrößen übersichtlich visualisieren. Die Absolutwerte sind zusätzlich tabellarisch aufgelistet. Bei allen dargestellten Kenngrößen fällt auf, dass es keinen linearen Zusammenhang mit dem Zahnvorschub gibt. Für das linienhafte Profil entlang der Werkzeugbahn führt ein steigender Zahnvorschub zwingend zu einer Erhöhung der kinematischen Rauheitskomponenten  $R_{t,tan}$ . Anhand von Sz spiegelt sich dies nicht wider. Dies ist damit zu erklären, dass der bereits beschriebene Effekt der Überlagerung der Facetten den Einfluss von  $f_{z,tan}$  auf die kinematische Rauheit, d. h. die maximale Profilhöhe der gesamten Oberfläche, übersteigt. Die geringen Werte von Str zeigen eine ausgeprägte Anisotropie der Oberflächenfeingestalt. Zur Erhöhung der Haftreibung sind die Facetten so angeordnet, dass diese quer zur Belastungsrichtung, die aus der entgegengesetzt gerichteten Rotation von zwei Probekörpern resultiert, verlaufen.

Ähnliche Überlagerungseffekte sind beim ultraschallschwingungsüberlagerten Planfräsen zu beobachten. Auch hier bewirken marginale Änderungen bestimmter Prozesseingangsgrößen eine visuell wahrnehmbare Veränderung der Oberflächenfeingestalt. Dazu ist beispielhaft das Muster #3 aus Abb. 2 gewählt und simulativ der Einfluss einer fertigungsrealistischen Drehzahlschwankung von  $500 \text{ min}^{-1}$ ,  $499 \text{ min}^{-1}$  und  $497 \text{ min}^{-1}$  dargestellt. Wie in Abb. 5 sowie im folgenden Diagramm zu erkennen ist, besitzen diese kleinen Änderungen der Drehzahl bereits erheblichen Einfluss auf die Anordnung der einzelnen Mikrostrukturelemente in Vorschubrichtung untereinander („Versetzung von Spitze und Tal zueinander“), wodurch sich der Charakter der Oberfläche von „mehrheitlich Spitzen“ hin zu „plateauförmig“ wandelt.

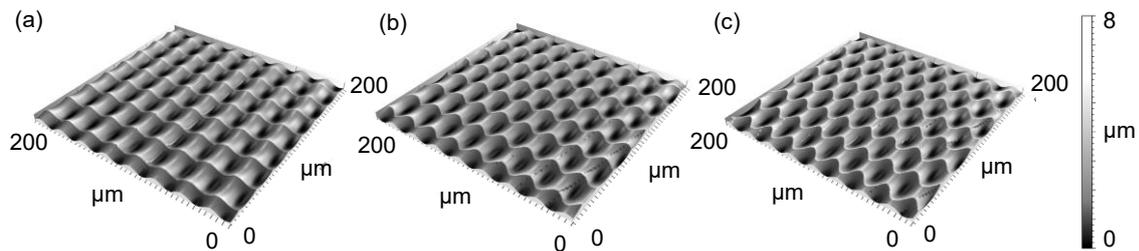


Abb. 5: Einfluss der Versetzung aufeinanderfolgender Vorschubbahnen auf die resultierende Oberflächenfeingestalt mit  $n_{WZ} = 500 \text{ min}^{-1}$  (a),  $n_{WZ} = 499 \text{ min}^{-1}$  (b) und  $n_{WZ} = 497 \text{ min}^{-1}$  (c)

Die Oberflächenanalyse erfolgt anhand der zur Ableitung der charakteristischen geometrischen Eigenschaften von stochastischen Oberflächen genutzten Parameter. Die visuelle Einschätzung kann quantitativ insbesondere durch die Parameter der Materialanteilkurve belegt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass kein S-förmiger Verlauf der Abbott-Kurven bei simulierten Oberflächen vorliegt, womit eine Vergleichbarkeit mit realen Oberflächen nur bedingt zulässig ist. Darüber hinaus nimmt die Änderung der Versetzungen von „Spitze“ und „Tal“ je Vorschubbahn auch Einfluss auf die Isotropie sowie auf die 10-Punkt-Höhe der Oberfläche. Das Vorhandensein einer Vorzugsrichtung wird durch den Parameter  $Str$  ausgedrückt: während (a) und (b) dominante Vorzugsrichtungen aufweisen (stark anisotrop), zeigt (c) ein eher isotropes Verhalten. Des Weiteren bewirkt eine wechselseitige Anordnung von Spitze und darauffolgendem Tal in translatorischer Richtung, dass die Effekte aus kinematischer Wellenbewegung in Richtung der Schnittgeschwindigkeit und kinematischer Rauheit in Vorschubrichtung in Bezug auf die Absoluthöhe des betrachteten Oberflächenausschnittes gemindert werden, wodurch es zu einem deutlichen Unterschied der  $S10z$ -Werte zwischen (a) und (c) kommt (siehe Abb. 6).

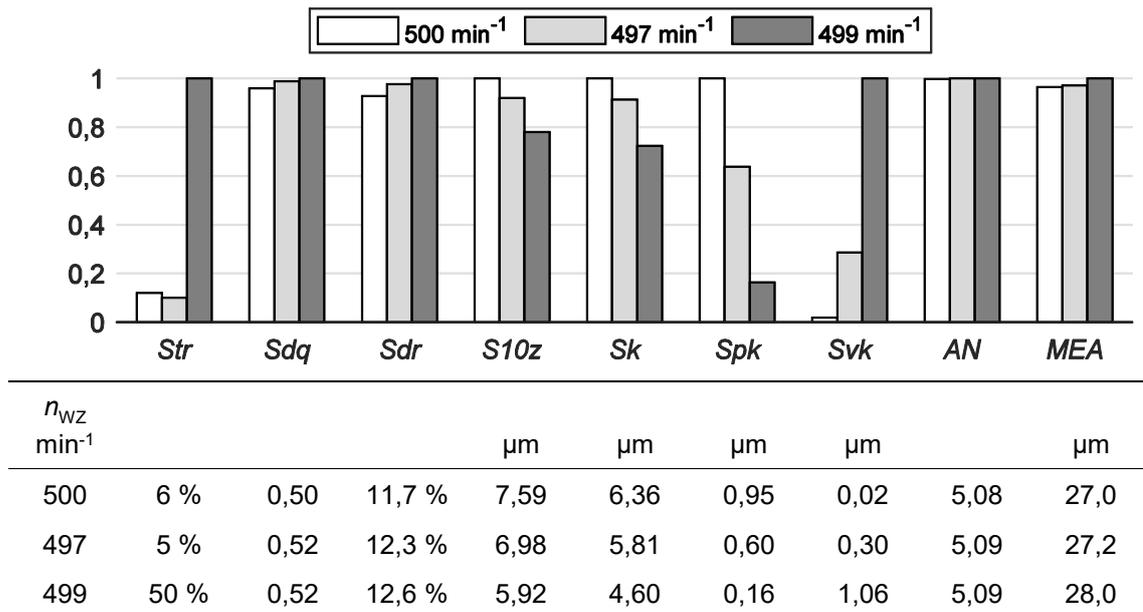


Abb. 6: Einfluss der Werkzeugdrehzahl  $n_{wz}$  auf ausgewählte Oberflächenkenngrößen beim USF (normierte Darstellung) und ermittelte Kennwerte am Beispiel von Muster #3

Andere Kenngrößen zur Beschreibung der deterministischen Mikrostrukturen, wie bspw. aus der Motivanalyse die Anzahl der Nachbarn (AN) und die gemittelten Elementabstände (MEA) der Spitzen sowie die Steilheit der Flanken (Sdq) und die Oberflächenvergrößerung (Sdr), bleiben hingegen nahezu konstant. Zur geeigneten Auswertung der diskutierten Effekte wurde der betrachtete Oberflächenausschnitt mittig in einer Vorschubbahn platziert. Bei einer seitlichen Verschiebung orthogonal zur Vorschubrichtung in die Randbereiche bzw. Überlappungsbereiche bei mehreren, parallel aneinandergesetzten Bahnen würde es zu weiteren Überlagerungseffekten kommen, worauf hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Obwohl sich die betrachteten Fertigungsverfahren sowie das jeweilige funktionale Einsatzspektrum der deterministischen Mikrostrukturen voneinander unterscheiden, finden sich Gemeinsamkeiten bei der Erfassung und Bewertung ihrer Geometrie. So stellen in beiden Fällen die Auswahl sowohl des Auswertebereichs bezüglich Lage und Größe als auch geeigneter Oberflächenkenngrößen eine Herausforderung dar. Repräsentiert der Auswertebereich nicht die gesamte Oberfläche, ist eine Übertragung der Oberflächeneigenschaften auf das Funktionsverhalten unter Umständen nicht gewährleistet.

Beim Drehfräsen beeinflusst der Zahnvorschub die Oberflächenfeingestalt erheblich. Dies wird sowohl optisch in Form überlagerter Mikrostrukturen als auch quantitativ anhand genormter Oberflächenkenngrößen deutlich. Um diese reproduzierbar bestimmen zu können und somit vergleichbar zu machen sowie den Aufwand für die messtechnische Erfassung der Oberfläche zu reduzieren,

sind neue Ansätze zur Festlegung eines geeigneten Auswertebereichs zu entwickeln. Das Ausmaß der Auswirkung auf die Haftreibungseigenschaften ist Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

Die mittels ultraschallschwingungsunterstütztem Planfräsen hergestellten Oberflächen dienen der Gewährleistung der Haftung von CVD-Diamantschichten auf Stahl. Um dieses Funktionsverhalten quantifizieren zu können, wurden relevante 3D-Parameter zur Beschreibung der vorrangig geometrischen Eigenschaften der Oberfläche ausgewählt. Anhand dieser kann eine Korrelation mit den gemessenen Spannungswerten der Diamantschicht erstellt werden, um den Einfluss der Mikrostruktur auf das Funktionsverhalten, ggf. in Abhängigkeit der applizierten Schichtdicke, zu beschreiben. Somit können Rückschlüsse auf die Oberflächenanforderungen gezogen werden, welche wiederum in die Bearbeitungsparameter des Fertigungsprozesses einfließen. Bisherige Forschungsergebnisse zeigen zudem eine verhältnismäßig hohe Übereinstimmung mit real gefertigten Oberflächen. Die dabei noch auftretenden Abweichungen hinsichtlich der Strukturausprägung resultieren insbesondere aus dem Werkzeugverschleiß und dem Materialtrennverhalten des zu bearbeitenden Werkstoffs. Hier gilt es, die Prozessbeherrschbarkeit weiter zu erhöhen, um auch durch die geringste Modifizierung der Fertigungsparameter eine gezielte Änderung des Charakters der Oberfläche einstellen zu können.

## 5. DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung unter den Projektnummern 407169265 und 411688125.

## 6. QUELLEN

- [Börner, 2017] Börner, R.; Junge, T.; Schubert, A.: Oberflächensimulation und experimentelle Untersuchungen zur Mikrostrukturierung von Stahlwerkstoffen mittels schwingungsüberlagertem Planfräsen im Ultraschallbereich. *Dry Metal Forming Open Access Journal* 3, S. 17-27, 2017.
- [Börner, 2018] Börner, R.; Winkler, S.; Junge, T.; Titsch, C.; Schubert, A.; Drossel, W.-G.: Generation of functional surfaces by using a simulation tool for surface prediction and micro structuring of cold-working steel with ultrasonic vibration assisted face milling. *Journal of Materials Processing Technology* 255, S. 749-759, 2018.
- [Börner, 2019] Börner, R.; Penzel, M.; Junge, T.; Schubert, A.: Design of Deterministic Microstructures as Substrate Pre-Treatment for CVD Diamond Coating. *Surfaces* 2, S. 497-519, 2019.
- [Dietzsch, 2009] Dietzsch, M.; Gröger, S.; Gerlach, M.: Neuer Ansatz zur Definition von geometrischen Oberflächeneigenschaften für tribologische Systeme. *Technisches Messen* 76, S. 65-72, 2009.

- [Flores, 2016] Herstellung von Funktionsoberflächen mit hoher Haftreibung durch Laserstrukturieren. VDI-Z Integrierte Produktion 158, S. 40-42, 2016.
- [Funke, 2016] Funke, R.; Schubert, A.: Increase of the Coefficient of Static Friction Using Turn-milling with an Inclined Milling Spindle. Procedia CIRP 45, S. 83-86, 2016.
- [Funke, 2018] Funke, R.; Schubert, A.: Effects of process parameters during Turn-milling of microstructured surfaces on the coefficient of static friction. Procedia CIRP 77, S. 255-258, 2018.



# BESTIMMUNG DER FORMABWEICHUNG ÜBER EIN SENSORISCHES WERKZEUG WÄHREND DER GLATTWALZBEARBEITUNG MIT HILFE EINES VIRTUELLEN ZWILLINGS

**Marco Posdlich, Sven Winkler, Rico Stöckmann, Marco Schumann, Philipp Klimant, Marco Witt, Matthias Putz**

Technische Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse,  
marco.posdlich@mb.tu-chemnitz.de, sven.winkler@mb.tu-chemnitz.de

---

*Abstract: Additiv gefertigte Komponenten finden aufgrund ihrer Flexibilität der Formgestaltung zunehmend mehr Anwendung in der Industrie. Allerdings sind deren Einsatzgebiete durch Genauigkeit, Oberflächenqualität und Resteigenspannungen begrenzt. Im vorliegenden Beitrag wird eine neue Prozesskette vorgestellt, welche die Bauteilqualität von selektiven lasergeschmolzenen Bauteilen durch eine kombinierte Endbearbeitung in einer Aufspannung steigern kann. Neben dem weggesteuerten Fräsen kommt bei der Endbearbeitung ein kraftgeregeltes Glattwalzprozess zum Einsatz. Durch diese Verfahrenskombination kann auch bei 3D-gedruckten Bauteilen eine Oberflächenrauheit Rz von unter 1 µm und theoretisch eine Toleranzklasse bis IT 6 erreicht werden. Ein prozessbegleitender Virtueller Zwilling erfasst jeden einzelnen Bearbeitungsschritt und ermöglicht damit eine geschlossene Rückverfolgbarkeit der Bauteileigenschaften. So werden unter anderem die Positionen des Tool Center Points während der Bearbeitung aufgezeichnet. Da bei der Glattwalzbearbeitung das Werkzeug die Oberfläche des Werkstückes berührt, ist durch die Kombination aus Kraftregelung und Virtuellem Zwilling die Erfassung und Auswertung der Gestaltabweichung 1. und 2. Ordnung der glattgewalzten Oberfläche möglich.*

**KEYWORDS: VIRTUELLER ZWILLING, GESTALTABWEICHUNG, GLATTWALZEN, OBERFLÄCHENMESSUNG**

---

## 1. EINLEITUNG

Das Glattwalzen ist ein Finishprozess von rotationssymmetrischen Werkstücken, wie er z. B. in der Automobil- und Luftfahrtindustrie Verwendung findet [Chomienne, 2016]. Vermehrt werden auch prismatische oder Freiformgeometrien mit Glattwalzen bearbeitet [López de Lacalle, 2011]. Vor allem bei Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium, Magnesium und Titan gewinnt die 5-achsige Komplettbearbeitung mit Fräsen und Glattwalzen immer mehr an Bedeutung. Das Glattwalzen substituiert den Polierprozess und erhöht die Effizienz und den Automatisierungsgrad des Finishings [López de Lacalle, 2011]. Der Glattwalzprozess ermöglicht in Kombination mit der Vorbearbeitung die Produktion einer hohen Maßhaltigkeit (> IT6) und einer geringen Rauheit (< Rz 1 µm) [Röttger, 2003]. Bei Aluminiumlegierungen ist es beispielsweise möglich die Oberflächenhärte um 20 % zu erhöhen und Druckeigenspannungen von bis zu -300 MPa in die oberflächennahen Schichten einzubringen [Kalisz, 2017]. Insbesondere bei der Herstellung von Umformwerkzeugen ermöglicht die

Technologie eine Senkung der Herstellungskosten als Alternative zum manuellen Polieren oder Kugelstrahlen [de Witt, 2018]. Dzionk et al. untersuchten den Welligkeitsanteil unter Berücksichtigung der Prozesskombination Drehen und Glattwalzen (mit verschiedenen Glattwalzwerkzeugen) und verglichen diesen mit dem konventionellen Schleifen [Dzionk, 2012], [Dzionk, 2015]. Dies zeigt, dass die Welligkeit durch das Glattwalzen weniger beeinflusst wird als die Rauheit. Aus diesem Grund ist eine Kombination aus Fräs- und Glattwalzprozess sinnvoll, um sowohl Rauheit als auch Welligkeit im Toleranzbereich zu halten. López de Lacalle et al. untersuchten verschiedene Bewegungsstrategien und Parameter beim Glattwalzen für die Bearbeitung komplexer Teile [López de Lacalle, 2011]. In Kombination mit anderen Ergebnissen von Bachtiaik-Radka et al. lässt sich feststellen, dass Glattwalzkraft, Vorschub und Werkzeugweg einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Oberfläche haben [Bachtiaik-Radka, 2017]. Während die Werkzeugbewegung von der Maschine präzise gesteuert werden kann, wird die Glattwalzkraft von verschiedenen Werkzeugsystemen entweder mit Federn oder hydrostatischen Drücken eingestellt [Hiegemann, 2014], [El-Tayeb, 2007], [Chomienne, 2016]. Eine Regelung der Prozesskraft in Bezug auf die Werkzeugposition ist mit diesen Systemen nur bedingt möglich.

In dem folgenden Beitrag wird ein an der TU Chemnitz entwickeltes System zur Regelung der Glattwalzkraft vorgestellt, bei dem mittels eines sensorischen Haltersystems die aktuelle Glättkraft digitalisiert durch einen externen PC verarbeitet und der Werkzeugmaschine als Regelparameter weitergeleitet wird. Die detaillierte Umsetzung der Kraftregelung wurde in [Posdlich, 2019] dargelegt. Ziel dieser Publikation ist die Betrachtung der Annahme, dass bei konstanter Glättkraft und Kontaktbedingungen durch die Regelung die Werkstückoberfläche unabhängig ihrer Realgeometrie und der programmierten Verfahrbewegung abfährt.

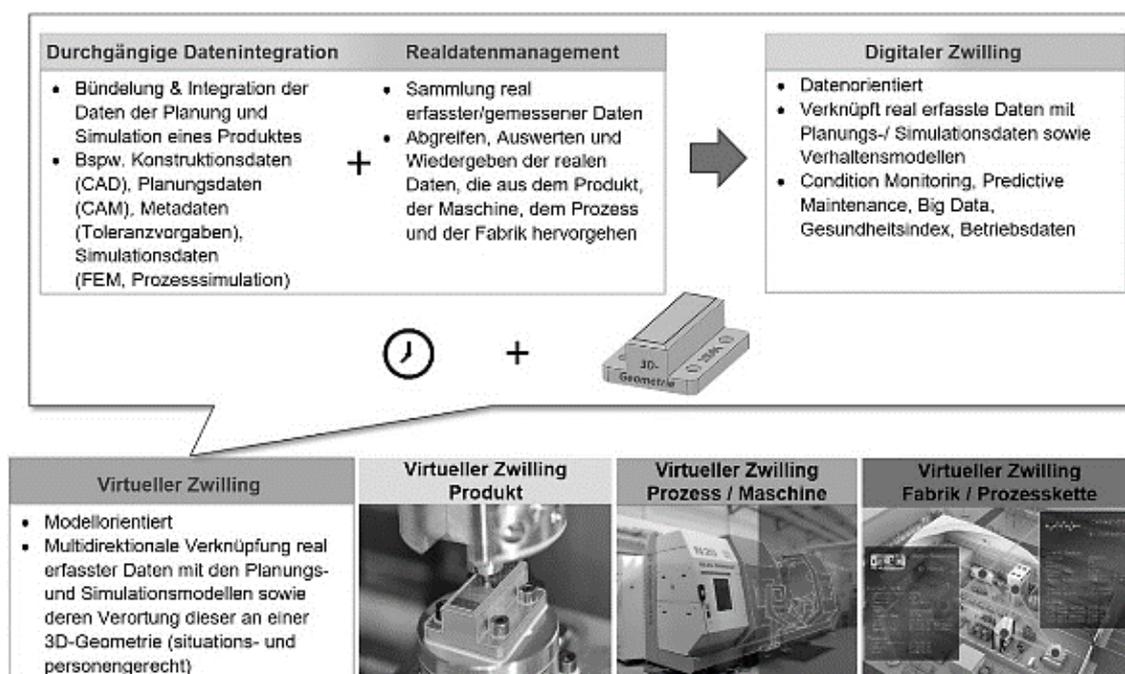


Abb. 1: Aufbau des Virtuellen Zwillings

Durch die Anbindung des Regelsystems an einen Virtuellen Zwilling, der die resultierende Bewegung der Maschine live betrachtet, wird außerdem die Aufzeichnung der Formabweichung ermöglicht. Der Fokus der Untersuchungen liegt dabei in der Bearbeitung additiv gefertigter Werkstücke, da mit der Prozesskombination aus Fräsen und Glätten punktuell auf deren Werkstückanforderungen eingegangen werden kann. Der Virtuelle Zwilling stellt eine Erweiterung des Begriffes des Digitalen Zwillings dar.

Digitale Zwillinge versuchen nach Aussage von Grieves und Vickers [Grieves, 2017] Produkte mit virtuellen Informationen von der Mikro- bis zur Makroebene zu beschreiben, weiterhin „umfasst [dieser Zwilling] idealerweise alle real gemessenen und virtuell generierten Daten eines Prozesses, eines Produktes, einer Maschine oder einer ganzen Fabrik“ [Apitzsch, 2018]. Die Weltraumbehörde NASA setzte einen Digitalen Zwilling im Jahr 2012 in einen digitalen Kontext [Shafto, 2012], das Prinzip ist jedoch wesentlich älter und wurde bereits in den 1960er Jahren bei den Apollo Missionen genutzt. Die dabei aufgezeichneten Daten im Weltall wurden in einen identischen Nachbau auf der Erde integriert [Rosen, 2015]. Mit der voranschreitenden Digitalisierung wurde dieses Verfahren wieder aufgegriffen und erstellte digitale Abbilder von realen Anlagen, Maschinen, Produkten bis hin zu vollständigen Prozessen. Aufgrund des aufkommenden und wachsenden Datenreichtums prägte die Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) den Begriff des digitalen Schattens. Dieser Schatten beinhaltet dabei die Aufgabe ein „hinreichend genaue[s] Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten“ [Bauernhansl, 2016] zu erstellen. Trotz der nicht einheitlichen Definition ist zu erkennen, dass ein digitaler Zwilling die Verschmelzung von Realdaten und Planungsdaten hin zu einer durchgängigen Datenintegration darstellt [Brade, 2017]. Der an der TU Chemnitz entwickelte Virtuelle Zwilling greift diese auf und ergänzt zusätzlich eine zeitorientierte Verortung dieser Daten an die Geometrie in der virtuellen 3D-Welt. Dieser Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Dadurch ist es möglich, die erhebliche Menge an Informationen mit Hilfe verschiedener Visualisierungen situations- und anwendungsgerecht aufzubereiten und zu präsentieren.

## 2. EXPERIMENTELLER VERSUCHSAUFBAU

### 2.1 Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau basiert auf einer 3-Achs-Fräsmaschine DMC 850V der Firma DMG. Diese ist ausgestattet mit einer Sinumerik 840d von Siemens. Das Werkstück, dargestellt in Abbildung 2 und 3, ist ein additiv gefertigter Block aus EN AC-ALSi10Mg, welcher mittels der Substratplatte des Aufbauprozesses fest über eine Kistler-Messplattform (4-Komponenten-Dynamometer Typ 9272), die nur der Verifizierung der anschließenden Kraftregelung dient, mit der Maschine verbunden ist. Der vorgelagerte Fräsprozess wird mit einem Kugelkopffräser mit einem Durchmesser von  $D_F = 6$  mm durchgeführt.

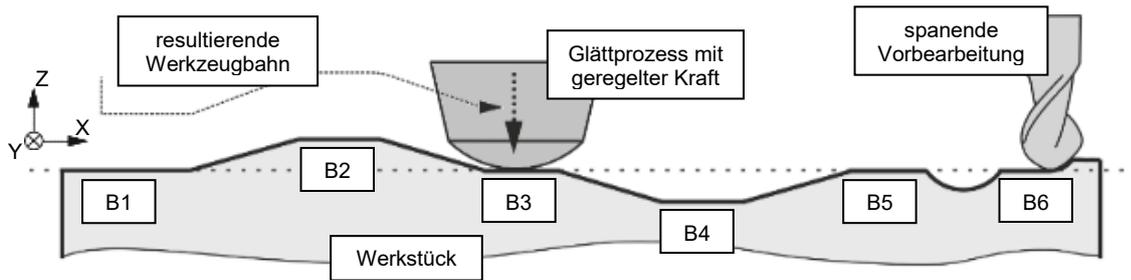


Abb. 2: Schematische Darstellung der Werkstückgeometrie sowie der spanenden Vorbearbeitung (rechts) und des kraftgeregelten Glättprozesses (links)

Die erzeugte Kontur der Oberfläche wird dabei mit dem Vorschub  $f_F = 0,25$  mm zeilenweise abgearbeitet. Die erzeugte Fläche wurde in verschiedene Bereiche (B1 – B6) aus konkaven und konvexen Plateaus mit einem Abstand von  $\pm 0,5$  mm zur Orientierungsebene unterteilt. Zudem wurde eine konkave Kreisform eingebracht. Die Bearbeitungsrichtung des Fräsprozesses (vergleiche Abbildung 2) erfolgt in die Bildebene (Y-Richtung) hinein und steht somit orthogonal zum Glättwalzprozess.

Für den Glättwalzprozess wird ein ta-C beschichteter Hartmetallstift als Glättkörper verwendet, dessen sphärische Spitze über die Oberfläche des Werkstückes gleitet. Der resultierende Durchmesser des Werkzeuges entspricht dabei  $D_W = 10$  mm. In experimentellen Vorversuchen konnte ein Gleitreibungskoeffizient nach Coulomb von  $\mu = 0,09$  ermittelt werden. Die aus der Reibung und den Konturanstiegen resultierenden Vorschubkräfte werden in dieser Untersuchung nicht eingehend betrachtet. Die vorbearbeitete Werkstückoberfläche wird für die Nachbearbeitung in drei Messfelder unterteilt. Das NC-Programm der Werkzeugmaschine koordiniert das Aufsetzen des Glättwerkzeuges in der negativen X-Position und veranlasst eine pendelnde Bewegung in der XY-Ebene ohne zusätzliche Korrektur der Z-Achse. Die Kraftregelung überwacht während der Anfahrstrategie den Kontaktzeitpunkt zwischen Werkstück und Werkzeug. Sobald ein Kontakt durch das sensorische Werkzeug erfasst wird, überlagert die Regelung im Rahmen ihrer Parametervorgaben die Z-Achse so, dass der Soll-Kraft-Wert von  $F_{SOLL} = 200$  N eingehalten wird. Demnach verfolgt die Z-Achse die reale Oberflächenkontur. Der Bahnabstand des Glättprozesses beträgt  $f_G = 0,1$  mm und orientiert sich mit der vorgegebenen Kraft an Ergebnissen der Literatur [El-Tayeb, 2007].

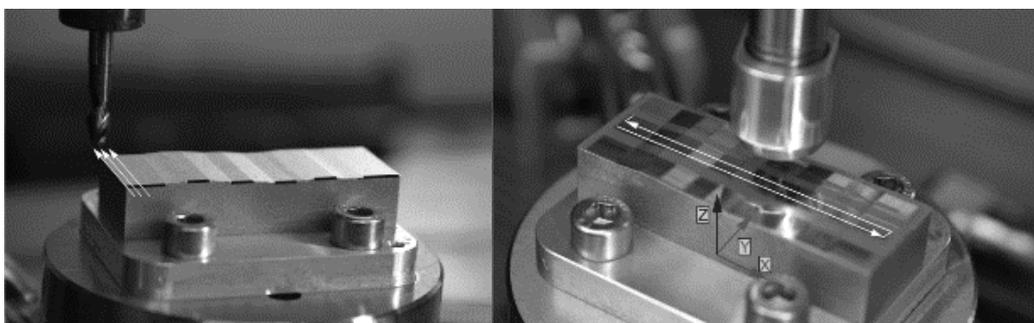


Abb. 3: Links: spanende Vorbearbeitung des Werkstückes mittels eines Kugelkopffräasers ( $D_F = 6$  mm) zur Geometrieerzeugung, rechts: kraftgeregelte Endbearbeitung durch Glätten mehrerer Flächen

Er beeinflusst im Wesentlichen die resultierende Rauheit sowie Materialverformung. Die Glättgeschwindigkeit beträgt dabei lediglich  $v_G = 60 \text{ mm/min}$ . Diese ist durch die Geschwindigkeit der Kraftregelung und der Aufzeichnung durch den nachfolgenden Virtuellen Zwilling begrenzt. Nach dem Glattwalzprozess erfolgt eine Messung der Bereiche (B1-B6) durch den maschineninternen Messtaster mit jeweils 5 Messpunkten pro Fläche und Bereich. Diese Ergebnisse bilden die Referenzwerte mit denen der Glattwalzprozess verglichen wird. Dadurch werden Fehler im Bereich der Positionsgenauigkeit und Bearbeitungsgenauigkeit des Fräsens kompensiert.

Der in diesem Versuch umgesetzte Virtuelle Zwilling nutzt die Game Engine „Unity“ [Unity Technologies, 2017] in der Version 2017.3 für die Echtzeit-Visualisierung der 3D-Szene, welche das virtuelle Werkstück enthält. Der direkte Einfluss auf die Szene erfolgt mittels Scripten, die es ermöglichen zur Laufzeit vorhandene Objekte zu verschieben, die Eigenschaften bezüglich des virtuellen Materials zu ändern oder auch neue Objekte zu generieren.

Der Virtuelle Zwilling benötigt für die angestrebte Echtzeit-Visualisierung eine Anbindung an die NC-Steuerung der Werkzeugmaschine. In diesem Versuchsaufbau wurde das OPC-UA-Protokoll genutzt, welches auf einer Client-Server-Architektur fußt. Die Verbindung zum Prozess ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Server stellt Informationen aus der NC-Steuerung zur Verfügung und mittels unterschiedlicher Zugriffsmodi kann eine Kommunikation aufgebaut werden.

Der entwickelte Prototyp nutzt das Framework *FreeOpcUa* [Vacek] auf Client-Seite, um die OPC-UA-Verbindung zu realisieren. Über den so etablierten Kommunikationsweg erfolgt das Auslesen des idealen Tool Center Points (TCP) sowie des verfügbaren Prozessparameters der Kraftregelung. Der Virtuelle Zwilling empfängt diese Daten kontinuierlich und verortet die Werte für jeden erhaltenen Datensatz an einer zuvor importierten 3D-Werkstückgeometrie im virtuellem Raum in Echtzeit.

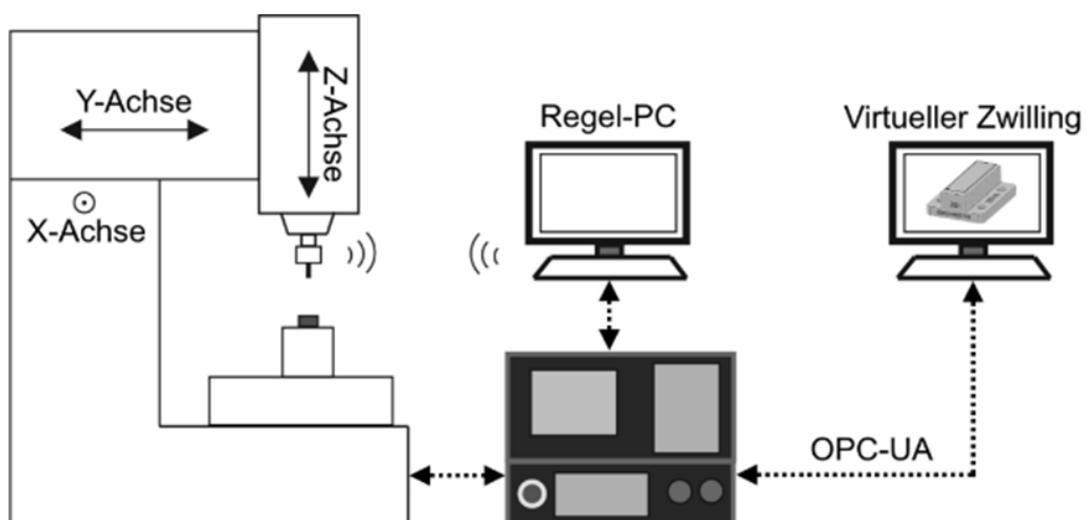


Abb. 4: Schematischer Versuchsaufbau der Kraftregelung inklusive der Schnittstelle zum Virtuellen Zwilling

Der dazugehörige Anwenderparameter der Regelung dient zur besseren visuellen Aufbereitung und zum Prozessverständnis. Die Darstellung erfolgt mithilfe einer farblichen Codierung. Dabei können die zu erwartenden Grenzen frei definiert werden. Aufgrund der eingesetzten 3D-Umgebung ist es möglich, sich während des Versuches um das virtuelle 3D-Objekt zu bewegen. Um Details zu einzelnen TCP-Werten zu erfahren, ist es möglich mit dem Cursor einzelnen Punkte zu selektieren. Neben der visuellen Datenauswertung ist zudem eine historische Auswertung des Datensatzes, zum Beispiel für ein nachgelagertes Qualitätsmanagement, möglich: So können für eine variable Anzahl vergangener TCP, Minima, Maxima und Durchschnittswerte angezeigt werden. Die Oberfläche der Visualisierung bietet außerdem die Möglichkeit jederzeit alle empfangenen Daten abzuspeichern und später einzulesen.

### 3. ERGEBNISSE

#### 3.1 Dateninterpretation

In diesem Versuch wurde, wie in Abbildung 5 dargestellt, eine Geometrie bearbeitet. Diese Geometrie ist für das ausführende Programm unbekannt. Somit wurde erwartet, dass diese Abweichungen in Form von Höhenunterschieden von der Regelung der Kraft erkannt wird und das Werkzeug eine kompensierende Bewegung ausführt. Der Virtuelle Zwilling zeichnete diese Bewegungen in Form der idealen TCP-Werte auf und kann diese wie in Abbildung 5 in Graustufen codieren. Dabei wurde ein angenommener Sollwert für die Z-Achse von 24 mm eingestellt. Abweichungen in positiver Z-Richtung werden in einem dunklen Farbton markiert, während Abweichungen in negativer Z-Richtung in einem hellen Ton markiert werden, womit während des Prozesses ein Farbverlauf über die gesamte virtuelle Geometrie entsteht. Dies ermöglicht es, Rückschlüsse auf Abweichungen bezüglich der Soll-Geometrie zu ziehen.

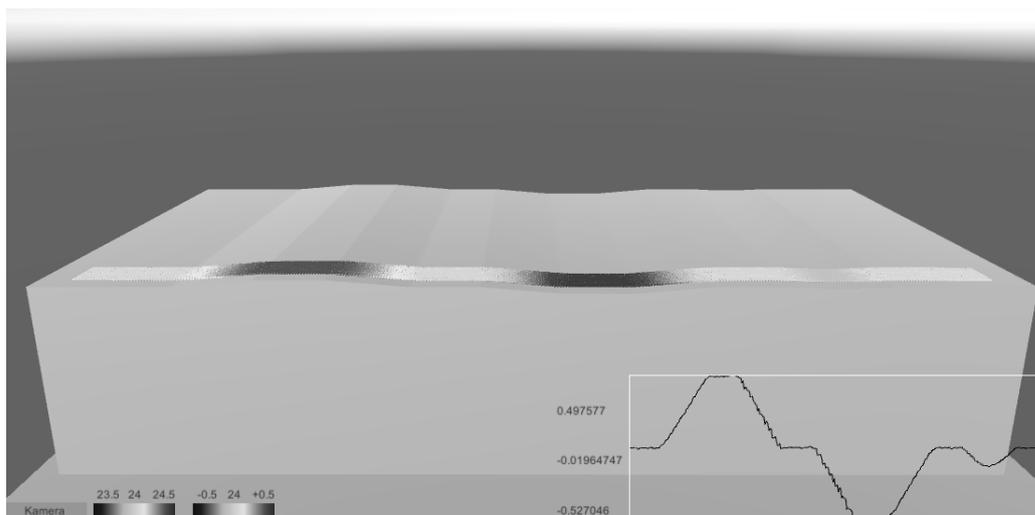


Abb. 5: Graustufencodierung des Virtuellen Zwillings

### 3.2 Messdaten

Aufbauend auf den Aufzeichnungen des Virtuellen Zwillinges erfolgt eine Bewertung der Messdaten hinsichtlich ihrer Qualität in Bezug auf die eingebrachten Formabweichungen. Wie bereits im Kapitel 2.1 beschrieben erfolgt die Untersuchung auf drei Messfelder mit jeweils sechs zu vergleichenden Bereichen. Da der Virtuelle Zwillling angelehnt an die Glattwalzstrategie 60 Bahnen pendelnd abarbeitet, wird nur die 30. Bahn genauer betrachtet, die vom zweiten Messfeld im Diagramm der Abbildung 6 exemplarisch dargestellt ist.

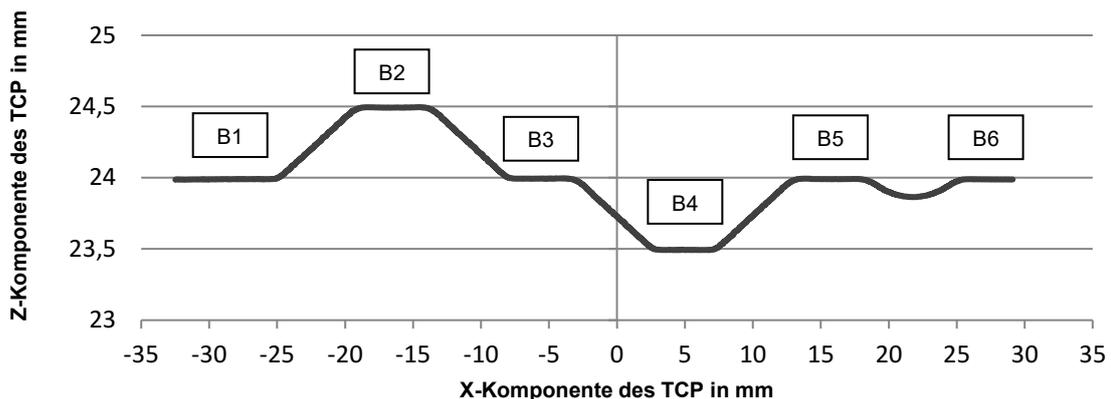


Abb. 6: aufgezeichneter Bahnverlauf des TCP durch den Virtuellen Zwillling

Für die anschließende Betrachtung der Messdaten aus der Kraftregelung in dem jeweiligen Bereich wird immer der Vergleich zur anschließenden Messung der waagerechten Flächen durch den maschineninternen Messtaster gezogen. Somit werden Abweichungen durch den vorgelagerten Fräsprozess (z. B. thermische Ausdehnung) oder Positionierfehler kompensiert. Dargestellt ist diese Differenz zwischen Mittelwert der Kraftregelung und Messtaster in Tabelle 1.

X-Achse	Messtaster Mittelwert	Messtaster Standardabweichung	Kraftregelung Mittelwert	Kraftregelung Standardabweichung	Differenz
-28	23,98926	0,000592	23,98585	0,001276	-0,00341
-16,5	24,49307	0,000330	24,48879	0,000777	-0,00428
-5,5	23,99402	0,000326	23,99019	0,000641	-0,00382
5	23,49338	0,000296	23,48915	0,000599	-0,00422
15,5	23,99102	0,000271	23,98689	0,000837	-0,00413
28	23,98804	0,000322	23,98456	0,000828	-0,00348

Tab. 1: Ergebnisse der Messung 1 des Vergleiches zwischen maschineninternem Messtaster und Aufzeichnung der Kraftregelung durch den Virtuellen Zwillling (alle Angaben in mm)

## 4. AUSWERTUNG

Die Experimente zeigen, dass der Virtuelle Zwillling weit über das reine Sammeln von Daten hinausgeht und somit einen deutlichen Mehrwert gegenüber bekannten Digitalen Zwillingen bietet. So kann während der Bearbeitung die

Bewegung des Werkzeugs in Echtzeit verfolgt werden. Zudem können in die Betrachtung die vorgegebenen Grenzwerte, wie Toleranzen von Formabweichungen, angegeben werden. Eine Abweichung zur geplanten Geometrie ist demzufolge sofort ersichtlich. Die im Kapitel 3.2 dargelegte Aufzeichnung der Messwerte wurde für zwölf Versuche durchgeführt. Da jedoch keine Änderung der Ergebnisse zu erkennen ist, werden im Folgenden nur drei Messungen weiter erläutert. In Abbildung 7 sind die Differenzen zwischen dem Messtaster und den aufgezeichneten Daten des TCPs (Kraftregelung) dargestellt. Prinzipiell ist die Tendenz zu erkennen, dass alle Messwerte der Kraftregelung orientiert an der Z-Achse geringer sind als die des Messtasters. Diese Tendenz weist darauf hin, dass die elastischen Verformungen, von Werkstück, Werkzeug und Werkzeugmaschine ausgehend von der Glattwalzkraft, die Abweichungen maßgeblich beeinflussen. Direkte Schwankungen der Differenzen können jedoch im weiteren Verlauf der Untersuchungen nur durch ein externes Messverfahren beurteilt werden.

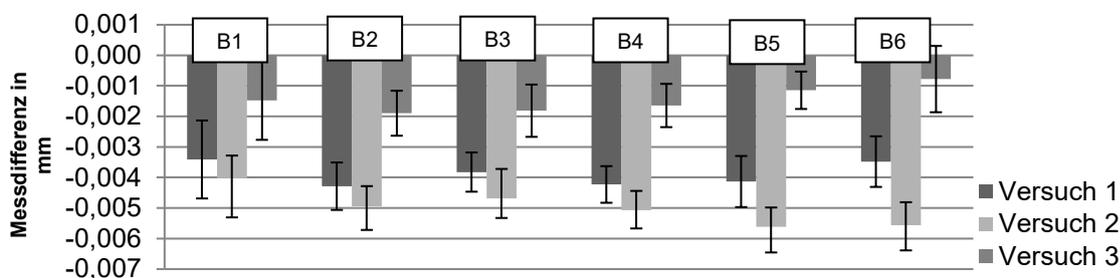


Abb. 7: Auswertung der gemessenen Differenz zwischen Messtaster und Glättprozess mit drei verschiedenen Versuchen unter den gleichen Prozessparametereinstellungen

Unter der Betrachtung der einzelnen Messungen der Kraftregelung kann ausgesagt werden, dass die erfassten Differenzen über den betrachteten Messbereich von 65 mm eine maximale Schwankung von 1,5  $\mu\text{m}$  aufweisen. Die Standardabweichung in dem jeweiligen Messbereich (B1 - B6) liegt jedoch bei 0,4  $\mu\text{m}$  bis 1,6  $\mu\text{m}$ , was in Bezug zu den Abweichungen eine weiterführende Bewertung nicht aussagekräftig macht. Die Standardabweichung entsteht maßgeblich aus der Positionierung der Z-Achse, die im Regelbetrieb zu einer Schwingung des Prozesses führt. Zu erkennen ist dies deutlich an der aufgezeichneten Glättkraft durch die Kistler Plattform (dargestellt in Abbildung 8). Zu erkennen ist dabei die sich einpendelnde Schwankung der Prozesskraft in den untersuchten Bereichen.

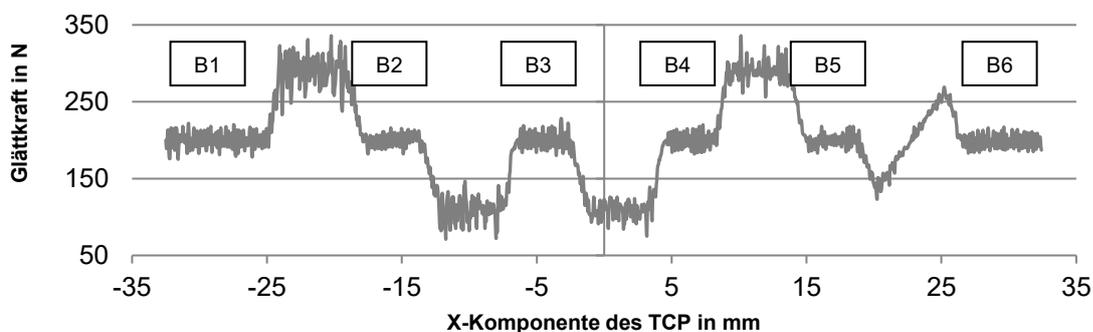


Abb. 8: Aufzeichnung der Glättkraft einer Bahn

Die Reglerparametrierung wurde dahingehend optimiert, dass eine Bewegung in positive als auch negative Z-Richtung (Rampe) ohne Überschreitung der Grenzwerte möglich ist. Bei einem entsprechenden Anstieg oder Abfall der Werkstückkontur kommt es demnach zu einer Abweichung von der Soll-Kraft.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Kombination aus kraftgeregeltem Glättprozess und simultaner Datenaufzeichnung sowie -darstellung der Maschinendaten durch den Virtuellen Zwilling zeigt, dass dem Anwender die Möglichkeit geschaffen wird während der Endbearbeitung auf die Qualität des Werkstückes einzugehen. So konnte in den durchgeführten Untersuchungen eine Formabweichung unter 2  $\mu\text{m}$  im Rahmen der betrachteten Ebenheit erfasst werden. Eine genauere Bewertung der Messgenauigkeit kann zu diesem Zeitpunkt nicht getroffen werden, da Prozessschwingungen aus der Kraftregelung in weiterführenden Untersuchungen verringert werden müssen.

Trotzdem zeigt das Verfahren, dass es potentiell in der Lage ist parallel zur Endbearbeitung einer unbekanntem Werkstückkontur zu folgen und diese in ihrer Formabweichung zu messen. Der Prozess ersetzt dabei keine finale externe Qualitätssicherung bietet jedoch die Möglichkeit die Fertigung flexibler zu gestalten. Das Ziel ist es in weiterführenden Untersuchungen additiv gefertigte Werkstücke mit der dargelegten Prozesskombination nachzubearbeiten. Durch das Glätten und die damit einhergehende Einbringung von Druckeigenstressungen, kann mit der Datenaufzeichnung des Virtuellen Zwillings bei Losteilgröße eins schon während der Bearbeitung auf die Eigenspannungen im Bauteil eingegangen werden.

## 6. DANKSAGUNG

Die Untersuchungen wurden finanziert durch die Europäische Union und den Freistaat Sachsen.



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

## 7. QUELLEN

[Apitzsch, 2018] Apitzsch, R.; Brade, J.; Winkler, S.; Cassing, K.; Klimant, P.: Anforderungen an den Virtuellen Zwilling aus Nutzersicht. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Hanser Verlag, 2018.

[Bachtiaik-Radka, 2017] Bachtiaik-Radka, E.; Dudzińska, S.; Grochala, D.; Berczyński, S.; Olszak, W.: The influence of CNC milling and ball burnishing on shaping complex 3D surfaces. Surface Topography: Metrology and Properties. 2017.

- [Bauernhansl, 2016] Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Günther, S.:WGP-Standpunkt Industrie 4.0. 2016.
- [Brade, 2017] Brade, J.; Posdlich, M.; Klimant, P.:Prozessübergreifende Fertigung von metallischen Hochleistungsbauteilen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 2017.
- [Chomienne, 2016] Chomienne, V.; Valiorgue, F.; Rech, J.; Verdu, C.:Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. CIRP, 2016.
- [Dzionk, 2012] Dzionk, S.; Przybylski, W.:Surface waviness of components machined by burnishing method. Archives of Mechanical Technology and Automation. 2012.
- [Dzionk, 2015] Dzionk, S.; Ścibiorski, B.:Hardened Steel Surface Waviness Created by Rolling Burnishing Process. Solid State Phenomena. 2015.
- [El-Tayeb, 2007] El-Tayeb, N.; Low, K.O.; Brevern, P.V.:Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 2007.
- [Grieves, 2017] Grieves, M.; Vickers, J.:Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer, 2017.
- [Hiegemann, 2014] Hiegemann, L.; Weddeling, C.; Khalifa, N. Ben; Tekkaya, A.E.:Analytical prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces. Procedia Engineering. Elsevier B.V., 2014.
- [Kalisz, 2017] Kalisz, J.; Grzesik, W.; Zak, K.; Czechowski, K.:Properties of the subsurface layer after rolling burnishing of an initially milled aluminium alloy. Journal of Machine Engineering. 2017.
- [López de Lacalle, 2011] López de Lacalle, L.; Rodríguez, A.; Lamikiz, A.; Celaya, A.; Alberdi, R.:Five-Axis Machining and Burnishing of Complex Parts for the Improvement of Surface Roughness. Materials and Manufacturing Processes. 2011.
- [Posdlich, 2019] Posdlich, M.; Schöberlein, C.; Quellmalz, J.; Putz, M.:Burnishing of prismatic workpieces on three-axis machine enabled by closed loop force control. Procedia CIRP. Elsevier, 2019.
- [Röttger, 2003] Röttger, K.; Walzen hartgedrehter Oberflächen. Technische Hochschule Aachen, 2003.
- [Rosen, 2015] Rosen, R.; von Wichert, G.; Lo, G.; Bettenhausen, K.D.:About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine. 2015.

- [Shafto, 2012] Shafto, M.; Conroy, M.; Doyle, R.; Glaessgen, E.; Kemp, C.; LeMoigne, J.; Wang, L.: Modeling, simulation, information technology & processing roadmap. National Aeronautics and Space Administration. 2012.
- [Unity Technologies, 2017] Unity - Game Engine. 2017.
- [Vacek] GitHub - FreeOpcUa/freeopcua: Open Source C++ OPC-UA Server and Client Library.
- [de Witt, 2018] de Witt, P.; Rehm, M.; Schlegel, H.; Putz, M.; Bernstein, R.; Marten, H.: Manufacturing of reproducible surface qualities. JOT Journal für Oberflächentechnik. - Wiesbaden : Springer. 2018.



# HOLISTISCHE ABBILDUNG DER GESTALTÄNDERUNG INFOLGE DES STRÖMUNGSSCHLEIFENS

**Robert Hofmann<sup>1</sup>, Eckart Uhlmann<sup>2</sup>, Sophie Gröger<sup>1</sup>, Simon Roßkamp<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Fertigungsmesstechnik, robert.hofmann@mb.tu-chemnitz.de, sophie.groeger@mb.tu-chemnitz.de

<sup>2</sup> Technische Universität Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF, Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, eckart.uhlmann@iwf.tu-berlin.de, simon.rosskamp@iwf.tu-berlin.de

---

*Abstract: Das Strömungsschleifen wird für Aufgaben wie das Entgraten, Kantenrunden oder Finishing von Oberflächen verwendet. Die Korrelation zwischen den Prozessparametern und den Bearbeitungsergebnissen wird in diesem Beitrag beschrieben. Um das Ziel der Prozessbeschreibung mittels messtechnischer Erfassung zu erreichen, ist die systematische Unterscheidung verschiedener Bereiche strömungsgeschliffener Flächen, –die Anpassung der Erfassungsstrategien daran sowie die Betrachtung von Gestaltabweichungen verschiedener Dimensionen notwendig. Insofern werden mit diesem Beschreibungsmodell sowohl Veränderungen der Mikrogeometrie, wie Oberflächenrauheit und -welligkeit, als auch Veränderungen der Makrogeometrie, wie Zylindrizität, Geradheit und Kantenrundung, betrachtet. Mit einer Verifikationsstrategie wird das Modell so weit entwickelt, dass es Teil eines Prozessmodells des Fertigungsverfahrens Strömungsschleifen werden kann. Dadurch sollen zukünftig Zeit und Kosten für Prozessauslegungen reduziert werden, indem sie durch Simulationen unterstützt werden.*

**KEYWORDS: GESTALTÄNDERUNG, STRÖMUNGSSCHLEIFEN, PROZESSMODELL, VERIFIKATION**

---

## LITERATURHINWEISE

[Roßkamp, 2019] Roßkamp S., Uhlmann E., Hofmann R., Gröger S.: Shape alterations and their holistic geometrical representation in abrasive flow machining - Holistische Abbildung der Gestaltänderung infolge des Strömungsschleifens. WGP Kongress, Hamburg, 2019.

[Gröger, 2017] Gröger S., Uhlmann E., Roßkamp S.: Definition of edges in correlation to abrasive flow machining as a finishing process. Met & Props Conference, Gothenburg, 2017.



# AUSWIRKUNG VERSCHIEDENER ERFASSUNGSSTRATEGIEN AUF DIE MESSERGEBNISSE

**Teresa Werner**

Westfälische Hochschule Zwickau, Fakultät Automobil- und Maschinenbau, Institut für  
Produktionstechnik, [teresa.werner@fh-zwickau.de](mailto:teresa.werner@fh-zwickau.de)

---

*Abstract: Bei der Prüfung geometrischer Merkmale ist es erforderlich, die Messmethode und die Art der Erfassung an den zu messenden Bauteilen sorgfältig zu planen und zu dokumentieren, um die Messergebnisse bei Bedarf reproduzieren zu können. Dies gilt insbesondere bei der Prüfung mit Koordinatenmessgeräten, die dem Anwender eine hohe Flexibilität bei der Festlegung der Wahl der Sensoren sowie der Mess- und Auswertestrategie ermöglichen. Ein Vergleich von Messergebnissen, die mit unterschiedlichen Erfassungsstrategien ermittelt wurden, kann jedoch z.B. bei der Kommunikation zwischen Kunden und Lieferanten erforderlich sein. Dabei ist vor allem problematisch, dass zwar die Auswirkungen der Änderungen grundsätzlich bekannt sind, jedoch keine fundierten Daten für eine quantitative Abschätzung vorliegen. Daher wurden im Rahmen systematischer Versuchsreihen für die Prüfung von Maßen sowie Form- und Lagetoleranzen untersucht, welche quantitativen Effekte bei einer Änderung der Erfassungsstrategie zu erwarten sind. Daraus lassen sich letztlich Empfehlungen für eine bessere Vergleichbarkeit von Messergebnissen ableiten.*

**KEYWORDS: KOORDINATENMESSTECHNIK, MESSSTRATEGIEN, VERGLEICHBARKEIT**

---



# STUDIE ÜBER MORPHOLOGISCHE EFFEKTE BEI DER TAKTILEN MESSUNG VON BLISKS UNTER VERWENDUNG DIGITALER TWINS

**Anderson Schmidt, Robert H. Schmitt, Martin Peterek**

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Lehrstuhl Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, A.Schmidt@wzl.rwth-aachen.de, R.Schmitt@wzl.rwth-aachen.de, M.Peterek@wzl.rwth-aachen.de

---

*Abstract: Die Messung geometrischer Anforderungen an Blisks (Blade Integrated Disk) mit taktilen Sensoren an Koordinatenmessgeräten (KMG) ist immer noch gängige Praxis. Morphologische Effekte verursachen jedoch in der Regel Fehler bei der Kompensation der Tastkugel, wenn sich der Sensor über komplexe Geometrien, hauptsächlich um die Kante der Schaufel herum, bewegt. Fehler in Form, Position, Auswirkung der Tastkugel und in der Messstrategie sind so vermischt, dass eine Unterscheidung praktisch nicht realisierbar ist. Durch den Einsatz eines digitalen Twins ist es möglich, einige der oben genannten Fehlerquellen zu simulieren. Mit der Hilfe eines KMG-Simulators ist eine Einschätzung dieser Effekte, durch Einführung bekannter Abweichungen in das Blisk-CAD-Modell, möglich. Das Verständnis dieser morphologischen Effekte ist ein wichtiger Schritt in Richtung „smart connected manufacturing“. Es bildet ebenfalls die Grundlage für den Vergleich verschiedener Messprinzipien, sowie die Umsetzung der metrologischen Rückverfolgbarkeit, welches ein wichtiger Punkt der Qualitätssicherung und der Messprozessfähigkeit ist.*

KEYWORDS: BLISK, KOORDINATENMESSSYSTEME, DIGITAL TWIN

---

## 1. EINFÜHRUNG UND ENTWICKLUNG EIGENER BLISKS

Die Bedeutung des Luftverkehrs in den letzten Jahren ist stark gestiegen und die Anzahl der Flugpassagiere sowie der Einsatz von Flugzeugen hat deutlich zugenommen. Es wird prognostiziert, dass bis zum Jahr 2036 die Anzahl der Flugpassagiere auf circa 7,8 Milliarden und die Anzahl von neuen weltweit eingesetzten Passagier- und Frachtflugzeuge auf circa 40000 weiter steigen werden. [Chris, 2017], [BOEING, 2019], [AIRBUS, 2019]

Gleichzeitig nehmen die Ansprüche an Energieverbrauch, Nachhaltigkeit, Umweltfreundlichkeit und Reduzierung des Flugzeuglärms, zu. Um „grünen“ Flugverkehr zu etablieren, wird in verschiedenste Richtungen geforscht. Unabhängig der weiteren Entwicklung des Flugzeugs der Zukunft ist jedoch sicher: Triebwerke werden noch mindestens 20 bis 25 Jahre die Schlüsseltechnologie der Luftfahrt darstellen. [EURO, 2011], [Baharozu, 2017]

Alleine schon aus diesem Grund heraus wird eine stetige Optimierung und Effizienzsteigerung der Triebwerke angestrebt. In modernen Triebwerken werden 90 % des Vortriebs durch den Fan erzeugt, dessen Bauteilgröße jedoch durch den Schaufelraddurchmesser begrenzt ist. Um ein bestimmtes Verhältnis der

Fanggröße zum Kerndurchmesser einzuhalten, wird dieser ebenfalls möglichst klein gehalten. [Bräunling, 2015]

Der kleinere Kerndurchmesser betrifft wiederum auch andere Bauteile des Triebwerks, unter anderem werden die Blisks kleiner. Blisks fungieren im Triebwerk als Kompressoren und befördern den Luftstrom in die Brennkammern. Sie ermöglichen eine Gewichtseinsparung von 25 % bei sehr guten Leistungseigenschaften und spielen eine wesentliche Rolle, wenn es darum geht, in der Zukunft noch effizientere Triebwerke zu bauen, die weniger CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> ausstoßen und weniger Lärm emittieren. [Bräunling, 2015], [Grieb, 2009]

Um den benötigten Luftstrom mit einem kleineren Bliskdurchmesser zu ermöglichen, ist die Auslegung der Strömungsprofile entscheidend und es werden komplexere Geometrien erforderlich, während gleichzeitig die Toleranzen kleiner werden und warmfeste Materialien verwendet werden müssen, die deutlich schwieriger zerspanbar sind. Dieses Optimierungsproblem stellt eine Herausforderung für die Konstruktion, die Fertigung und die Qualitätssicherung dar.

Da Blisks aus der Industrie stark mit Geheimhaltungserklärungen geschützt sind, hat das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Zusammenarbeit mit den Instituten der RWTH Aachen, eine eigene Blisk entwickelt. Dabei wurde bereits darauf geachtet, dass das bereits beschriebene Optimierungsproblem der zunehmend komplexeren Schaufelgeometrie, anspruchsvolleren Werkstoffen und geringer werdenden Fertigungstoleranzen der Blisks mit einbezogen ist.

Aus messtechnischer Sicht stellt sich zuerst die Frage ob ein Messprozess mit aktuellen Koordinatenmesssystemen (KMS) (taktilen- bzw. optischen Messverfahren) angesichts der Verkleinerung des Toleranzfelds der Prüfmerkmale noch fähig wäre.

Im Hinblick auf diese Situation hat die Abteilung Model-based Systems des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement des WZL der RWTH Aachen angefangen an einer Lösung zu arbeiten, die eine Weitergabe valider Messdaten an die Fertigung im Sinne von „smart connected manufacturing“ garantiert. Unter smart connected manufacturing versteht man im Blickwinkel der Messtechnik besonders eine reibungslose Verknüpfung von Konstruktion, Fertigung und Messtechnik. Innovative Lösungen wie Internet of Production, die Digitalisierung und Vernetzung von Maschinen und Anlagen sowie der gesamten Produktions- und Wertschöpfungskette, sollen smart connected manufacturing unterstützen [Thoben, 2017]. Spezifikationen wie umati – universal machine tool interface – des VDMA, werden in naher Zukunft in der Lage sein, Daten über einen speziell konfigurierten OPC-UA-Server an eine Datendrehscheibe zu senden [Görisch, 2020].

Ziel dieses Vorhabens ist es zum einen die Untersuchung möglicher Einflussfaktoren, die die reale Geometrie des Werkstückes sowohl während der Extraktion des Messpunktes, als auch während der Assoziation des Geometrieelementes, zu beeinflussen. Zum anderen soll die Messunsicherheit

jedes einzelnen Geometrieparameters ermittelt werden. Zum Schluss soll untersucht werden inwiefern es möglich ist, die systematische Abweichung und die Messunsicherheit zu reduzieren, was einen unentbehrlichen Schritt für die Generierung der validen Daten ist.

Als Studienobjekt wurde eine Mini-Blisk mit der Hälfte des Durchmessers modelliert. Der Gehäuseradius des originalen Modells entspricht 220 mm.

## 2. STAND DER TECHNIK BEI DER MESSUNG VON BLISKS

### 2.1 Angewendete KMS bei der Qualitätssicherung von BLISK

Um die Geometrie einer Blisk zu erfassen, werden verschiedene KMS angewendet, wobei das KMG mit rotierendem Tisch sowie die Streifenlichtprojektion die am häufigsten verwendeten Verfahren sind. Dabei besticht das KMG besonders durch eine ausgeweitete Zugänglichkeit (innere Konturen und Merkmale) und eine hohe Genauigkeit bei kompletter Erfassung der Merkmale in einer Aufspannung/Fixierung mittels einer geeigneten Spannvorrichtung. Hinzu kommt der Vorteil, dass diese Geräte bereits auf eine lange Historie zurückblicken können und so ein hoher Erfahrungswert im Umgang mit KMG vorliegt. Allerdings sind die Informationen über alle Oberflächen lediglich in einer diskreten Form dargestellt. Die Profilformabweichung einer Schaufel wird durch mehrere Schnitte erfasst.

Dem hingegen erlaubt die Streifenlichtprojektion eine komplette Erfassung der sichtbaren Oberflächen in einem Bruchteil der Zeit. Allerdings müssen die Bauteile vor der Anwendung aufgrund von Reflexionsproblemen zuerst mattiert werden, was mit einem Spray realisiert wird. Trotzdem wird diese Technologie für die Digitalisierung der Oberfläche des Bauteils und für die Untersuchung im Bereich der Simulationen, FEM und CFD immer beliebter. Allerdings fehlt eine genaue Untersuchung der Einflussgrößen bzw. der Messunsicherheit. [Backhaus, 2017]

### 2.2 Qualitätssicherung von Blisks

#### 2.2.1. *Bildung des Werkstückkoordinatensystems*

Die Existenz eines Standards oder einer Richtlinie für die Qualitätssicherung von Blisks ist zurzeit nicht bekannt. Jeder Blisk-Hersteller verfügt über das notwendige Knowhow für die Qualitätssicherung seiner eigenen Produkte. So existiert eine unzählige Anzahl möglicher Messstrategien, mit denen man die Gestalt der Schaufel einer Blisk erfassen und auswerten kann. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Energieeffizienz des gesamten Triebwerks [Bräunling, 2015]. Ein wichtiger Punkt bei der Qualitätssicherung derartiger Bauteile ist die Bildung des Koordinatensystems bzw. die Bestimmung der Stapelachse. Die Stapelachse ist diejenige, an der die Schaufelschnitte aufgestapelt sind (Stacking axis). Eine häufig verwendete Vorgehensweise für die Erstellung eines

Werkstückkoordinatensystems (WKS) ist die bekannte A|B|C Ausrichtung. Die sechs Freiheitsgrade eines Bauteiles werden in drei translatorische Freiheitsgrade, oder Verschiebefreiheitsgrade, und drei rotatorische Freiheitsgrade, oder Verdrehfreiheitsgrade, aufgeteilt. Hier wird die Raumausrichtung des WKS durch eine Ebene definiert. Diese Ebene wird als Primärbezug verwendet und legt durch den Nullpunkt in Z-Richtung eine translatorische und zwei rotatorische Freiheitsgrade fest. Die Bohrung bildet den Sekundärbezug und legt die X- und Y-Koordinaten und somit zwei translatorische Freiheitsgrade des WKS fest. Die Drehung wird durch einen vorgegebenen Schnitt an der ersten Schaufel definiert. Durch ein Best-Fit zwischen Soll-Kontur und Ist-Kontur wird der tertiäre Bezug der verbleibenden dritten rotatorischen Freiheitsgrade gebunden und damit alle sechs Freiheitsgrade des WKS definiert, indem die Drehung der Z-Achse frei geschaltet wird. Die Verschiebung eines festen Betrages in Z-Richtung definiert die Stapelachse und die Lage der ersten Schaufel. [5459, 2013]

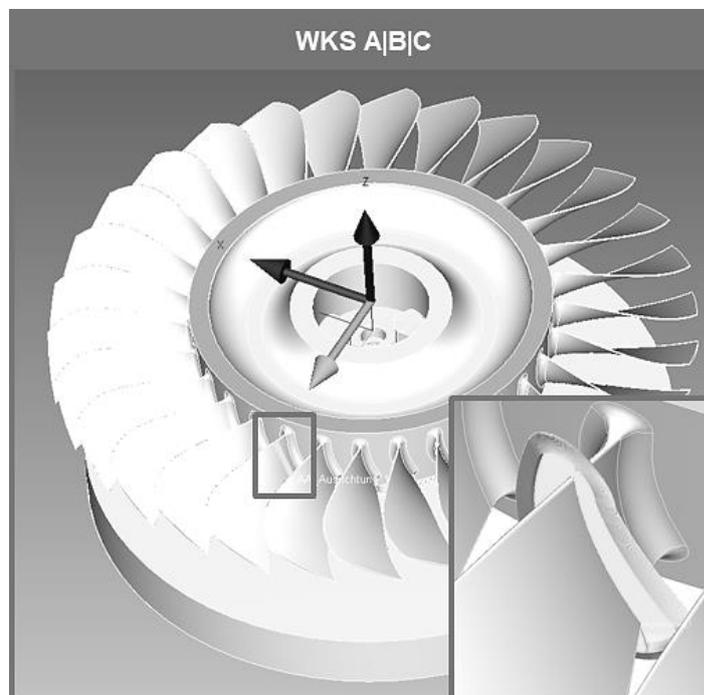


Abb. 1: Koordinatensystem A|B|C Schnitt auf die ersten Schaufeln für die Drehung um Z-Achse

### 2.2.2. Erstellung des Messprogrammes auf ein KMG

Um die Messzeit zu reduzieren, werden die Messprogramme mit Hilfe eines CAD-Modells und Simulatoren geschrieben, so dass das Messprogramm bereits vor dem ersten Bauteil fertig ist. Diese Parallelisierung der Aktivitäten spart Zeit und die virtuelle Umgebung erlaubt die Vorhersagen möglicher Probleme. In dem CAD-Modell werden die im Prüfplan vorgegeben Positionen und Bahnen erzeugt. Während der Messung steuert das KMG den Sensor, normalerweise eine Kugel, über die gekrümmte Oberfläche. Diese Art von Scanning nennt man gesteuertes Scanning. Die Steuerung des KMGs registriert die Lage des Kugelmittelpunktes und regelt die Achsen des KMGs (3 bis mittlerweile 6- Achsen) so, dass die Tastkopfauslenkung innerhalb eines definierten Bereichs auslenken kann.

### 2.2.3. Merkmale

Mit den heutigen KMS ist die komplette Charakterisierung und die 3D-Darstellung der Abweichungen möglich. Trotzdem werden die Schaufeln aus historischen Gründen lediglich in 2D-Schnitten gemessen. Noch vor der Entstehung des KMGs, wurden die Schaufeln, damals noch als Einzelblätter, mithilfe von Lehren, Messprojektoren und mechanischen bzw. manuellen Einstellvorrichtungen aufgenommen, die dann die Entwicklung der Kontur und die Lage entlang der Stacking-Axis, kontrolliert haben. Nicht nur die Merkmale wie z.B. Chord length, Twist Angle, Leading- und Trailing-Edge (LE und TE), sondern auch die Darstellung der Plots, werden heute nach wie vor, aus den genannten Gründen, in der XY-Ebene dargestellt. [Bräunling, 2015], [ZEISS, 2017]

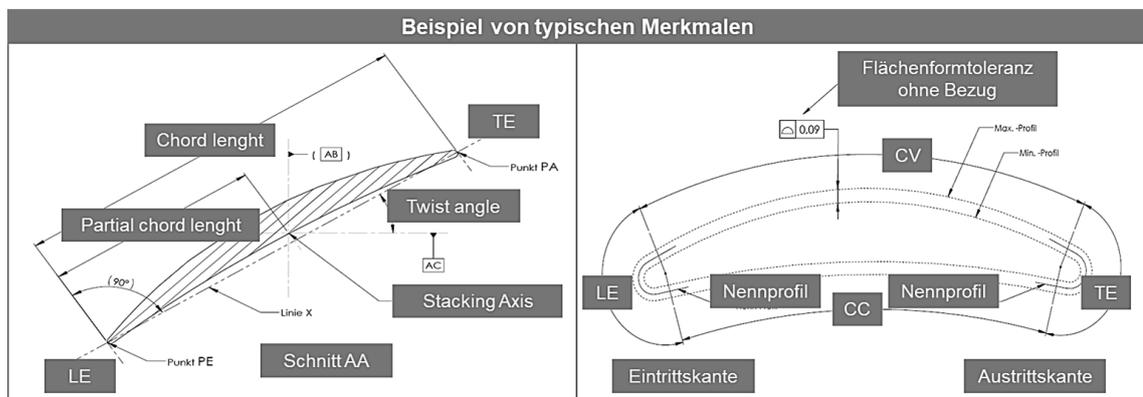


Abb. 2: Beispiele von typischen Blisk-Merkmalen

## 3. VORSTUDIE

In einer Vorstudie wurde zuerst untersucht, wie die Ortsabweichung bzw. die Position der ersten Schaufel, die auch für die Fixierung der Drehung des WKSs verantwortlich ist, und einer zweiten beliebigen Schaufel die anderen Merkmale wie Formabweichung und dimensionale Größen (chord length, maximal thickness, usw.), beeinflussen.

Für die Untersuchung wurde ein teilfaktoriell gefertigtes Design of Experiment (DoE) vorbereitet [Siebertz, 2017]. Bei dem ersten Versuch wurden die beiden Schaufeln nur in der Ebene senkrecht zur Stacking-Axis bewegt. So wurden vier Quadranten definiert: pp (X plus, Y plus), pm (X plus, Y minus), mp (X minus, Y plus) und mm (X minus, Y minus). Es wurde für jede Kombination ein neues CAD-Modell mit den bekannten Abweichungen erstellt. Jede Schaufel wurde in sieben verschiedenen Schnitten gemessen. Jede Einstellung wurde mit drei verschiedenen Kugeldurchmessern simuliert, die auch in der alltäglichen Messung eines solchen Bauteils zum Einsatz kommen (2 mm, 3 mm und 4 mm Kugeldurchmesser). Die Simulation der Messung wurde mit der Software I++ Simulator gemeinsam mit der Software Quindos7 der Firma Hexagon erstellt. Für die Auswertung der Merkmale wurde die Software BladePro der Firma Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH verwendet.

Bemerkenswert war bei der Beobachtung des LE- und TE-Plots aus der Simulation die Existenz einer Formabweichung, obwohl die Schaufel nur in ihrer Lage geändert wurde. Der Vergleich dieses Plots mit realen Plots aus alten Messungen in unserem Institut hat eine verblüffende Ähnlichkeit gezeigt, woraus folgende Forschungshypothese aufgestellt wurde: Die Berührung der Oberfläche an der falschen Stelle, verursacht durch einen Unterschied zwischen dem CAD-Modell und dem realen Bauteil sowie der Auswahl des gesteuerten Scannings und dem Algorithmus für die Tasterradiuskompensation, haben zu einer Formabweichung im Endresultat geführt.

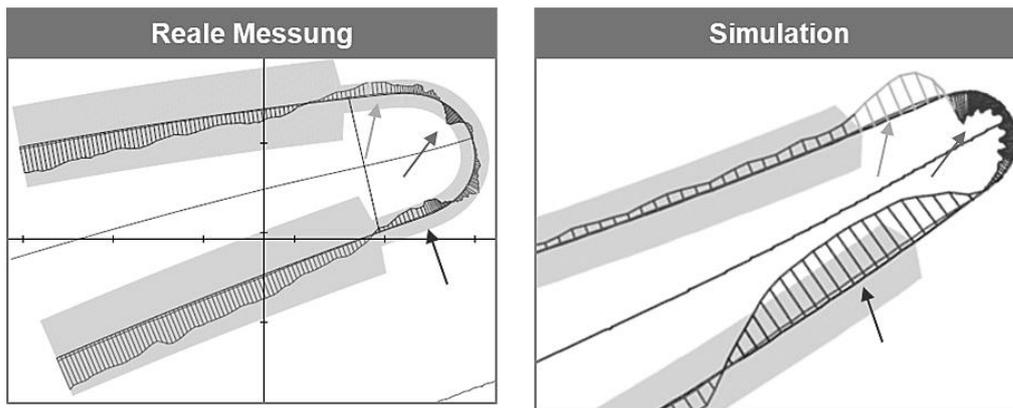


Abb. 3: Vergleich von realer Messung mit der Messung aus der Simulation (TE-Plot)

## 4. STUDIE DER MORPHOLOGISCHEN EFFEKTE

### 4.1 Virtuelle und reale Umgebung

Zur näheren Untersuchung der auftretenden morphologischen Effekte wurden zwei Messumgebungen geschaffen durch deren Verknüpfung Aussagen über die reale Existenz eines Formfehlers oder der Existenz eines reinen Messfehlers getroffen werden können. Während bei einer realen Messung auf dem KMG alle möglichen Fehlerquellen zum Tragen kommen können, berücksichtigt die virtuelle Simulation der Messung ausschließlich morphologische Effekte.

### 4.2 Einstellvorrichtung

Um das Phänomen einer Formabweichung durch bloße Lageänderung besser zu verstehen, wurde eine Einstellvorrichtung entwickelt, in der die Lage der einzelnen Schaufeln beliebig in allen sechs Freiheitsgrade verändert werden kann. In der ersten Phase werden die morphologischen Effekte mittels einer vereinfachten Schaufel erforscht. Auf die erste Schaufel wird das Koordinatensystem A|B|C ausgerichtet, um dann auf der zweiten Schaufel den Einfluss der Summe der Lageabweichung zu analysieren. Daher wurde die Studie in zwei Phasen geteilt. In der ersten Phase wird eine vereinfachte Schaufel konstruiert, in der zweiten Phase wird die beim IPT/IST entwickelte Schaufel im Maßstab 1:1 an der Einstellvorrichtung montiert.

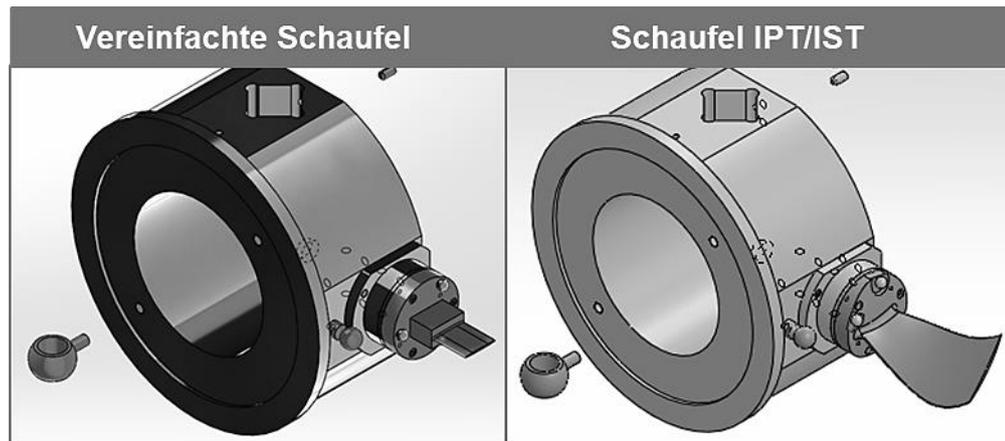


Abb. 4: Darstellung der beiden Projektphasen

Anschließend wurde durch Reverse Engineering für jede vereinfachte Schaufel ein sogenannter Digital Twin erstellt. Die Bauteile wurden in einem KMG mit Drehtisch kalibriert, wobei der Drehtisch nur für die Positionierung des Bauteils verwendet wurde. Jede Schaufel wurde in zwei Positionen kalibriert. Die erfassten Konturen wurden dann mithilfe der Software BladePro ausgewertet. Für jedes Merkmal wurde mit Hilfe des aktuellen VCMM eine Messunsicherheit ermittelt [Heißelmann, 2018].

Die ermittelte erweiterte Messunsicherheit für die Linienformabweichung waren an Schnitt A-A  $2,7 \mu\text{m}$  und an Schnitt B-B  $5,9 \mu\text{m}$ , mit dem Erweiterungsfaktor  $k=2$  und mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Werteintervall.

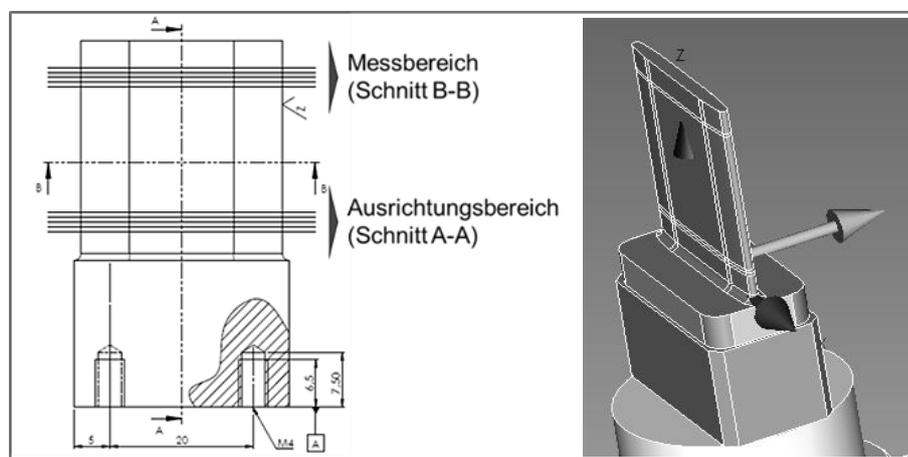


Abb. 5: Messbereiche der vereinfachten Schaufel

Die beiden Digital Twins wurden nun an der CAD-Modell entschärfenden vereinfachten Schaufelnummer 1 (vS1) und vereinfachten Schaufelnummer 2 (vS2) montiert und angepasst. Die Restabweichung der Digital Twins lagen dabei innerhalb der ermittelten Messunsicherheit.

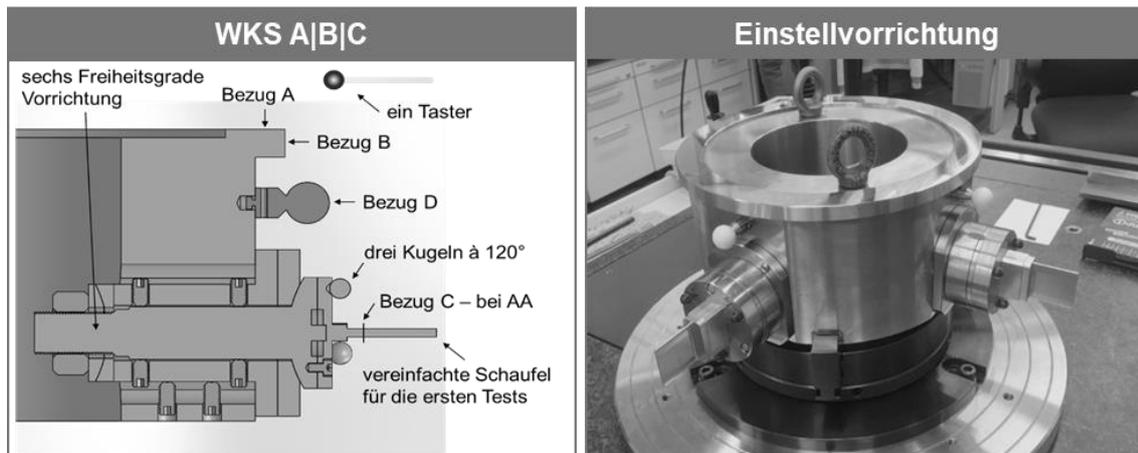


Abb. 6: Einstellvorrichtung

### 4.3 Versuchsplanung

Für die Veränderung der Position der Schaufeln wurde ein Betrag von  $\pm 0,2$  mm bestimmt, was den aktuellen Toleranzen für diese Art von Merkmalen entspricht. Die grobe Einstellung der neuen Positionen wurden mit Messuhren mit einer Skalenteilung von 0,01 mm realisiert. Zur Überprüfung der richtigen Einstellung und zu genaueren Analyse der exakten realen Lage wurde die Positionierung und Lage jedes einzelnen Bauteils durch die drei Kugeln an der Basis der Schaufel überprüft.

Im Folgenden soll ein grober Versuchsablauf skizziert werden: Die Messung der veränderten Blisk erfolgte mit der Software Calypso und die Auswertung mit Hilfe des Programms BladePro. Dabei wurde die Veränderung der Position, bzw. die Transformation mittels einer Drehmatrix in der Software Calypso bestimmt und im ASCII Format exportiert. Anschließend war es möglich, die als Drehmatrix gespeicherte Positionsveränderung der realen Schaufel unter Verwendung der Software FreeCAD und Python auf die Schaufel im CAD-Modell zu übertragen.

Der aktuelle Digital Twin wurde mithilfe der Software Quindos und dem I++ Simulator virtuell gemessen. Die Auswertung der neu erstellten Prüfmerkmale erfolgte wiederum in BladePro. Im Versuchsablauf wurden verschiedene Einstellungen der Schaufeln verwendet, wobei vS1 über fünf Einstellszenarien (Null, mm, mp, pm, pp) hinweg verändert wurde, während die Einstellmöglichkeiten für vS2 auf 4 begrenzt waren (ohne Null). Des Weiteren wurden Taster mit den Durchmessern 3 mm und 4 mm eingesetzt und entsprechend einem Ablaufplan kombiniert.

## 5. UNTERSTÜTZUNG DURCH STREIFENLICHTPROJEKTION

Zuletzt wurde eine Alternative gesucht, um die Ist-Lage zu bestimmen und die Scanningkurve so zu steuern, dass die Messungen an der richtigen Position durchgeführt werden können.

Dafür wurde die verwendete Einstellvorrichtung mittels eines Streifenlichtprojektionsmesssystems digitalisiert. Für die zugrundeliegende Technologie hält die Firma Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH ein Patent [Imkamp, 2016]. Die ermittelte STL Datei wurde anschließend mit dem Original CAD-Modell verglichen. Durch eine Reihe von Transformationen und Best Fit Korrekturen wurden die Drehmatrix für die Steuerung der Bahnkurven im KMG bestimmt. Nach der Umrechnung der Matrix in Verschiebungsfaktor und Eulerwinkel wurde für jeden einzelnen Schnitt ein lokales Koordinatenmesssystem ermittelt und die Messung erneut durchgeführt.

## 6. DISKUSSION DER ERGEBNISSE:

Der Einfluss der Positionsänderung der Schaufeln auf die Prüfmerkmale Länge, Form-, und Positionsabweichung an Schnitt B-B der vS2 wurde im Zuge eines Experiments getestet. Die taktile Messung der Einstellvorrichtung erfolgt in einem KMG PRISMO Navigator mit Drehtisch und die optische Messung wurde manuell mit einer SLP COMET L3D 8M der Firma ZEISS in einem Messraum der Güteklasse 4 nach VDI/VDE 2627 durchgeführt. Die Messunsicherheit für die Messung am KMG wurde mit VCMM und sowohl die Simulationsergebnisse als auch die Ergebnisse der Datenfusion wurden nach GUM ermittelt. Es wurde der Schnitt B-B bei der Einstellung pp (vS1) und pm (vS2) untersucht. Die taktilen Messungen erfolgen mit einem Kugeldurchmesser von 3,0 mm.

Merkmale / mm	KMG	Simulation	Datenfusion
<i>Chord length</i>	27,3991 ± 0,0020	27,3989 ± 0,0012	27,4020 ± 0,0031
<i>Max. Thickness</i>	1,9912 ± 0,0010	1,9920 ± 0,0005	1,9952 ± 0,0015
<i>LE</i>	0,0059 ± 0,0017	0,0043 ± 0,0006	0,0094 ± 0,0021
<i>TE</i>	0,0061 ± 0,0032	0,0050 ± 0,0006	0,0083 ± 0,0047
<i>CC</i>	0,0052 ± 0,0021	0,0015 ± 0,0006	0,0112 ± 0,0041
<i>CV</i>	0,0061 ± 0,0014	0,0010 ± 0,0006	0,0108 ± 0,0022
<i>Positionsabw. in X-Richtung</i>	-0,6771 ± 0,0017	-0,6763 ± 0,0019	-0,6723 ± 0,0092
<i>Positionsabw. in Y-Richtung</i>	0,4022 ± 0,0054	0,4011 ± 0,0036	0,429 ± 0,013

Tab. 1: Übersicht der Auswertungsergebnisse (pp\_pm, vS2, Schnitt B-B)

Die Messergebnisse zeigen eine Übereinstimmung zwischen der realen Messung und der simulierten Messung hauptsächlich für die Positionsabweichung und dimensionale Länge, während die Formabweichung der simulierten Messung minimal kleiner sind. Die Datenfusion zwischen dem KMG und der optischen Messung mittels Streifenlichtprojektion, hat nicht die erwartete Verbesserung gebracht.

Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis liegt in der Qualität der Punktwolke, die mit einer zu kleinen Auflösung erfasst wurden, sodass die Anzahl der Posen und infolgedessen die Anzahl des Stitching zu groß waren. Außerdem gab es zu vielen Lücken in der Region der LE und TE, was die Einpassung der Punktwolke gegenüber dem CAD Modell in der Z Richtung des Koordinatensystems stark beeinflusst hat.

Ein weiterer möglicher (negativer) Einfluss auf das Ergebnis ist die manuelle Durchführung der Messung. Der Einfluss des Bedieners wurde in einer internen ANOVA Studie (Messvolumen bzw. Auflösung, Anzahl von Posen, Mattierung usw.) untersucht und bestätigt. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Messung von Blisks in der Industrie in speziellen robotergestützten Zellen durchgeführt wird. Aus diesem Grund kann zum jetzigen Stand der Forschungen keine generelle Aussage über die Datenfusionsstrategie getroffen werden.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Die ersten Messergebnisse zeigen bis jetzt, dass sich die Abweichungen für die Merkmale jeweils innerhalb der ermittelten Messunsicherheit befinden. Dies zeigt, dass der morphologische Einfluss des Tasters gut mittels Simulationen untersucht werden kann. Allerdings scheint die ausgewählte Form bzw. Auslegung der vereinfachten Schaufel nicht komplex genug um die Effekte aus der Vorstudie zu erkennen. In der nächsten Phase der Untersuchung werden zuerst die Einflussgrößen, die an der physischen Messung am KMG präsent sind, weiter betrachtet. Dazu gehören das dreiachsige Scanning, das vierachsige Scanning, die Auswahl eines oder zwei Tasters sowie die Geschwindigkeit der Scannung. Anschließend werden dann die Messungen erneut durchgeführt, dieses Mal mit der geometrisch komplexeren Schaufel, bei welcher eine größere Ausprägung des Effekts erwartet wird. Die Datenfusion zwischen den beiden KMS hat teilweise wie erwartet funktioniert, auch wenn hier die gemessenen Abweichungen innerhalb der ermittelten Messunsicherheit liegen. Abschließend kann festgehalten werden, dass eine Optimierung der Messung von Blisks unabdingbar ist, um im Fertigungszyklus smart connected manufacturing valide Messdaten an die Fertigung zu übermitteln.

## 8. QUELLEN

[AIRBUS, 2019] AIRBUS: Global Market Forecast-2019-2038-Airbus-Commercial-Aircraft-book. AIRBUS, 2019).

[Backhaus, 2017] Backhaus, T.; Harding, M. et al.: Validation Methods for 3D Digitizing Precision Concerning Jet Engine BLISKS, 2017.

[Baharozu, 2017] Baharozu, E.; Soykan, G.; Ozerdem, M. B.: Future aircraft concept in terms of energy efficiency and environmental factors. In: Energy, 140. Jg., 2017, S. 1368–1377.

[BOEING, 2019] Boeing: Commercial Market Outlook 2019-2038. Boeing, 2019.

- [Bräunling, 2015] Bräunling, W. J. G.: Flugzeugtriebwerke. Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme. (Reihe: VDI-Buch). 4. Aufl. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [Chris, 2017] Chris, G.: IATA 20-year Passenger Forecast. IATA, 2017.
- [EURO, 2011] Flightpath 2050. Europe's vision for aviation ; maintaining global leadership and serving society's needs ; report of the High-Level Group on Aviation Research: Publ. Off. of the Europ. Union. Luxembourg, 2011.
- [Grieb, 2009] Grieb, H.: Verdichter für Turbo-Flugtriebwerke: Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Heißelmann, 2018] Heißelmann, D.; Franke, M.; Rost, K.; Wendt, K.; Kistner, T.; Schwehn, C.: Determination of measurement uncertainty by Monte Carlo simulation. In: 1793-0901, 89. Jg., 2018, S. 192–202.
- [Imkamp, 2016] Imkamp, Dietrich: System zum dimensionalen Messen eines Objekts. P22747DE\_IMT\_DE102016120557A1.
- [Görisch, 2020] Görisch, G.; Broos, A.: umati (universal machine tool interface). umati: Die universelle Schnittstelle für Werkzeugmaschinen - VDW. URL: <https://vdw.de/technik-und-normung/umati/> [Stand: 06.01.2020].
- [Siebertz, 2017] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [Thoben, 2017] Thoben, K.-D.; Wiesner, S.; Wuest, T.: "Industrie 4.0" and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples. In: International Journal of Automation Technology, 11. Jg., 2017, Nr. 1, S. 4–16.
- [ZEISS, 2017] Zeiss: Blade Pro 2.2. Bedienungsanleitung.
- [5459, 2013] DIN EN ISO 5459:2013-05, Geometrische Produktspezifikation (GPS)\_- Geometrische Tolerierung\_- Bezüge und Bezugssysteme (ISO\_5459:2011); Beuth-Verlag, Berlin, 2013.



# SPEZIFISCHE SCANNING-ANTASTABWEICHUNGEN AUF TAKTILEN 3D-KOORDINATENMESSGERÄTEN

**Marco Weißgerber, Sven Fiebig, Sophie Gröger**

Technische Universität Chemnitz, Professur Fertigungsmesstechnik,  
marco.weissgerber@mb.tu-chemnitz.de

---

*Abstract: Den taktilen, speziell scanningfähigen 3D-Koordinatenmessgeräten kommt in der geometrischen Fertigungsmesstechnik nach wie vor eine umfassende Bedeutung zu. Zur Auswahl, Überprüfung und Analyse zugehöriger Systeme werden dabei häufig direkt oder indirekt Kennwerte der Antastabweichung aus der Normreihe ISO 10360 hinzugezogen. Eine Abbildung und Bewertung messaufgabenspezifischer Fähigkeiten und Grenzen sowie der Folgen einer Variation bestimmender Stellgrößen innerhalb der Extraktionsstrategie sind damit allerdings nicht möglich, zugehörige wissenschaftliche Lösungsansätze nicht ganzheitlich. Im Rahmen dieses Beitrags sollen daher mögliche Wechselwirkungen von unter anderem Scanning-Geschwindigkeit und Tasterorientierung an mechanisch bearbeiteten, metallischen Oberflächen vorgestellt werden, was den Ausgangspunkt für die weitere Diskussion sensorspezifischer und sensorübergreifender Erkenntnisse bilden soll.*

**KEYWORDS: KOORDINATENMESSGERÄTE, ANTASTABWEICHUNG, SCANNING, EINFLUSSGRÖSSEN**

---

## LITERATURHINWEIS

[Weißgerber, 2019] Weißgerber, M.: Bestimmung der spezifischen, oberflächenbedingten Scanning-Antastabweichungen für taktile 3D-Koordinatenmessgeräte. Dissertationsschrift. Technische Universität Chemnitz, Universitätsverlag, 2019.