

Michael Dietzsch, Sophie Gröger (Hrsg.)

XIII. Internationales Oberflächenkolloquium

1. Treffen

"Industry meets standardization and science" – IMSAS

12.-14. März 2012

an der

Technischen Universität Chemnitz

Tagungsband



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ**

**Universitätsverlag Chemnitz
2012**

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Chemnitz

09107 Chemnitz

<http://www.bibliothek.tu-chemnitz.de/UniVerlag/>

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://www.mv-verlag.de>

ISBN 978-3-941003-55-2

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-83738>

Inhaltsverzeichnis

Vision of the international GPS-Standards Nielsen, H., Dietzsch, M.	1
Deutsche Normungsstrategie: Normung sorgt für Qualitätssicherung, Austauschbarkeit und Kompatibilität von Produkten Zymnossek, J.	15
Stand der Normung zu Kanten und Radien Dietzsch, M.	21
Einfluss von Radien und Fasen auf die Festigkeitsberechnung Leidich, E., Brůzek, B.	32
Vorgehen bei der Bewertung von Kantenbrüchen und Radien Zimmer, M.	40
Anwendung der Bosch-Norm zur Messung von Kantenbrüchen mit Hilfe von optischer Oberflächenmesstechnik Grübler, T.	48
Erzeugung und Charakterisierung komplexer Kantengeometrien Dethlefs, A., Uhlmann, E.	56
Reproduzierbare Verrundung von Schneidkanten an Mikrowerkzeugen Thiel, W.	63
Schneidkantenpräparation und Beschichtung: Schlüsselrollen beim Optimieren von Hochleistungswerkzeugen Lümkemann, A., Büchel, C., Cselle, T., Morstein, M.	71
Kantenspezifikation durch Volumenelemente Zind, S., Dültgen, P.	79
- Schneidkantencharakterisierung- Anforderungen und Erfahrungen aus Sicht einer Werkzeugforschungseinrichtung Lahmann, H.-W., Preiß, P.	87
Radiusbemaßung und -messung von Wälzlagern Ammon, E.	95
Optische 3D-Messung von Kanten und Radien an Werkzeugen und Bauteilen Frankowski, G.	103
Kantengeometrien reproduzierbar messen und auswerten Volk, R.	111
Auswertestrategien zur Verifikation komplexer Konturen Kedziora, H.-J.	119

Messmöglichkeiten und Kalibrierstrategien für UV-Licht-basierte optische 3D-Sensoren zur Messung und Bewertung von „scharfen“ Schneidkanten Liedmann, M.	127
Optische Darstellung von Kanten und Radien Stanzel, F., Sachs, R.	133
Automatisierte Kantenradienmessung und -auswertung Klöden, R.	141
Messung von Radius und Kantenbruch mit Multisensor-Koordinatenmesstechnik Christoph, R., Schmidt, I.	149
Scannen und Auswerten mit KMT zur Reibtiefenmessung und Aufzeigen weiterer praktikabler Lösungen für Kanten- und Radienmessungen Wanner, J.	166
Auswirkung verschiedener Auswertestrategien auf die Radiusmessung von Schneidkanten Felgner, A., Helml, F., Krüger-Sehm, R., Küng, A., Meli, F., Grabner, M.	174
Konfokales Messsystem zur Geometrie- und Rauheitsmessung an Klingen und Schneidkanten Wiora, G., Grigat, M., Valentin, J.	184
Richtige Beurteilung von Radien und Kanten mittels MSA oder Prüfprozesseignung? Ofen, R.	192
Anwendung von Filtern nach ISO 16610 an unterbrochenen Oberflächenprofilen Seewig, J.	200
Anwendung einer Methode zur objektiven Bestimmung von Radien aus gemessenen Profilen Frühauf, J., Jeß, S.	210



Dr. Henrik S. Nielsen,
Chairman, ISO TC 213

Prof. Dr.-Ing. Michael Dietzsch
TU Chemnitz

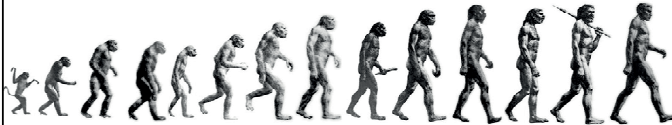
VISION OF THE INTERNATIONAL GPS-STANDARDS

VISION DER INTERNATIONALEN GPS-NORMEN

1



The Evolution of Requirements



- GPS follows developments in industry
 - From measuring on the drawing
 - Over dimensional tolerances
 - And hybrid tolerances
 - Geometrical tolerances as Band-Aids for dimensional tolerances
 - To pure geometrical tolerancing
 - All tolerance zones are locked to a functionally correct datum system

2



In the Good Ole Days...

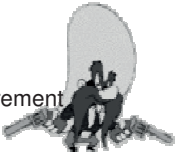




- Transformation from craft to industry
 - Emerging need for interchangeable components



- Design and manufacturing are close to each other
 - Easy communication
- Large dimensional tolerances
 - Compared to form capability
 - Form could be ignored during measurement
- Tribal knowledge
 - Many important requirements are not documented



1880



The Evolution of Products









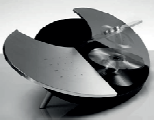




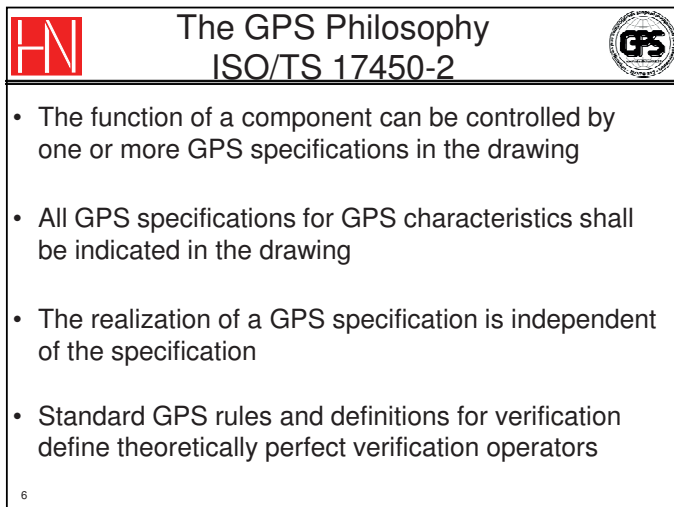
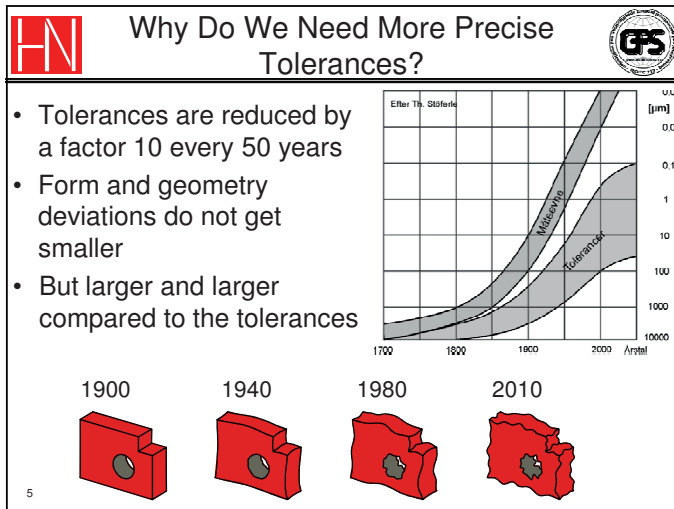








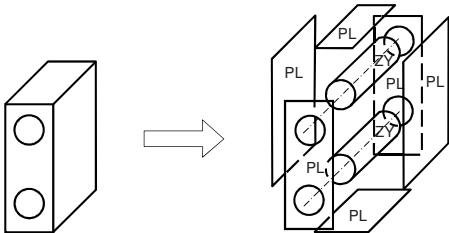
Et samarbejde mellem: Dansk Standard – ISO GPS Consulting & HN Metrology Consulting





Components are Made up of Features





7



ISO 8015: The Feature Principle



- Components are made up of features with natural limits
- Each GPS specification applies to the entire indicated feature
- Each GPS specification applies to only one feature
- Unless otherwise indicated

8



General GPS Standards Chains of Standards



- Chain link 1-3 are necessary to define an unambiguous specification
- Chain link 4-6 defines the verification (the measured value)

Chain Link						
1	2	3		5	6	7
Drawing Indication - Code	Tolerance Definition – Theoretical definition of the characteristic	Definition of the characteristic on the real workpiece Specification operator	Comparison of the defined and the measured characteristic	Measured value of the characteristic for the real workpiece Verification operator	Definition of metrological characteristics for measuring equipment	Calibration and verification of metrological characteristics for measuring equipment
Specification of GPS Characteristics				Verification of GPS Characteristics		

9

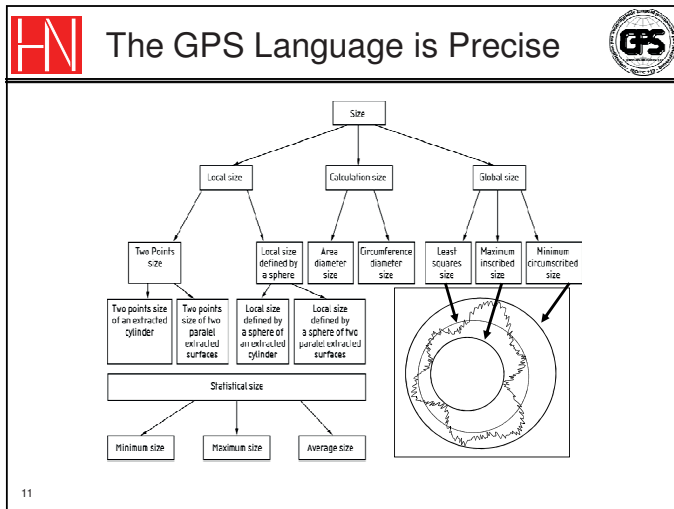


ISO 8015: The Duality Principle



- A GPS specification defines a specification operator independently of measurement procedures and measurement equipment
- The GPS specification is realized in a verification operator that is independent of the specification
 - The intent is that the verification mirrors the specification
 - Measurement uncertainty is used to evaluate if the verification is suitable

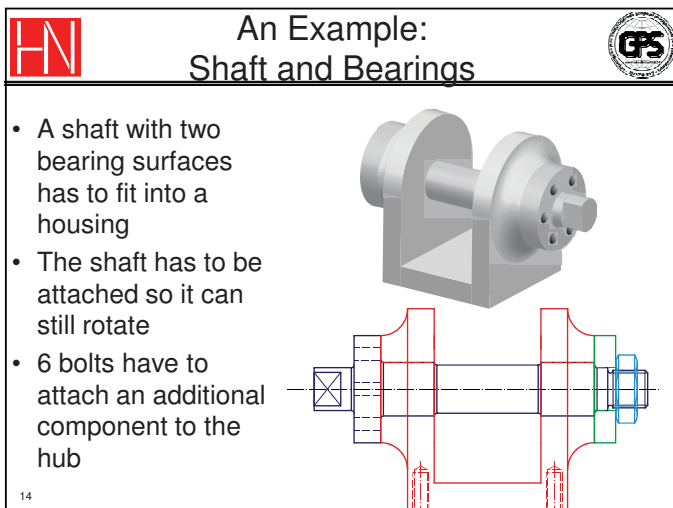
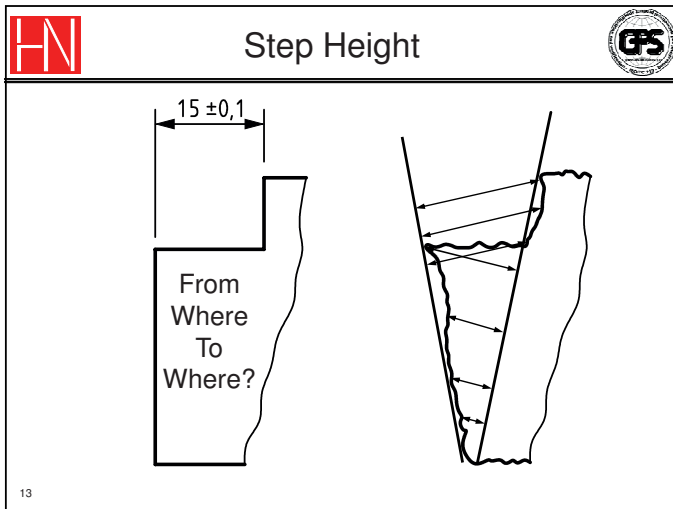
10



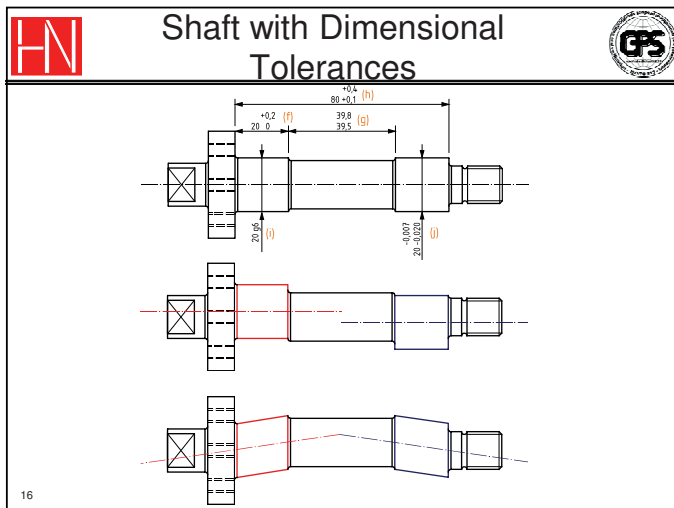
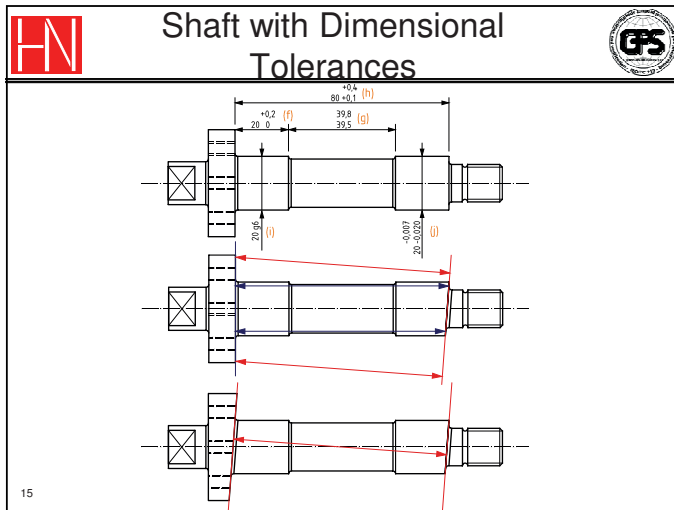
HN 

The Problem with Dimensional Tolerancing

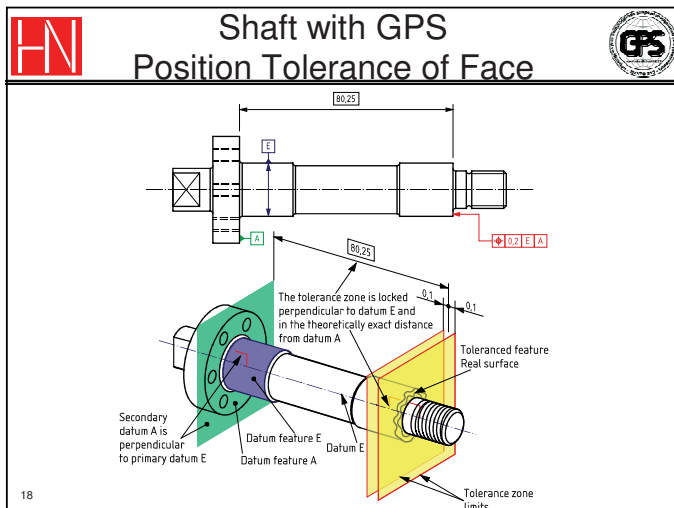
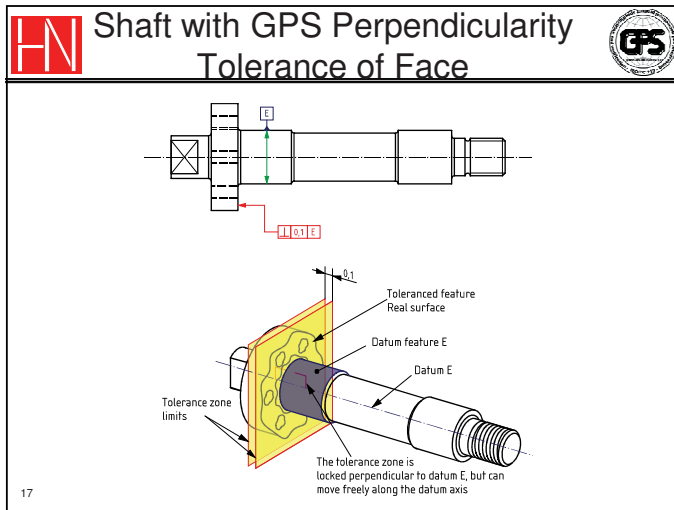
12 



1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



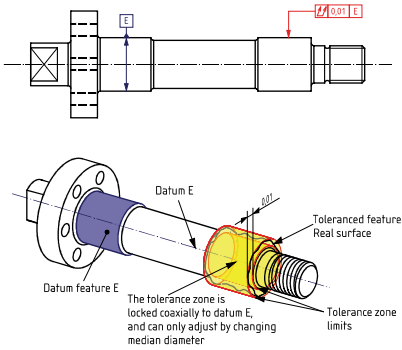
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien





Shaft with GPS Total Runout Tolerance of Bearings





The tolerance zone is locked coaxially to datum E, and can only adjust by changing median diameter

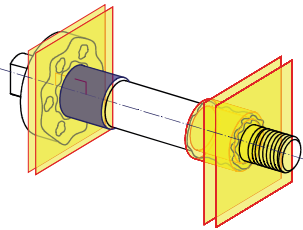
19



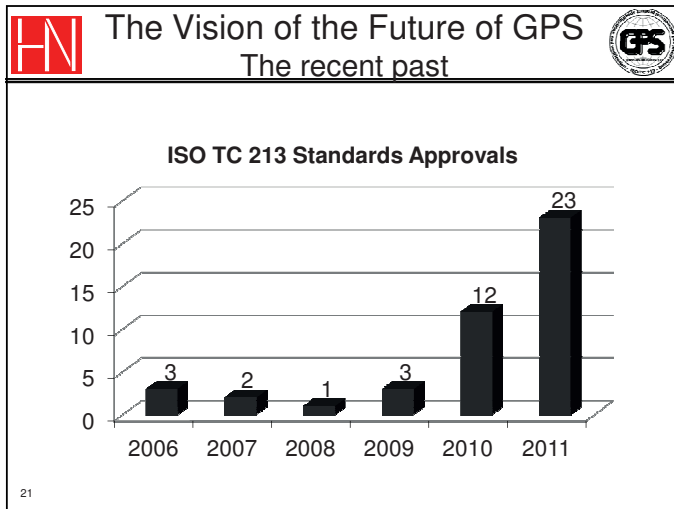
Shaft with GPS All Tolerances Locked Together



- In GPS you can lock tolerance zones together
- Consistent datum systems ensure that the tolerance zones are locked in the same coordinate system
- Geometrical tolerances are the primary tolerances in GPS



20



- HN** The Vision of the Future of GPS
The recent past
- ISO 1101:2012:
 - 3D indications
 - New modifiers, e.g. uneven zone
 - ISO 5459:2011 (Datums):
 - Define association
 - Define rules
 - First update since the IBM PC was introduced
 - ISO 8015:2011 (Fundamental rules):
 - Definition and expression of all the unwritten rules of GPS
- 22

The Vision of the Future of GPS
Phase 1 (2011-2015)

- ISO 1101:
 - Modifiers
 - Tolerance filtered features
 - Change association criteria
 - Tangent feature
 - Least squares feature
- ISO 5459 (Datums):
 - More association details
 - Modifiers
 - Filtering
 - Association

23

The Vision of the Future of GPS
Phase 1 (2011-2015)

- ISO 12180, 12181, 12781, 12781 (Form):
 - More defaults (filters, nesting indices)
 - Combination into one overall form standard
 - Expansion to cover all geometric characteristics (the 14 symbols)
- Rule based standards
 - Update ISO 1660 (Profile tolerancing) and ISO 5458 (Positional tolerancing) to rule based standards
 - Instead of example based standards
 - Pilot project for converting ISO 1101 in phase 2

24

The Vision of the Future of GPS
Phase 1 (2011-2015)

- Modernize general tolerancing
 - Eliminate the dangers of ISO 2768-1 and especially ISO 2768-2
- Tolerancing of functional edges
 - Current tools are very limited
- Define actual characteristic values and signed characteristics for geometrical tolerances
 - Define measured values, not just zones

25

The Vision of the Future of GPS
Phase 1 (2011-2015)

- New specifications:
 - Population specifications (statistics)
 - Contacting features
 - Forces
 - Specification of assemblies incl. moveable assemblies, e.g. bearings

26

The Vision of the Future of GPS
Phase 2 (2015-2020)

- New rule based ISO 1101
 - One number, multiple parts
 - Better name recognition
 - Easier maintenance
 - Include:
 - ISO 1101
 - ISO 5459
 - ISO 1660
 - ISO 5458
 - ISO 2692 (Maximum and least material)
 - New ISO form standard from phase 1
 - ISO 10579 (Constrained and free state)
 - Standard on assemblies from phase 1
 - Standard on contacting features from phase 1

27

The GPS of the Future

- More precise
 - Rules instead of examples
- More flexible
 - Modifiers to express the exact functional need
- More capable
 - Better ability to define compound features
 - Broadening the concept of feature of size
 - Use contacting features to express requirements
 - Express requirements to assemblies
 - 28 – Express population requirements

Deutsche Normungsstrategie: Normung sorgt für Qualitätssicherung, Austauschbarkeit und Kompatibilität von Produkten

XIII. Internationales Oberflächenkolloquium

Jörg Zymnossek

DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Am DIN-Platz

Burggrafenstr. 6

10787 Berlin

Joerg.Zymnossek@din.de

Abstrakt: In wirtschaftlich turbulenten Zeiten sind verlässliche und wettbewerbsorientierte Rahmenbedingungen entscheidend, zu denen Normung und das Deutsche Institut für Normung e. V. (DIN), als nationale deutsche Normungsorganisation, wichtige Beiträge leisten. Für die exportorientierte deutsche Wirtschaft sind Instrumente zum Abbau von Handelshemmnissen und zur Schaffung globaler Märkte unverzichtbar. Mit dem Ziel, eine frühzeitige Berücksichtigung von Normungsaspekten im Forschungsprozess zu verstärken, und Innovationen der Zukunft optimale Rahmenbedingungen zu bieten sowie ihre Marktfähigkeit durch rechtzeitige Normung und Standardisierung zu verbessern, fördert das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) das Vorhaben zum "Transfer von Forschungsergebnissen durch Normung und Standardisierung" (TNS), sowie das Vorhaben "Innovation mit Normen und Standards" (INS). Im Rahmen eines solchen geförderten INS-Projektes wurde die Harmonisierung der Schnittstellen der grundlegenden Produktinformationen "Technische-Produkt-Dokumentation" und "Geometrische-Produkt-Spezifikation" untersucht und eine Zusammenführung zur "Technischen-Produkt-Spezifikation" vorbereitet. Dabei wurden insbesondere Überschneidungen, z.B. bei der Darstellung von Toleranzen, identifiziert und Lösungsvorschläge erarbeitet, die nun in Normen überführt werden können.

1. WER SCHREIBT EIGENTLICH DIE NORMEN?

Die Normungsarbeit ist eine Gemeinschaftsaufgabe, die von den interessierten Kreisen, deren Experten und den Mitarbeitern des DIN erfüllt wird. Ausgangspunkt ist immer ein Bedarf aus den Reihen der interessierten Kreise z. B. der Wirtschaft, der öffentlichen Hand, der Verbraucher oder der Wissenschaft.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

Die Erstellung oder Überarbeitung einer Norm oder Spezifikation ist ein Projekt, dessen fachlicher Schwerpunkt durch die Interaktion der Experten herausgearbeitet wird und dessen Prozessablauf durch die Mitarbeiter des DIN geführt wird. So tragen die beteiligten Experten die inhaltliche Verantwortung für die Ergebnisse der Normung und Standardisierung. Die Normen werden also von den Experten in den Arbeitsgremien der Normenausschüsse im DIN geschrieben.

Das DIN mit seinen Dienstleistungen unterstützt und berät die an der Normung Interessierten und bietet eine Plattform, auf der unterschiedliche Normungsinteressen ausgewogen berücksichtigt werden. Die Mitarbeiter des DIN tragen die Verantwortung für einen optimalen Entstehungsprozess und für die richtige Positionierung – national oder übernational – der Norm oder Spezifikation, denn das DIN ist das Tor zur weltweiten Normung. Ziel der Normung im DIN ist es, weltweit einheitliche Normen zu erarbeiten. Das DIN vertritt die nationalen Interessen in Europa und weltweit. Nur durch die Arbeit im DIN bekommen die deutschen Experten Zugang zu Entscheidungsprozessen in den übernationalen Normungsgremien.

2. DIE DEUTSCHE NORMUNGSSTRATEGIE

Im Geleitwort zur Deutschen Normungsstrategie aktuell im Jahr 2009 erklärte der damalige Bundesminister für Wirtschaft und Technologie Rainer Brüderle, dass gerade in wirtschaftlich turbulenten Zeiten Deutschland auf verlässliche und wettbewerbsorientierte Rahmenbedingungen angewiesen sei. Normung und das DIN, als die nationale Normungsorganisation, leisteten wichtige Beiträge zur Gestaltung dieser Rahmenbedingungen. Denn sie stärken die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und unterstützen deren Innovationskraft. Gerade für die exportorientierte deutsche Wirtschaft sind Instrumente zum Abbau von Handelshemmnissen und zur Schaffung globaler Märkte unverzichtbar. Normung und Standardisierung sichern so Deutschlands Stellung als eine der führenden Wirtschaftsnationen und unterstützen als strategisches Instrument den Erfolg von Wirtschaft und Gesellschaft. Sie entlasten die staatliche Regelsetzung und fördern die Technikkonvergenz. Dafür bieten die Normungsorganisationen effiziente Prozesse und Instrumente an [DNS aktuell 2009].

3. FÖRDERMÖGLICHKEITEN FÜR FORSCHUNG UND INNOVATIONEN

Die Hightech-Strategie der Bundesregierung ist darauf ausgerichtet, dass eine frühzeitige Berücksichtigung von Normungsaspekten im Forschungsprozess und bei der Umsetzung von Forschungsergebnissen im Hochtechnologiebereich Wettbewerbsvorteile für Deutschland schafft.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

3.1 TNS

Die Bundesregierung investiert beträchtliche Ressourcen in die staatliche Forschungsförderung. Während Deutschland dadurch in vielen Forschungsgebieten bereits eine Spitzenstellung einnimmt, muss die Überführung dieser Forschungsergebnisse in marktfähige Produkte kontinuierlich verbessert werden. Mit dem Ziel, eine frühzeitige Berücksichtigung von Normungsaspekten im Forschungsprozess zu verstärken, fördert das BMWi das Vorhaben zum "Transfer von Forschungsergebnissen durch Normung und Standardisierung" (TNS unter www.ebn.din.de).

3.2 INS

Das ebenfalls langfristig angelegte Vorhaben "Innovation mit Normen und Standards" (INS) wird gefördert vom BMWi aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Ziel ist es, Innovationen der Zukunft optimale Rahmenbedingungen zu bieten und ihre Marktfähigkeit durch rechtzeitige Normung und Standardisierung zu fördern. Das Vorhaben INS wird durch das DIN koordiniert und bearbeitet (www.ins.din.de).

3.3 Weitere Fördermöglichkeiten und Preise

Die Ausfüllung Europäischer Richtlinien nach der Neuen Konzeption ist heute Bestandteil des neuen gemeinsamen Rechtsrahmens. Neben der Ausfüllung von Europäischen Richtlinien wird auch die praktische Nutzbarmachung der Ergebnisse von anderen Programmen wie z. B. dem Forschungsrahmenprogramm FP7, der Lead Market Initiative, i2010 sowie die Unterstützung der politischen Ziele der Kommission wie Innovation, Umweltschutz und Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie von der Kommission gefördert. Neben der Erarbeitung von Normen und Standards werden daher auch Aktionen, die mit Normungs- und Standardisierungsarbeit zusammenhängen, wie Machbarkeitsstudien, Vergleichsanalysen, die Weiterführung von Forschungsergebnissen, Ringversuche, Validierungsmessungen, Analyse zur Notwendigkeit der Überarbeitung einer EN, Untersuchungen zu Umstellungs- oder Auslegungsproblematiken gefördert. Eine Übersicht zum wichtigsten Instrument auf europäischer Ebene, dem Siebten Rahmenprogramm (RP7/FP7), enthält das Participant Portal des Bereiches Research & Innovation der Kommission, wo alle FP7-calls gelistet sind (http://ec.europa.eu/research/participants/portal/page/fp7_calls). Weitere Programme der EU sind z.B. Intelligent Energy Europe, Eco-Innovation und European Cooperation in Science and Technology (COST).

Nationale Forschungs- und Förderprogramme, Programme, Initiativen und Bekanntmachungen des Bundes über die Ministerien BMBF, BMWi, BMU, BMELV, Fördermaßnahmen der Länder, von Stiftungen und anderen Forschungsförderern findet man in der Förderdatenbank des BMWi (www.foerderdatenbank.de) oder auf den Seiten des BMBF.

Der DIN-Preis "Nutzen der Normung" prämiiert Beiträge, die Anhand eines überzeugenden Beispiels den Nachweis eines signifikanten, konkreten Nutzens aufzeigen. Dieser Wettbewerb steht allen interessierten Kreisen offen. Der DIN-

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Preis "Nutzen der Normung" ist mit einem Preisgeld ausgestattet. Ziel des Wettbewerbes ist es, der Öffentlichkeit die breite Wirkung der Normung im wirtschaftlichen Kontext mittels konkreter Beispiele aus der Praxis verstärkt ins Bewusstsein zu bringen.

Bei Fragen oder Hinweisen zu den genannten Fördermöglichkeiten oder DIN-Preisen wenden Sie sich bitte an Ihren Projektmanager oder Geschäftsführer im DIN.

4. KOHÄRENZ DES NORMENWERKS SICHERN

Normung sorgt für Qualitätssicherung, Austauschbarkeit und Kompatibilität von Produkten, Informationen und Dienstleistungen. Es ist sicherzustellen, dass das Normenwerk eindeutig, widerspruchsfrei und in sich abgestimmt ist. Mit zunehmender Verflechtung der internationalen, europäischen und nationalen Normung sowie der Einbeziehung der Standardisierung gilt es, weltweit abgestimmte und der Kohärenz des technischen Regelwerks dienende Prozesse und Verfahren anzuwenden. Es gilt, durch optimierte Strukturen sich widersprechende Normen und Standards sowie Mehrfach- und Doppelarbeit über alle Ebenen hinweg zu verhindern sowie eine Abstimmung und Koordinierung zwischen den einzelnen Ebenen und Organisationen zu erreichen. Auf Basis eines effizienten Informations- und Dokumentenmanagements sind Informationsplattformen einzurichten, die Initiativen, Projekte sowie Ergebnisse der Normungs- und Standardisierungsarbeit transparent darstellen und für die Koordinierung der Arbeit und damit zur Entscheidungsfindung genutzt werden können. Die hierzu notwendigen Diskussionen unter den Normungsorganisationen und die Entwicklung zugehöriger Strategien sind aktiv mitzugestalten [DNS aktuell 2009].

4.1 Was bisher geschah

Bisher wurde in technischen Zeichnungen des Maschinenbaus oft unvollständig und missverständlich toleriert. Durch gute Zusammenarbeit der Werkstattkräfte (in Fertigung, Montage und Prüfung) wurde jedoch der Fertigungsprozess optimiert, so dass gut funktionierende Produkte erzeugt wurden.

Die Normung der grundlegenden Produktinformationen "Technische Produkt Dokumentation" (TPD) und "Geometrische Produktspezifikation" (GPS) erfolgte in den letzten Jahrzehnten mehr oder weniger bedarfsgelenkt, d.h. erkannter Normungsbedarf der beteiligten Industrie wurde aufgegriffen und durch einzelne Normungsvorhaben schrittweise gedeckt. Daraus entstand das heutige Normenwerk, das zum Teil überlappend und widersprüchlich ist. Teilweise wurden auch bewusst internationale Normen nicht übernommen, da sie die bestehenden DIN-Normeninhalte nicht vollständig abdeckten. Die bei der Übernahme von ISO-Normen auftretenden Lücken müssen aufgedeckt und durch neue Normenprojekte geschlossen werden.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Die Normen für die TPD werden heute im ISO/TC 10 erarbeitet, wo der Schwerpunkt auf einfacher Zeichnungsdarstellung für einfache Bauteile liegt.

Die Normen der GPS werden im ISO/TC 213 entwickelt. Die GPS-Normen werden mit dem Ziel der Eindeutigkeit der Spezifikation und dem prüftechnischen Nachweis der Konformität der Merkmale mit der Spezifikation erstellt. Die Normung im ISO/TC 213 erfolgt seit Gründung dieses Technischen Komitees nicht mehr situationsbedingt sondern systematisiert und wird durch die Struktur der GPS-Matrix zielorientiert vorangetrieben.

Lücken und Widersprüche wurden international, soweit sie erkannt wurden, systematisch aufgedeckt und beseitigt. Eine gezielte Aufarbeitung der Unterschiede zu den nationalen Normen erfolgte jedoch bisher nicht immer zeitnah. Gleichzeitig gibt es eine Vielzahl von Produktnormen, die auf Grundlagnormen verweisen, ohne den aktuellen Stand dieser Normen zu berücksichtigen.

4.2 Was zur Zeit in Arbeit ist bzw. noch zu tun bleibt

Durch Outsourcing und Globalisierung muss heute weltweit gefertigt werden können. Den neuen Fertigern fehlt oft das in der Zeichnung nicht dokumentierte Wissen zur Fertigung gut funktionierender Erzeugnisse. Deshalb müssen die Zeichnungen heute vollständig und eindeutig toleriert sein, wie es dem internationalen Stand der Technik entspricht.

Die Notwendigkeit, die beiden Arbeitsgebiete TPD und GPS zu Normen der Technischen-Produkt-Spezifikation (TPS) zusammenzuführen ergibt sich durch die z. T. widersprüchliche Angabe von Toleranzen. Sie wurde durch die Arbeiten am ISO/DTR 23605 bestätigt.

Damit in Deutschland Normen entwickelt werden können, welche die Überschneidungen im nationalen Normenwerk beseitigen, wurde im Rahmen eines INS-Projektes eine Basisuntersuchung durchgeführt, in der die Unterschiede zwischen vorhandenen DIN-Normen und ISO Normen analysiert wurden. Der Abschlussbericht des Projektes wurde im Dezember 2011 vorgelegt und wird in 2012 in den zuständigen Normungsgremien diskutiert. Es ergeben sich daraus viele konkrete Anpassungen in nationalen Normen und Anregungen für die internationale Arbeit [INS-TPS 2011].

5. INTERNATIONALE AUSRICHTUNG PRIORISIEREN

Internationale Normen sind für den globalen Markt ein Bezugsrahmen und eine gemeinsame technische Sprache zwischen Handelspartnern. Internationale Handelsabkommen können mit Hilfe von eindeutigen Normen erfolgreich umgesetzt werden. Die Normungspolitik in Deutschland folgt daher dem internationalen Grundsatz: "Eine Norm, eine Prüfung, überall anerkannt." Das DIN fördert damit die Exportfähigkeit der deutschen Wirtschaft und sichert auf diese Weise Arbeitsplätze in der Export- und Zulieferindustrie.

Das DIN konzentriert seine Arbeit auf die europäischen und internationalen Normungsgremien. Mehr als 85 Prozent der Aktivitäten des DIN werden heute

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

europäisch oder weltweit abgewickelt. Die verbleibenden nationalen DIN-Normen werden häufig als Vorlagen für die internationale Normung erarbeitet.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der weiteren Arbeit wird daher in der internationalen Zusammenarbeit zwischen ISO/TC 213 und ISO/TC 10 bestehen. Als Folge der Resolution des ISO/TC 213 Nr. 1078 (Beijing 9/2011) und einer entsprechenden Resolution des ISO/TC 10 Nr. 586 (Berlin 29/2011) haben die Chairmen beider ISO/TC's zugestimmt, eine gemeinsame Arbeitsgruppe zur Harmonisierung einzusetzen in der auch deutsche Experten mitarbeiten.

Um die Effizienz der Normung auf internationaler und europäischer Ebene zu erhöhen, wird die Zusammenarbeit zwischen ISO und CEN seit 1991 durch die Wiener Vereinbarung geregelt. Ziel dieser Vereinbarung ist es, die Facharbeit möglichst auf einer Normungsebene durchzuführen und durch parallele Abstimmungsverfahren die gleichzeitige Anerkennung als ISO- und EN-Norm herbeizuführen. Bei CEN ist etwa ein Drittel des CEN-Normenbestandes identisch mit den ISO-Normen. Auf diesem Wege können die Ergebnisse der internationalen Arbeit zeitnah bzw. zeitgleich die europäische Ebene erreichen.

6. QUELLEN

[DNS aktuell 2009] Redaktionskomitee DIN/DKE: "Die Deutsche Normungsstrategie aktuell"; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 93894/2010-03

[INS-TPS 2011] Henzold, Georg; Redaktionskomitee NATG: "Abschlussbericht zum INS-Projekt Zusammenführung der Normen zur Technischen Produktdokumentation (TPD) mit den Normen der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) zur Technischen Produktspezifikation (TPS)"; DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

XIII. Internationales Oberflächenkolloquium

1. Treffen „Industry meets standardization and science“

IMSAS

Stand der Normung zu Kanten und Radien

12.-14. März 2012

Prof. Dr.-Ing. Michael Dietzsch
Technische Universität Chemnitz



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Institut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung



IFMQ

1

Gliederung

- Einleitung
- Definition von Kantenzuständen und Kanten
- Radien, Zentrierbohrungen
- Freistiche – Formen, Maße
- Schneidwerkzeuge
- Allgemeintoleranzen für Stanzteile aus Stahl, Thermisches Schneiden
- Zusammenfassung



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Institut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung



IFMQ

2

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Definitionen aus DIN ISO 13715:2000**Teil 1 von 2**

- 3.2 Werkstückkante:
Schnitt von zwei Oberflächen
- 3.2 Kantenzustand:
geometrische Form- und Größe einer Werkstückkante
- 3.3 Werkstückkante mit unbestimmter Form:
Werkstückkante mit einer nicht genau festgelegter Form
- 3.4 Scharfkantig:
Werkstück-Außen- oder Innenkante, deren Abweichung von der ideal geometrischen Form annähernd Null ist.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

3

Definitionen aus DIN ISO 13715:2000**Teil 2 von 2**

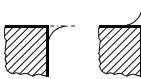
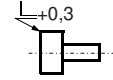
- 3.5 Grat :
Materialüberhang außerhalb der ideal-geometrischen Form einer Außenkante, die nach der mechanischen Bearbeitung oder einem Formgebungsprozess zurückbleibt
- 3.6 Abtragung:
Innerhalb der ideal-geometrischen Form eines Werkstück-Außen- oder Innenkante liegende Abweichung
- 3.7 Übergang:
Außerhalb der ideal-geometrischen Form eines Werkstück-Außen- oder Innenkante liegende Abweichung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

4

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

DIN ISO 13715: 2000 Beispiele für Kantenangaben Teil 1 von 6

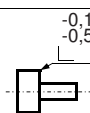
Nr.	Angabe	Bedeutung	Erklärung
5.1			Außenkante mit zugelassenem Grat von 0 mm bis 0,3 mm; Gratrichtung unbestimmt
5.2			Außenkante mit zugelassenem Grat; Grathöhe und Gratrichtung unbestimmt
5.3			Außenkante mit zugelassenem Grat von 0 mm bis 0,3 mm; Gratrichtung bestimmt
5.4			

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

5

© Die Kanten- und Radienangaben sind in der Regel in der Zeichnung anzugeben. Die Kanten- und Radienangaben sind in der Regel in der Zeichnung anzugeben.

DIN ISO 13715: 2000 Beispiele für Kantenangaben Teil 2 von 6

Nr.	Angabe	Bedeutung	Erklärung
5.5			Außenkante ohne Grat; Abtragung von 0 mm bis 0,3 mm
5.6			Außenkante ohne Grat; Abtragung im Bereich von 0,1 mm bis 0,5 mm
5.7			Außenkante ohne Grat; Größe der Abtragung unbestimmt

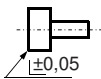
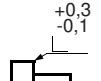
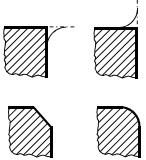
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

6

© Die Kanten- und Radienangaben sind in der Regel in der Zeichnung anzugeben. Die Kanten- und Radienangaben sind in der Regel in der Zeichnung anzugeben.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

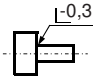
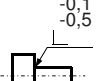
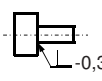
DIN ISO 13715: 2000 Beispiele für Kantenangaben**Teil 3 von 6**

Nr.	Angabe	Bedeutung	Erklärung
5.8			Außenkante mit zugelassenem Grat von 0 mm bis 0,05 mm oder zugelassener Abtragung von 0 mm bis 0,05 mm (scharfkantig); Gratrichtung unbestimmt
5.9			Außenkante mit zugelassenem Grat von 0 mm bis 0,3 mm oder zugelassener Abtragung von 0 mm bis 0,1 mm; Gratrichtung unbestimmt

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

7

DIN ISO 13715: 2000 Beispiele für Kantenangaben**Teil 4 von 6**

Nr.	Angabe	Bedeutung	Erklärung
5.10			Innenkante mit zugelassener Abtragung von 0 mm bis 0,3 mm; Abtragsrichtung unbestimmt
5.11			Innenkante mit zugelassener Abtragung im Bereich 0,1 mm bis 0,5 mm; Abtragsrichtung unbestimmt
5.12			Innenkante mit zugelassener Abtragung von 0 mm bis 0,3 mm; Abtragsrichtung bestimmt

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

8

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

DIN ISO 13715: 2000 Beispiele für Kantenangaben Teil 5 von 6

Nr.	Angabe	Bedeutung	Erklärung
5.13			Innenkante mit zugelassemem Übergang bis 0,3 mm
5.14			Innenkante mit zugelassemem Übergang im Bereich von 0,3 mm bis 1 mm

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

9

DIN ISO 13715: 2000 Beispiele für Kantenangaben Teil 6 von 6

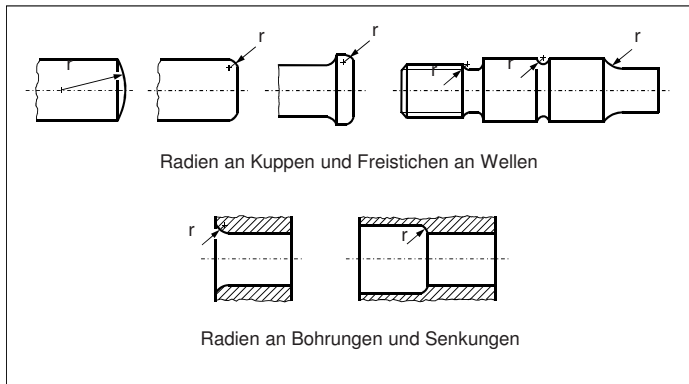
Nr.	Angabe	Bedeutung	Erklärung
5.15			Innenkante mit zugelasener Abtragung von 0 mm bis 0,05 mm oder mit zugelassemem Übergang bis 0,05 mm (scharfkantig); Abtragsrichtung unbestimmt
5.16			Innenkante mit zugelassemem Übergang bis 0,1 mm oder mit zugelasener Abtragung von 0 mm bis 0,3 mm; Abtragsrichtung unbestimmt

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

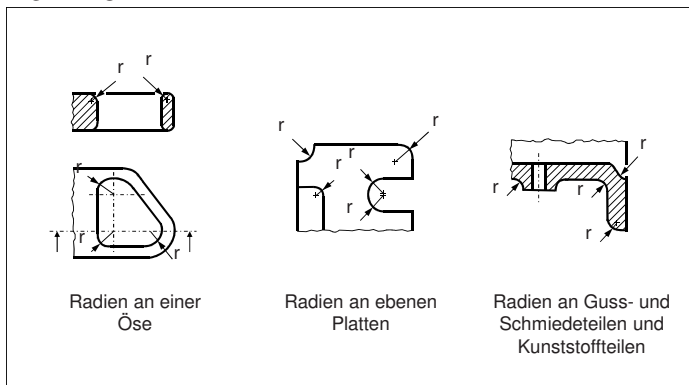
10

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

DIN 250:2002 Anwendungsbeispiele für Radien Teil 1 von 2

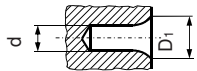
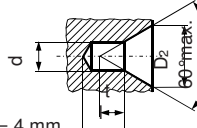


DIN 250:2002 Anwendungsbeispiele für Radien Teil 2 von 2



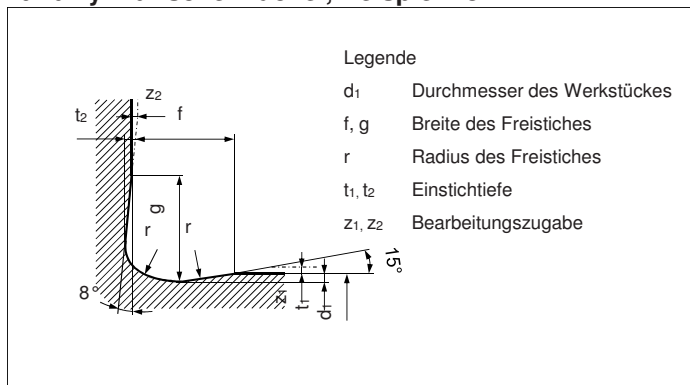
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

DIN ISO 6411:1997 Zentrierbohrungen

Form der Zentrierbohrung	Bezeichnung (Beispiele)	Erklärung der Angabe
R mit Radiusform (Zentrierbohrer nach ISO 2541)	 ISO 6411-R 3,15/6,7	 $d = 3,15 \text{ mm}$ $D_1 = 6,7 \text{ mm}$
A ohne Schutzsenkung (Zentrierbohrer nach ISO 866)	 ISO 6411-A4/8,5	 $d = 4 \text{ mm}$ $D_2 = 8,5 \text{ mm}$

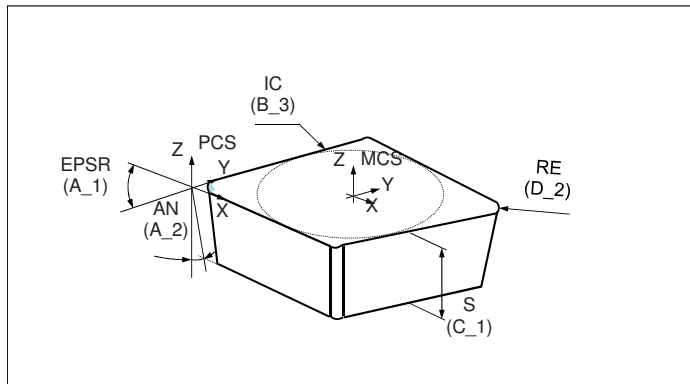
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

13

DIN 509:2006 Freistich für weiter zu bearbeitende Plan- und zylindrische Fläche, Beispiel Form FTECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZInstitut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung

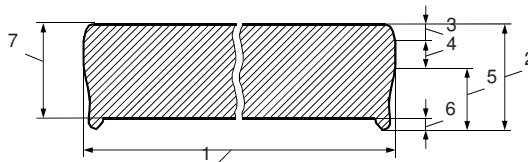
14

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

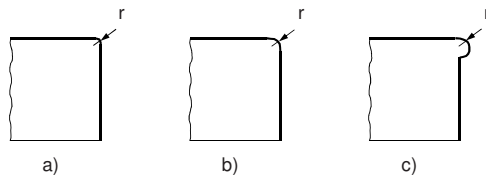
DIN 4003-76: 2011 Quadratische Schneidplatte, Eckenradius**DIN 4000-87:2011 Sachmerkmal – Listen – Teil 87: Fräser mit Schaft für auswechselbare Schneiden**

Merkmalbenennung (Merkmalkennung)	Bild
Radius Formplatte, Pos. A (G14)	Pos. A
Radius Formplatte, Pos. B (G16)	

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

E DIN 6930-2:2010 Stanzteile aus Stahl - Teil 2: Allgemeintoleranzen**Skizze zur Bestimmung des Ist-Maßes****Legende**

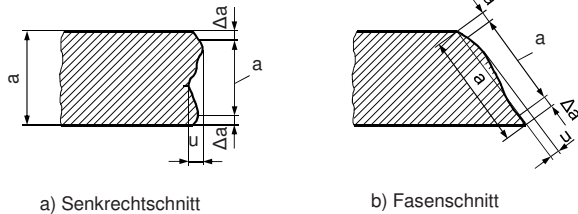
- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| 1 Istmaß: Länge bzw. Durchmesser | 4 Glattschnittbereich |
| 2 Höhe der Schnittfläche | 5 Ausbruchbereich |
| 3 Einzugsbereich | 6 Schnittgrathöhe |
| | 7 Flachzeugdicke s |

DIN EN ISO 9013:2002 Thermisches Schneiden – Einteilung thermischer Schnitte, Anschmelzung**Legende**

- a) Scharfe Kante
- b) Schmelzkante
- c) Schmelzkante mit Überhang

DIN EN ISO 9013:2002 (D)

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

DIN EN ISO 9013: 2002 Definition des Messbereiches für die Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz

Legende

a Bereich zur Bestimmung der Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz

Zusammenfassung

Alle zitierte Normen beziehen sich auf die geometrischen Nenneigenschaften.

Falls Toleranzen benannt werden, sind diese mehrdeutig.

Die Beschreibung der Werkzeuggeometrie beschränkt sich auf die Nenngeometrie und ist mehrdeutig.

Bei allen betrachteten Normen fehlen Hinweise zur Extraktion, Filterung und Assoziation der geometrischen Eigenschaften zum vollständigen Beschreiben der Nenngeometrie und damit auch Grenzen für den Konformitätsnachweis.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Auswahl von Normen zu Kanten und Radien

Teil 1 von 2

Norm	Titel
DIN 250: 2002	Technische Zeichnungen - Radien
DIN 509: 2006	Technische Zeichnungen - Freistiche – Formen, Maße
DIN ISO: 13715: 2000	Technische Zeichnungen - Werkstückkanten mit unbestimmter Form- Begriffe und Zeichnungsangaben
DIN 4000-77:2011	Sachmerkmal-Listen – Teil 77: Schneidkörper, geklemmt, zur Stech- und Gewindebearbeitung
DIN 4000-87:2011	Sachmerkmal-Listen – Teil 87: Fräser mit Schaft für austauschbare Schneiden
DIN 4003-76:2011	Konzept für den Aufbau von 3D-Modellen auf Grundlage von Merkmalen nach DIN 4000 - Teil 76: Schneidplatten, geklemmt



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Institut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung



© Die hierin enthaltenen Informationen sind Eigentum der IFMQ und dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung der IFMQ weitergegeben werden.

Auswahl von Normen zu Kanten und Radien

Teil 1 von 2

Norm	Titel
DIN 6930-2: 2010	Stanzteile aus Stahl - Teil 2: Allgemeintoleranzen
DIN ISO 6411:1997	Technische Zeichnungen - Vereinfachte Darstellung von Zentrierbohrungen
DIN EN ISO 9013:2003	Thermisches Schneiden – Einteilung thermischer Schnitte



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Institut für Fertigungsmesstechnik
und Qualitätssicherung



© Die hierin enthaltenen Informationen sind Eigentum der IFMQ und dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung der IFMQ weitergegeben werden.

Einfluss von Radien und Fasen auf die Festigkeitsberechnung

Erhard Leidich*, Bohumil Brůžek

TU Chemnitz

Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik

Professur Konstruktionslehre

09107 Chemnitz

e.leidich@mb.tu-chemnitz.de

Abstrakt: Schäden in Form von Rissen oder Brüchen treten meist an Stellen hoher Spannungskonzentration auf. Markante Merkmale dafür sind Querschnittsübergänge, die i.d.R. durch Radien, funktionsbedingt gelegentlich auch durch Freistiche abgemildert werden. Während beispielsweise die Wellenoberflächen zwecks Einhaltung der Toleranzen oft geschliffen werden, resultieren die Radienübergänge meist aus einem Drehprozess. Die Rauigkeit der Radien-Oberflächen ist zwar in den Zeichnungen meist bemaßt. Nicht zuletzt aus Aufwandsgründen wird aber diese wie auch der exakte Radius selten kontrolliert. Es verwundert daher nicht, dass die Ursache zahlreicher Schäden gerade diesen Parametern zuzuordnen ist.

Fasen stehen weniger im Fokus der Festigkeitsberechnung, da sie meist zur Erleichterung der Montage dienen. Dennoch können gerade beim Einpressen von Bauteilen vorhandene Grate Fressspuren erzeugen, die wiederum festigkeitsmindernd wirken können. Insofern sind auch Fasen eindeutig zu bemaßen und letztlich inklusive Kantenbruch zu tolerieren.

Der Beitrag zeigt einige ausgewählte Kerbformen und deren Auswirkungen auf die Festigkeit.

1. EINLEITUNG, PROBLEMSTELLUNG

Die wettbewerbsbedingt hohen Qualitätsanforderungen an die Produkte und die juristisch durchsetzbaren Gewährleistungsansprüche bei auftretenden Mängeln stellen hohe Ansprüche an alle am Produktentstehungsprozess beteiligten Akteure. Obwohl die mechanisch bedingten Ausfälle vielfältig sein können, stellt doch der Bruch (gelegentlich auch Anriss) ein unter allen Umständen zu vermeidendes Schadensereignis dar. Um dies zu gewährleisten sind neben den richtigen Lastannahmen geeignete Berechnungswerkzeuge und gesicherte Auslegungsrichtlinien erforderlich. Besonders in den Bereichen, wo Menschen gefährdet sind (z. B. Flugzeugbau, Atomkraftwerke, Fahrzeugbau) existieren strenge und spezielle Sicherheitsvorschriften, z.T. auch produktspezifische Standards.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Am Beispiel einer sehr weit verbreiteten und speziell in der stationären Antriebstechnik bewährten Norm, der DIN 743 [N1], soll o.g. Themenstellung diskutiert und maßgebende Einflussgrößen aufgezeigt werden. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die DIN 743 einen Auszug aus der umfassenderen FKM-Richtlinie [N2] darstellt und speziell für runde Teile (Achsen und Wellen) gilt.

2. EINFLUSS DER KREISKERBE AUF DIE FESTIGKEIT

Aus spannungsmechanischer Sicht geht einem Bruch stets eine örtliche Überbeanspruchung voraus. Hohe Beanspruchungen entstehen beispielsweise an Querschnittseingengungen bzw. (schraffen) Kraftflussumlenkungen. Abbildung 1 zeigt einige diesbezügliche Beispiele für Wellen sowie für Welle-Nabe-Verbindungen, die hinsichtlich der Dimensionierung einer besonderen Aufmerksamkeit bedürfen. Ergänzend dazu sind in Abbildung 2 Brüche dargestellt, die im Versuch erzeugt wurden.

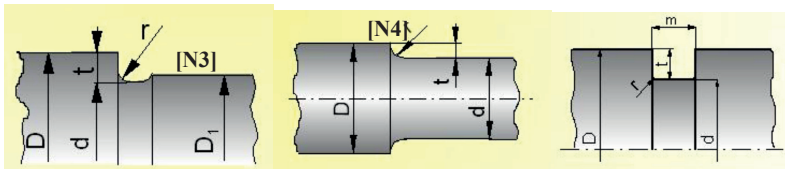


Abbildung 1: Beispiele für Wellenkerben

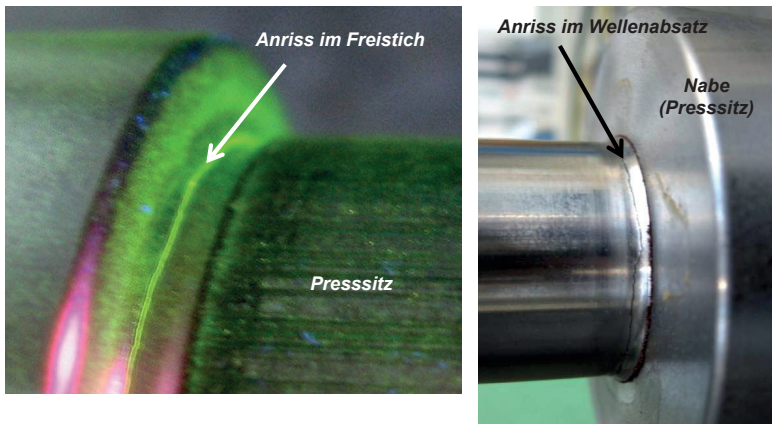


Abbildung 2: Bruchbild einer Welle mit Freistich (links) und einer Welle mit Radius im Absatz (rechts) [Leidich 1]

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

An Querschnittsübergängen werden meist Radien, seltener Fasen (s. hierzu Kap. 3), angeordnet, weil diese relativ einfach herstellbar und messbar sind. Im Folgenden werden die Auslegungsalgorithmen und die die Radien betreffenden festigkeitsrelevanten Einflussparameter vorgestellt.

Der DIN 743 liegt das Nennspannungskonzept zugrunde, d.h. alle Spannungen werden bezogen auf den jeweiligen Nennquerschnitt berechnet. Die jeweilige Kerbform wird über die so genannte Formzahl α berücksichtigt, die meist in Form von Tabellen zur Verfügung steht (Abbildung 3). In Einzelfällen könnte diese auch mit Hilfe der FE-Methode berechnet werden. Grundsätzlich wird ein fehlerfreier Radienübergang vorausgesetzt.

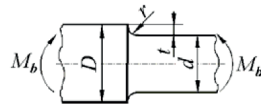
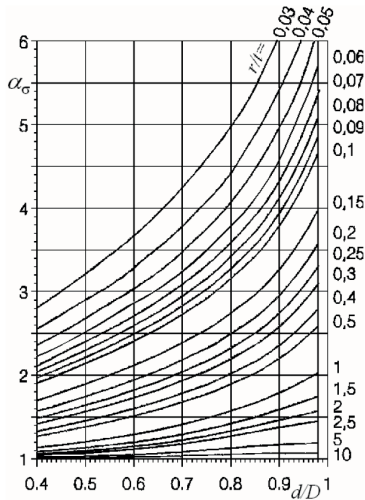


Abbildung 3: Formzahlen für gekerbte Rundstäbe bei Biegung

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,62 \cdot \frac{r}{t} + 11,6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \frac{r}{d}\right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{r}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}} \quad (1)$$

Aus der Formzahl α folgt unter Einbeziehung des Spannungsgefälles (Abbildung 4) bzw. der daraus resultierenden Stützziffer n die Kerbwirkungszahl β gemäß

$$\beta = \frac{\alpha}{n} \quad (2)$$

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Die Kerbwirkungszahl ist der maßgebende Einflussfaktor für die Dauerfestigkeit und damit auch α und das Spannungsgefälle, das der Stützziffer zugrunde liegt. Abbildung 4 verdeutlicht die Definition des Spannungsgefälles. Die Festigkeit der Kerbstele ist umso größer, je größer der Spannungsabfall in Abhängigkeit von x ist.

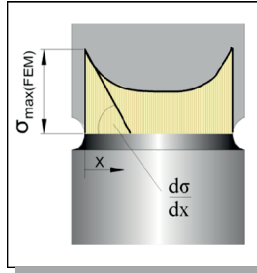


Abbildung 4: Definition des bezogenen Spannungsgefälles

Das bezogene Spannungsgefälle wird wie folgt definiert

$$\bar{G} = \frac{1}{\sigma_{\max}} \cdot \left(\frac{d\sigma}{dx} \right)_{\max} \quad (3)$$

Die für das gekerbte Bauteil zulässige Wechselfestigkeit (hier repräsentiert durch die i.A. dominierende Biegung) berechnet sich wie folgt

$$\sigma_{bWk} = \frac{\sigma_{bW} \left(\frac{d}{d_{\text{eff}}} \right)}{K_{\sigma}} \quad (4)$$

mit dem Gesamteinflussfaktor

$$K_{\sigma} = \left(\frac{\beta_{\sigma}}{K_2(d)} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V} \quad (5)$$

Der Größeneinflussfaktor $K_2(d)$ und der Verfestigungsfaktor K_V sind für die in Rede stehende Thematik nicht von Interesse, wohl aber der Oberflächeneinflussfaktor K_F . Dieser berücksichtigt den Einfluss der Mikrogeometrie (Rauigkeit) auf die Dauerfestigkeit und kann in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit aus Abbildung 5 abgelesen werden.

Die Einhaltung der geforderten Rauigkeit stellt an Wellenoberflächen i. A. kein Problem dar. Im Gegensatz zur Reibung kann bei alleiniger Betrachtung der Festigkeit die Zeichnungsangabe durchaus unterschritten werden. Im Übergangsradius ist aber die Einhaltung der Oberflächengüte wegen der üblichen Fertigungstechnologie Drehen ungleich schwieriger. Erschwerend

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

kommt hinzu, dass eine Rauigkeitsprüfung selten vorgenommen wird, bei sehr kleinen Radien oftmals auch gar nicht möglich ist. Ein Blick in Abbildung 5 verdeutlicht, dass bei einem hochfesten Stahl mit $R_m = 1000 \text{ MPa}$ die Vergrößerung der Rauigkeit von $R_z = 6,3 \text{ }\mu\text{m}$ auf $R_z = 25 \text{ }\mu\text{m}$ zu einem Festigkeitsabfall von ca. 15 % führt. Unstetigkeiten im Radius wirken sich noch gravierender aus.

Demnach sind eindeutige Prüfvorschriften und Toleranzangaben zwingend erforderlich.

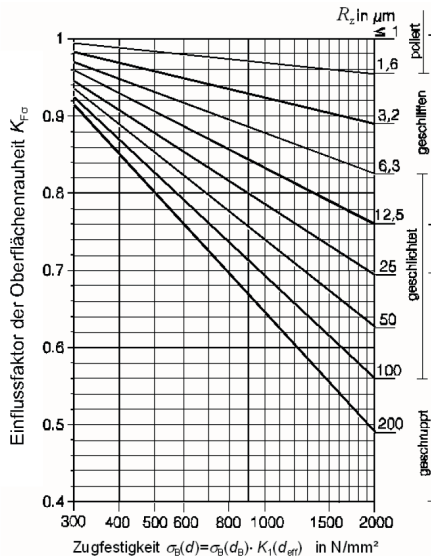


Abbildung 5: Einfluss der Oberflächenrauheit gemäß DIN 743

Stirnradverzahnung

Zahnräder bzw. mechanische Getriebe dominieren trotz der aufstrebenden elektrischen Antriebe nach wie vor in der Antriebstechnik. Sie stellen auch ein beträchtliches Umsatzvolumen für die deutsche Industrie dar. Verständlicherweise sind die Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet immens, was auch zur Erhaltung des Wettbewerbsvorsprungs (besonders bei Großgetrieben) beiträgt. Bezogen auf die Themenstellung sind die Fußausrundungsradien von Interesse, die i.d.R. vom Fräswerkzeug vorgegeben und zudem auch genormt sind. Aufgrund des nahezu immer notwendigen finalen Arbeitsganges Schleifen können die kreisförmigen Radien auch Ecken (Schleifabsatz) beinhalten. Abbildung 6 zeigt dazu oben einen Zahn mit

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Schleifabsatz und unten beispielhaft den Einfluss des Schleifaufmaßes t_0 auf die Spannkonzentration. Obwohl diese scharfe Kerbe durch eine Protuberanz vermieden werden kann, findet man in der Praxis dennoch derartige Zahnfußformen vor. In den einschlägigen Lehrbüchern und in den Auslegungsnormen werden speziell dafür geltende Spannungsfaktoren angegeben. Trotz der augenscheinlich scharfen Kerbe besteht also hier kein Handlungsbedarf.

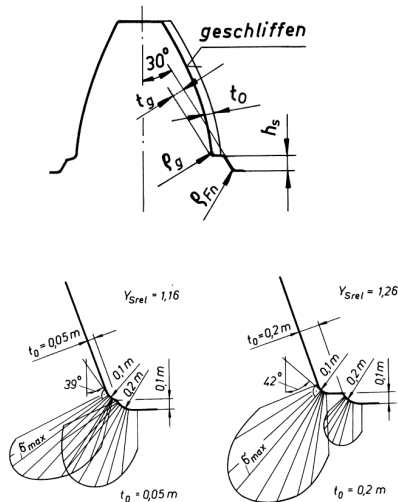


Abbildung 6: Spannkonzentration bei Doppelkerben (Zahn mit Schleifabsatz) [Linke 2]

3. RÄNDELN – EINFLUSS DER FASE AUF DIE FESTIGKEIT

Die derzeit gültige Norm sowie den Stand der Technik für zylindrische Pressverbände stellt die DIN 7190 [N6] dar. In dieser Norm sind neben Berechnungsgrundlagen auch Gestaltungsregeln für zylindrische Pressverbände angegeben. Für Wellen eines Längspressverbandes wird eine Fase mit einem Fasenwinkel $\varphi \leq 5^\circ$ empfohlen.

Analog zum zylindrischen Pressverband ist auch bei einem Rändelpressverband (RPV) eine Fase am Anfang der Welle erforderlich. Bei einem RPV hat die Fase einen Einfluss auf den Fügevorgang sowie auf die relative Festigkeit. Die numerischen Fugesimulationen von Awiszus/Kleditzsch [Awiszus 3] zeigen, dass der Fasenwinkel φ neben dem bezogenen Übermaß einen entscheidenden Einfluss auf den formenden und schneidenden

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Fügevorgang hat. Das heißt, dass der Fasenwinkel und die damit verbundene Fasenlänge l_e den Fügevorgang hinsichtlich der Spanbildung sowie der Festigkeitssteigerung infolge (kalt) Umformung maßgeblich beeinflussen. In Abbildung 7 ist stellvertretend eine gerändelte Welle eines RPV mit den maßgebenden Bezeichnungen dargestellt.

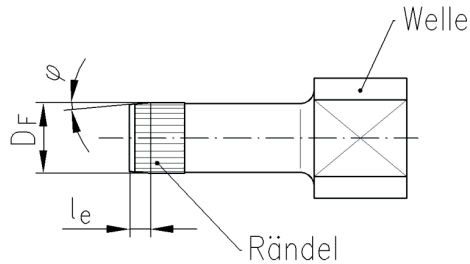


Abbildung 7: Gerändelte Welle eines RPV

Die numerischen Simulationen sowie die bisher durchgeführten experimentellen Untersuchungen belegen die Festigkeitssteigerung infolge Umformung im Außenteil. Die geringste Spanbildung, das heißt ein umformender Fügevorgang sowie die beste relative Festigkeit wurden mit einem Fasenwinkel $\phi=5^\circ$ erreicht. Beim axialen Fügen kam es bei Wellen mit Fasenwinkel $\phi=15^\circ$ und hohen Übermaßen zu einer Spanbildung. Abbildung 8 zeigt ein Simulationsmodell eines RPV mit Fasenwinkel $\phi=5^\circ$.

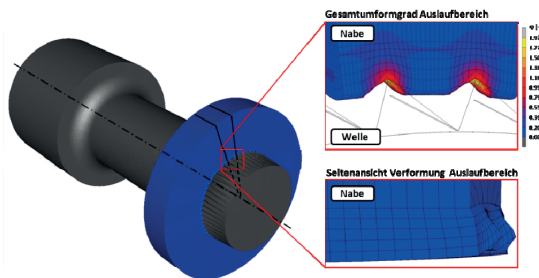


Abbildung 8: Simulation des RPV [Awiszus 3]

Die Darstellung zeigt, dass die Fase zwar einerseits die Übertragungsfähigkeit beeinflusst, dass aber andererseits die mögliche Toleranzweite eher groß ist. Folglich sollten hier Allgometoleranzen völlig ausreichend sein.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorstehenden Ausführungen verdeutlichen, dass besonders in der Antriebstechnik die (Übergangs-)Radien Leistungs- bzw. Momentbegrenzend sind. Umso erstaunlicher ist der Sachverhalt, dass zwar die Makrogeometrie (Radiengröße) Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben ist, nicht aber die Mikrogeometrie und auch nicht die Toleranzen.

Genaue Radienmessungen sind meist die Folge vorausgegangener Schadensfälle. Proaktive Maßnahmen trifft man in der Industrie eher selten an. Dies zeigen auch aktuelle Nachfragen, die oft mit einem Kopfschütteln beantwortet wurden. Gelegentlich findet man Werksnormen vor, die Außenstehenden nicht zugänglich sind und wohl meist auf Erfahrungswerten beruhen.

Die Autoren haben sich zum Ziel gesetzt die heute möglichen Toleranzgrenzen der bisher am Institut untersuchten Proben zu bestimmen und die daraus resultierenden Festigkeitsunterschiede aufzuzeigen. Aus wirtschaftlichen Gründen sind strengere Toleranzvorgaben nur durchsetzbar, wenn diese eine erkennbar kleinere Schwankungsbreite der zulässigen Festigkeit bewirken.

5. LITERATURQUELLEN

- [Leidich 1] Leidich, E.; Brůžek, B.: Untersuchungen zur Gestaltfestigkeit von Pressverbindungen. Konstruktion, Ausgabe 10/2010, S. 51-58
- [Linke 2] Linke, H.: Stirnradverzahnung; Berechnung – Werkstoffe – Fertigung. Carl Hanser Verlag München Wien, 2010
- [Awiszus 3] Awiszus, B.; Kleditzsch, S.: Untersuchung des Fügevorgangs von Rändelpressverbänden (RPV) unter Nutzung der Finite-Elemente-Methode, UTFscience IV/2011, www.utfscience.de
- [N1] DIN 743 Teil 1...3, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen. Oktober 2000
- [N2] FKM-Richtlinie, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM). VDMA-Verlag Frankfurt/Main 2002
- [N3] DIN 509, Freistiche – Formen, Maße. Beuth Verlag Berlin, Juni 1998
- [N4] DIN 250, Radien. Beuth Verlag Berlin, April 2002
- [N5] DIN ISO 13715, Werkstückkanten mit unbestimmter Form. Beuth Verlag Berlin, Dezember 2000
- [N6] DIN 7190: Pressverbände - Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln. Beuth Verlag Berlin, 2001

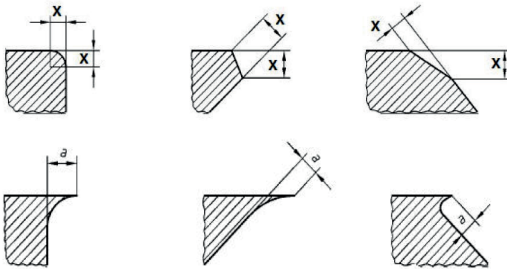
Vorgehen bei der Bewertung von Kantenbrüchen und Radien

Dipl.-Ing. Martin Zimmer

Zentrale Koordination Messtechnik FeP/QMM1
Robert Bosch GmbH, Wernerstraße 51, 70469 Stuttgart

Abstrakt: Bosch ist unter anderem Hersteller von Diesel-Einspritzkomponenten. Für die einwandfreie Funktion dieser Erzeugnisse ist die Qualität der Kanten besonders wichtig. Die weltweit einheitliche Beurteilung von Kanten hat darum eine herausragende Bedeutung. Da es dazu bisher keine hinreichenden normativen Festlegungen gibt, hat Bosch in seiner Werknorm in den Blättern N42AP620 für den „Kantenbruch“ und N42AP621 für Radien ein solches Vorgehen beschrieben. Das Vorgehen wurde mit verschiedenen führenden Herstellern von Tastschnittgeräten abgestimmt und steht bei einigen Geräten als Feature zur Verfügung. Diese Art der Auswertung ist Gegenstand des Vortrages.

1. KANTEN UNBESTIMMTER FORM



Für die Beurteilung von Oberflächenrauheit gibt es umfangreiche normative Festlegungen, wie die in der Zeichnung eingetragenen Merkmale messtechnisch zu überprüfen sind. Für die Beurteilung von Werkstückkanten bezüglich der Kantenradien oder gemäß nebenstehender

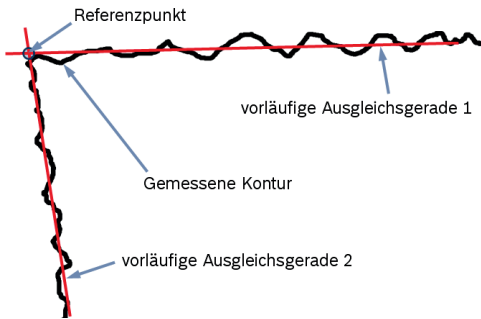
Beispiele gibt es solche Festlegungen in öffentlichen Normen bisher nicht. Darum wurden Verfahren erarbeitet, die wiederholbare Auswertungen von Linienschnitten ermöglichen. Die Verfahren wurden in die Bosch-Norm aufgenommen.

2. PRINZIPIELLES VORGEHEN BEI DER KANTEN-AUSWERTUNG

Basis für die Auswertung ist das Linienschnittprofil einer quer zum Kantenverlauf durchgeführten Messung.

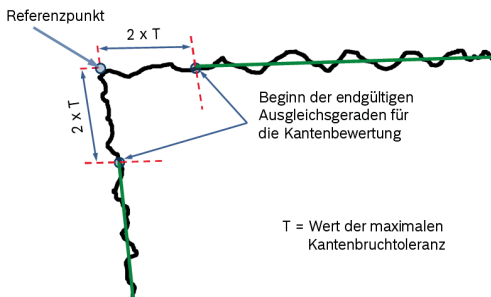
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

2.1 Bestimmung des Referenzpunktes



In diesem Profil werden für die beiden Bereiche rechts und links der Kante die (vorläufigen) Ausgleichsgeraden bestimmt. Diese beiden Ausgleichsgeraden schneiden sich im Referenzpunkt. der Referenzpunkt ist ein virtueller Punkt.

2.2 Ausgleichsgeraden für die Kantenbewertung

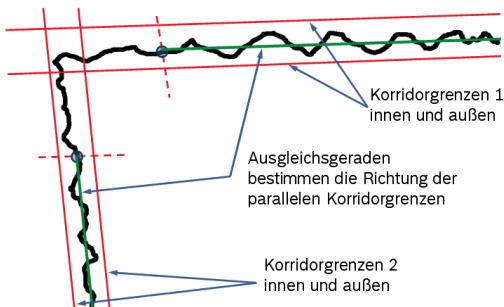


Dieser Referenzpunkt ist der Ausgangspunkt für die weitere Auswertung.

Von diesem Referenzpunkt aus wird eine definierte Strecke z.B. der doppelte Wert der Toleranz nach innen abgetragen.

Daraus ergeben sich die Bereiche hinter der Kante, über die die endgültigen Ausgleichsgeraden für die Kantenbewertung gebildet werden.

2.3 Festlegung von Korridorgrenzen



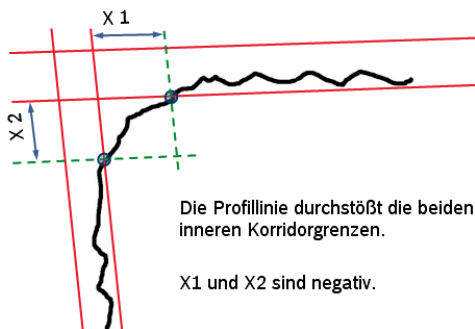
Parallel zu diesen Ausgleichsgeraden werden nun Korridorgrenzen gezogen. Sie richten sich nach der Art des Profils und berücksichtigen in jedem Fall die zulässige (oder tatsächliche) Rauheit oder Welligkeit der Oberfläche. Der Korridor kann auch

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

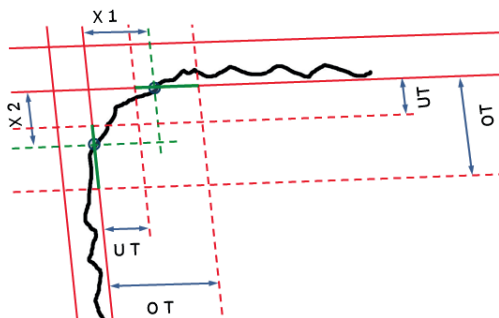
unsymmetrisch zur Ausgleichsgeraden definiert werden. Der Abstand jeder der Korridor Grenzen von der Ausgleichsgeraden muss in der Prüfplanung festgelegt sein. Für Zeichnungseintragungen werden die Abstände der Grenzen durch Messversuche an Serienteilen ermittelt.

2.4 „scharfkantig und gratfrei“

Ein Profil, das den Korridor an keiner Stelle verlässt, erfüllt das in Zeichnungen früher häufig verwendete Kriterium „scharfkantig und gratfrei“.

2.5 „gebrochene Kante“

Ein Profil, das den Korridor an den Innengrenzen verlässt, wird als „gebrochene Kante“ bezeichnet.

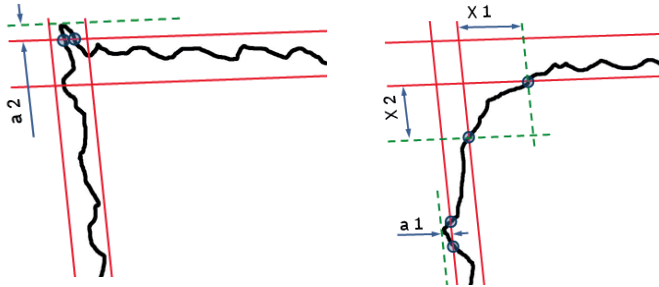
2.6 Soll-Ist-Vergleich gebrochener Kanten

Um eine Konformitätsaussage für eine gebrochene Kante machen zu können, werden an den beiden inneren Korridor-grenzen die Toleranz-grenzen UT und OT eingetragen. Liegen die beiden Durchstoß-punkte in dem Bereich zwischen UT und OT, ist das Merkmal zeichnungskonform.

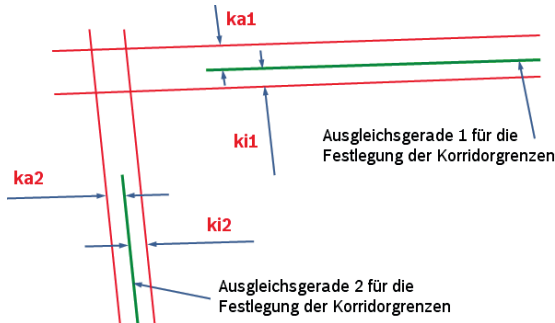
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

2.7 Kante mit einem Grat oder Aufwurf

Ein Profil, das den Korridor an den Außengrenzen verlässt, hat einen Aufwurf oder Grat. Die Parameter a_1 beziehungsweise a_2 sind positiv.

**2.8 Parameter zur Beschreibung von Kantenbrüchen**

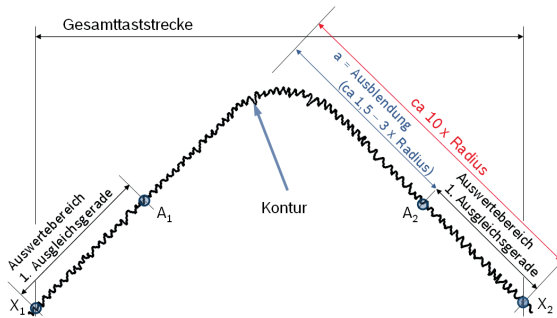
Die Definition der zulässigen Lage der Korridor Grenzen (ka_1 , ka_2 , ki_1 , ki_2) bezogen auf die gemessene Profilinie ist neben der Toleranzangabe die Mindestvoraussetzung für die eindeutige und wiederholbare Bewertung eines Kantenbruchs.

**3. VORGEHEN BEI DER RADIIEN-AUSWERTUNG**

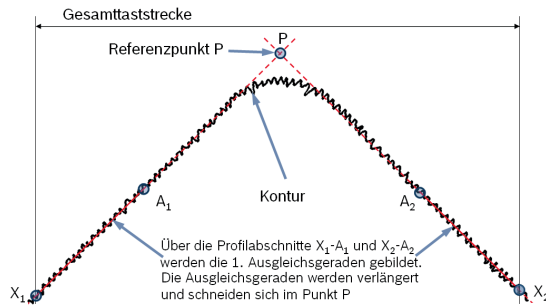
Basis für die Auswertung ist wie bei der Kante mit unbestimmter Form das Linienschnittprofil einer quer zum Kantenverlauf durchgeführten Messung.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

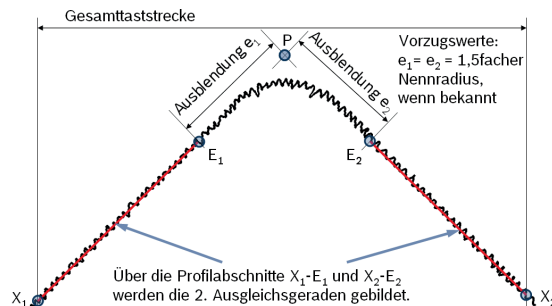
3.1 Bestimmung des Auswertebereichs - Standardverfahren



Auch bei der Auswertung von Radien wird, analog zu dem in Abschnitt 2.1 bis 2.3 über ein mehrstufiges Vorgehen das Profilstück ermittelt, über das der Radius ausgewertet wird.



Auch hier wird zunächst ein Referenzpunkt P ermittelt. Er ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden über die Profilbereiche A-X, also aus einem Profilbereich, der sicher nicht vom Radius beeinflusst ist.

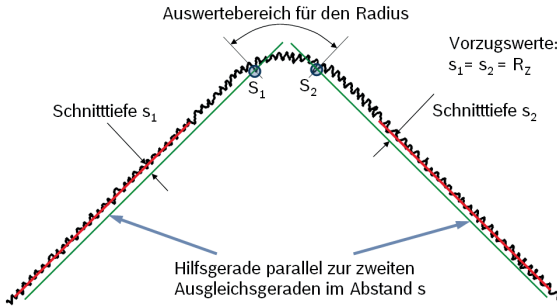


Mit Hilfe des Referenzpunktes und der Ausblendungen (Strecken e) werden die Profilabschnitte E-X ermittelt und darüber die zweiten Ausgleichsgeraden gebildet.

Die Längen der Ausblendungen sollten im Prüfplan fest-

gelegt und im Messprotokoll angegeben werden.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



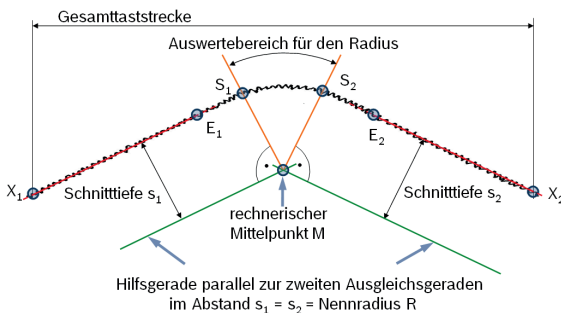
Parallel zu den zweiten Ausgleichsgeraden werden im Abstand s Hilfslinien gezogen. Die Punkte, an denen diese Hilfslinien die Profillinien schneiden, begrenzen den Bereich S_1 - S_2 , über den der Radius berechnet wird.

Das mehrstufige Verfahren führt zu robusten Auswertebereichen. Dies ist eine notwendige Bedingung für wiederholbare Messergebnisse. Gerade bei der Radiusermittlung ist dies alleine aber noch nicht ausreichend. Mit flacher werdendem Winkel zwischen den beiden den Radius begrenzenden Flächen wird das Profilstück, über das der Radius berechnet wird, immer kürzer. Der Mittelpunkt des darin einzupassenden Kreises wird immer unsicherer. Somit ist auch das Messergebnis für den Radius unsicher.

Das beschriebene Verfahren hat jedoch den Vorteil, dass die Messung an einem unbekannte Bauteil, bei dem der Radius-Sollwert nicht bekannt ist, reproduzierbar ausgewertet werden kann.

Für Fälle, in denen der Radius aus der Zeichnung bekannt ist und die Radius-toleranz klein gegenüber dem Betrag des Radius ist, wird ein Sonderverfahren zur Auswertung eingesetzt.

3.2 Bestimmung des Auswertebereichs - Sonderverfahren



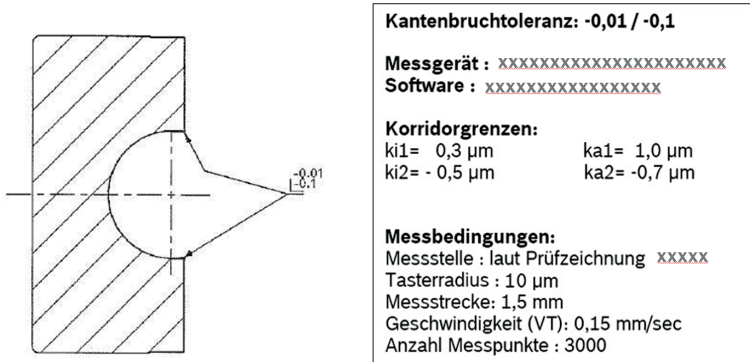
Beim Sonderverfahren wird die Schnittiefe s gleich dem Nennradius R gesetzt. Der Schnittpunkt der beiden Hilfsgeraden ist dann der rechnerische Mittelpunkt M . Die Lote auf diese Hilfsgeraden im Punkt M schneiden die Profillinie in den Punkten S . Über das

Profilstück S_1 - S_2 wird der Radius berechnet

4. PRAXISBEISPIEL

Aufgabenstellung: Messung eines Kantenbruchs.

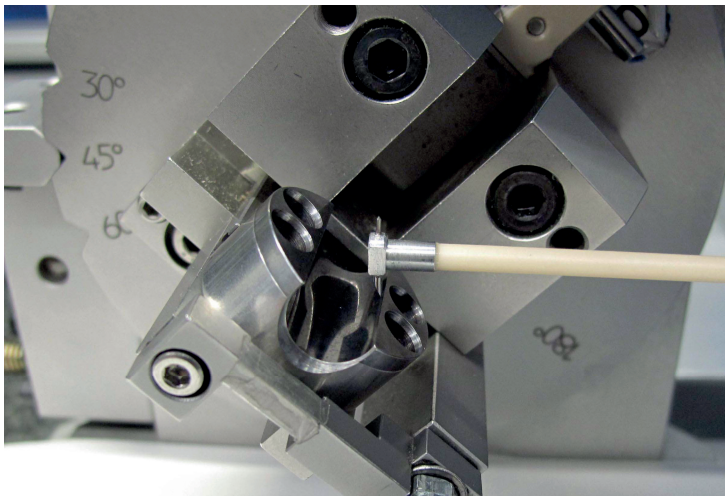
4.1 Merkmal gemäß Zeichnung und Angaben aus der Prüfplanung



In der Zeichnung ist das Merkmal in der bekannten Art und Weise bemaßt. Der Prüfplan enthält ergänzende Angaben zur Auswertung.

4.2 Messaufbau

der Prüfling liegt zur Messung unter 45° geneigt in einer Vorrichtung.



1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

4.3 Messprozessfähigkeit

Die Fähigkeitskennwerte für die Messprozesse bei Kantenbruch und Radius haben sich durch die Einführung der beschriebenen Vorgehensweise signifikant verbessert. Der Grad der Verbesserung hängt dabei allerdings sehr stark von den konkreten Gegebenheiten der jeweiligen Messaufgabe ab, darum kann keine pauschale Ziffer als Maß für die Verbesserung angegeben werden.

5. QUELLEN**Bosch-Norm N42AP620**

"Prüfung von Werkstückkanten mit unbestimmter Form",
Ausgabe 2010-07-12

Bosch-Norm N42AP621

"Messung von Radien an Werkstückkanten",
Ausgabe 2010-10-04

Anwendung der BOSCH-Norm zur Messung von Kantenbrüchen mit Hilfe von optischer Oberflächenmesstechnik

Dr.-Ing. Till Grübler

Robert Bosch GmbH, Werk Bamberg
Am Börstig 2, 96052 Bamberg
till.gruebler@de.bosch.com

Abstrakt: Die Messgerätefähigkeit für die Kantenbruchmessung kann durch die Verwendung von optischen Oberflächenmessgeräten deutlich verbessert werden. Die Datensätze dieser Messgeräte werden gemäß der BOSCH-Norm für Kantenbrüche ausgewertet. Als Ergebnis wird der Mittelwert über einen größeren Bereich der Werkstückkante ausgegeben. Besonders bei eng tolerierten Kantenbrüchen mit einer Toleranz $< 10 \mu\text{m}$ konnte nachgewiesen werden, dass durch die flächige Erfassung und Auswertung eine fähige Messung möglich ist, während taktil nur eine bedingte Messgerätefähigkeit erreicht wurde. Neben einer guten Wiederholbarkeit der Messung ist es wichtig, auch den Absolutwert des Kantenbruchs richtig zu ermitteln. Zur Rückführung des Kantenbruchs wird ein Normal vorgestellt, das einen variablen Kantenbruch zwischen $5 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ abbildet und derzeit bei der PTB kalibriert wird.

1. MOTIVATION

Aufgrund steigender Betriebsdrücke bei Common Rail-Injektoren schreitet die Miniaturisierung der einzelnen Werkstücke immer weiter voran. Damit geht eine Einschränkung der Toleranzen unter anderem von Kantenbrüchen einher, was eine große Herausforderung für die bislang dort eingesetzte taktile Messtechnik darstellt.

1.1 Anforderungen aus der Praxis an die Kantenbruchmessung

Common Rail-Injektoren (CRI) können als hydraulischer Schalter verstanden werden, in denen ein elektrisch angesteuertes Niederdruckventil hydraulisch das Hochdruckventil schaltet, mit dem die Einspritzung des Dieselmotorkraftstoffs direkt in den Zylinder erfolgt.

Die immer weiter gehende Einschränkung der zulässigen Emissionen von Schadstoffen und Partikeln führt bei Common Rail-Injektoren zu steigenden Anforderungen bezüglich der Genauigkeit in der Menge des eingespritzten Kraftstoffs, des Einspritzzeitpunkts und der Zerstäubung des Kraftstoffs. Um diese Eigenschaften gewährleisten zu können, müssen der Öffnungsdruck des

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Ventils und die Durchflussmenge über die Toleranzen der beteiligten Werkstücke sehr genau kontrolliert werden.

Abbildung 1 zeigt schematisch eine typische Dichtkonfiguration in dem Niederdruckkreislauf eines Common Rail-Injektors. In dem unteren Werkstück werden zwei Kegelstümpfe miteinander verschnitten. Der sich daraus ergebende Schnittkreis dichtet gegen einen weiteren Kegel ab. Um die Funktion des Injektors sicherzustellen, müssen die Kegelwinkel und der Durchmesser der Verschneidung sehr genau definiert sein. Hier spielen natürlich auch die Kantenbrüche an den einzelnen Übergangsstellen eine entscheidende Rolle, da sie einen Einfluss auf den resultierenden Durchmesser haben und die effektive Schenkellänge der einzelnen Winkel beeinflussen.

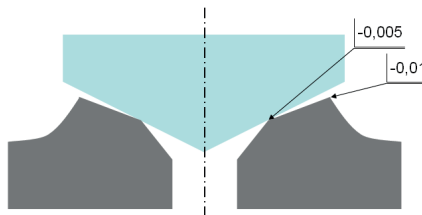


Abbildung 1: Beispiel für eine typische Dichtkonfiguration für Dieselbauteile und die Kantenbruchtoleranzen, die an den Kegelübergängen gegeben sind.

Die in Abbildung 1 dargestellten Kantenbruchtoleranzen von 5 µm bis 10 µm sind daher typisch für viele der aktuellen Produktgenerationen. Sie müssen prozesssicher hergestellt werden und selbstverständlich auch messgerätefähig überprüft werden.

1.2 Erreichbare Messgerätefähigkeiten bei der taktilen Messung des Kantenbruchs

Stand der Technik für die Messung eines Kantenbruchs sind derzeit taktile Konturmessgeräte. Abbildung 2 zeigt exemplarisch zwei verschiedene Geräte, die im Werk Bamberg für die Messung von Kantenbrüchen eingesetzt werden.



Abbildung 2: Taktile Konturmessgeräte wie z.B. Mahr LD120 oder Hommel nanoscan für die Messung eines Kantenbruchs.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Auf diesen beiden Geräten wurde die BOSCH-Norm N42AP620 [1] zur Auswertung der Kantenbrüche implementiert. Die Norm beschreibt ein Verfahren, das den Beginn und das Ende eines Kantenbruchs eindeutig definiert. Besonders bei Oberflächen, bei denen die Kantenbruchtoleranz nicht wesentlich größer als die Oberflächenrauheit ist, wird die Bestimmung des Anfangs- und Endpunkts deutlich stabiler, weil der Bedienerinfluss eliminiert wird.

Damit ist auch auf taktilen Messgeräten eine Verbesserung der Messgerätefähigkeit gegenüber der Auswertung, bei der der Bediener manuell den Beginn und das Ende eines Kantenbruchs bestimmen muss, gegeben. Die Tabelle 1 zeigt die erreichbaren Messgerätefähigkeiten. Bei Kantenbruchtoleranzen von 10 μm ... 90 μm , wie sie z.B. an nicht funktionskritischen Werkstückkanten gegeben sein können, erreicht man bei einem %GRR-Test [2] Werte kleiner 10%, d.h. es liegt eine fähige Messung vor.

	Toleranz	%GRR	
Vorbearbeitungsstufe, nicht funktionskritische Bauteile	90 μm	2 – 3 %	😊
	10 μm	7 – 8 %	😊
Funktionskritische Bauteile	5 μm	15 – 18 %	😞

Tabelle 1: Erreichbare Messgerätefähigkeiten in Abhängigkeit von der Kantenbruchtoleranz.

Betrachtet man allerdings die funktionskritischen Werkstückkanten mit der Kantenbruchtoleranz von 5 μm ... 10 μm , dann ergibt eine Messgerätefähigkeitsuntersuchung einen %GRR von 15 - 18%, d.h. es liegt nur eine bedingte Messgerätefähigkeit vor.

Durch die Anwendung der BOSCH-Norm zur Kantenbruchauswertung wurde der Bedienerinfluss auf die Messung ausgeschlossen. Jedoch bleibt bei einer Wiederholuntersuchung der Einfluss der Messortunsicherheit. Wird das Werkstück bei der Wiederholmessung wie gefordert aus der Vorrichtung entnommen und wieder eingelegt, dann wird die nächste Messung niemals exakt an der gleichen Stelle erfolgen, sondern einige Mikrometer daneben. Da die Rauheit der Oberfläche statistisch verteilt ist, liegen dort andere Profilverhältnisse vor. Beispielsweise kann im Bereich der Werkstückkante nun ein Profilberg statt einem Profital gemessen werden, was den Kantenbruch verkürzt.

Wird das taktile Konturmessgerät durch ein optisches Oberflächenmessgerät ersetzt, kann dieses Problem gelöst werden. In einer Messung eines optischen Oberflächenmessgeräts liegt nicht nur ein einzelner Profilschnitt über die Werkstückkante vor, sondern es können viele Profilschnitte im Abstand der optischen Auflösung des Messgeräts entnommen werden. Die BOSCH-Norm zur Kantenbruchauswertung kann dann auf jeden einzelnen dieser extrahierten Profilschnitte angewendet werden und es wird der Mittelwert über alle Einzelmesswerte berechnet. Durch diese Mittelung über einen größeren Bereich der Werk-

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

stückkante wird der Einfluss des Messorts reduziert und die Messgerätefähigkeit verbessert.

2. OPTISCH FLÄCHENHAFTE MESSUNG EINES KANTENBRUCHS

Für die Messung der Kegelwinkel und Verschneidungsdurchmesser stehen Weißlichtinterferometer in der Fertigung zur Verfügung. Daher ist es aus wirtschaftlichen Gründen naheliegend, auch die Messung der Kantenbrüche auf diesen Geräten zu realisieren.

2.1 Optische Messung und Auswertung von Kantenbrüchen

Um Kantenbrüche mit einer Toleranz von $5\text{ }\mu\text{m}$ messen zu können, ist eine optische Auflösung von im Idealfall $1/20$ der Toleranz erforderlich, also $0,25\text{ }\mu\text{m}$. Die hier vorgestellten Messungen wurden mit einem $50\times$ Mirau-Objektiv durchgeführt, womit eine Auflösung von $0,22\text{ }\mu\text{m}$ / Pixel erreicht und ein Feld von $220 \times 220\text{ }\mu\text{m}$ abgebildet wird. In der Abbildung 3 ist eine solche Messung mit einem Weißlichtinterferometer an einem Werkstück dargestellt, das einen Doppelkegel wie in Abschnitt 1 beschrieben besitzt. Sowohl am Übergang von Kegel 1 auf Kegel 2, als auch am Übergang von Kegel 2 auf Kegel 3 ist ein Kantenbruch auszuwerten.

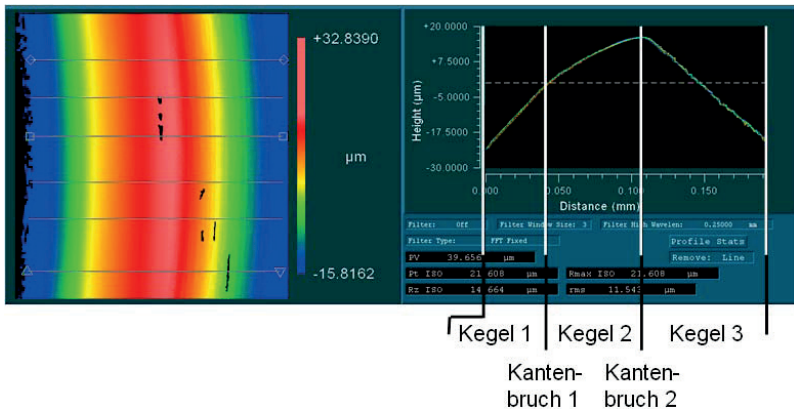


Abbildung 3: Messung eines Ausschnitts des Doppelkegels auf einem Zygo Weißlichtinterferometer.

Dazu wird nach der Datenaufnahme der Datensatz in eine Zusatzsoftware geladen. Da es sich um rotationssymmetrische Bauteile handelt, wird in einem ersten Schritt durch eine Zylinderkoordinatentransformation die Krümmung in den zu vermessenden Kanten entfernt und das Bauteil so ausgerichtet, dass die zu vermessende(n) Kante(n) exakt vertikal im Bild liegen. Die Ausrichtung

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

kompensiert auch eine schlechte Justierung des Bauteils während der Messung. Diese Operation ist in Abbildung 4 dargestellt. Nun ist es möglich, eine beliebige Anzahl an Einzelprofilen zu extrahieren.

Als nächster Schritt wird jedes Profil automatisch in die einzelnen Profilsegmente – in diesem Fall die drei Kegelabschnitte – zerlegt. Die Software bildet nach einem entsprechenden Kantenabstrich die Ausgleichsgeraden und legt den Korridor um jede Ausgleichsgerade. Die Korridorbreite kann entweder als fester Wert vom Benutzer vorgegeben oder von der Software aus der Profiltiefe berechnet werden. Eine stabilere Messung erhält man mit der Vorgabe von festen Korridorbreiten. Die Berechnung der Korridorbreiten aus der Oberflächenrauheit im betrachteten Profil bringt eine zusätzliche Unsicherheit in die Messung und führt letztendlich zu einer schlechteren Messgeräteeigenschaft für die Berechnung des Kantenbruchs.

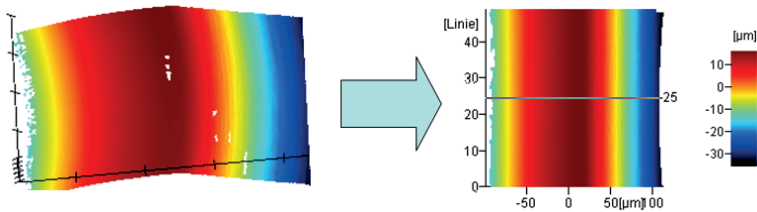


Abbildung 4: Transformation des Datensatzes zur Ausrichtung der zu messenden Kanten.

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis für ein einzelnes Profil am Kantenbruch 2. Das Ist-Profil verlässt die berechneten Ausgleichsgeraden und schneidet an den mit dem Kreuz markierten Stellen die innere Korridorgrenze. Diese Kreuze markieren den Start-/ Endpunkt für die Kantenbruchmessung. Für jedes einzelne Profil werden der linke Kantenbruch KB1 und der rechte Kantenbruch KB2 ermittelt und es werden die Mittelwerte über alle Profile gebildet. Diese Mittelwerte werden an den Anwender ausgegeben. Unterschiedliche Messaufgaben können über einen Typpdateneditor gesteuert werden. Ebenfalls ist ein vollautomatischer Betrieb möglich, in dem die Software ein bestimmtes Verzeichnis überwacht und eine Auswertung anstößt, so bald ein neuer Datensatz abgespeichert wird.

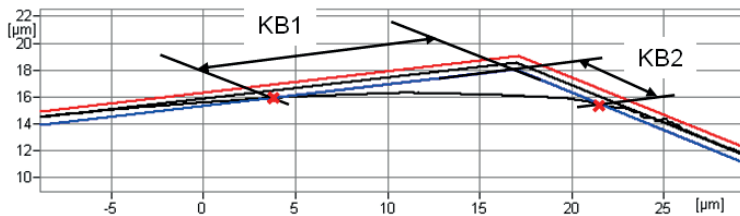


Abbildung 5: Beispiel für die Kantenbruchauswertung am Kantenbruch 2

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

2.2 Ergebnis der Messgerätefähigkeitsuntersuchung

Die Wiederholbarkeit der Kantenbruchmessung an dem betrachteten Doppelkegel wurde in einem %GRR-Test untersucht. Bei dem für die Funktion des Werkstücks besonders kritischen Kantenbruch 1 mit einer Toleranz von 5 µm wurde ein %GRR von 3,7% erreicht, d.h. durch den Einsatz eines optischen Oberflächenmessgeräts wird eine fähige Messung dieses Kantenbruchs erzielt. Abbildung 6 fasst die Verbesserungen bei der Kantenbruchmessung zusammen. Durch die Einführung der BOSCH-Norm wurde der Bedeinereinfluss bei der Messung beseitigt. Dadurch konnte der %GRR von > 30% auf ~17% reduziert werden, d.h. die Messung wird als „bedingt fähig“ bewertet. Wird nun anstelle des taktilen Konturmessgeräts ein optisches Oberflächenmessgerät verwendet, das einen größeren Bereich der Werkstückkante abbilden kann, dann reduziert sich zusätzlich der Messorteeinfluss. Durch die Mittelung über viele Profilschriebe wird der Messwert stabilisiert, wodurch ein %GRR < 10% erreicht wird und die Messung als „fähig“ bewertet werden kann.

Kantenbruch taktil gemessen, „von Hand“ ausgewertet

→ %GRR[T=5 µm]: **> 30**



Kantenbruch taktil gemessen, Auswertung nach BOSCH-Norm N42AP620

→ %GRR[T=5 µm]: **~ 17**



Kantenbruch optisch gemessen, automatisierte Auswertung und Mittelung über viele einzelne Profilschnitte

→ %GRR[T=5 µm]: **~ 3,7**

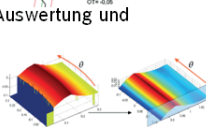
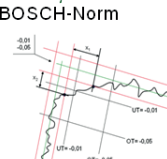
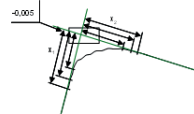


Abbildung 6: Verbesserung der Messgerätefähigkeiten durch die Einführung der BOSCH-Norm und die Verwendung von optischer Oberflächentechnik.

3. RÜCKFÜHRUNG DER KANTENBRUCHMESSUNG

Für einen Messtechniker ist es zunächst wichtig, eine bestimmte Größe in Relation zu der gegebenen Toleranz wiederholbar und stabil messen zu können. Im zweiten Schritt ist es aber ebenso wichtig, die zu messende Größe „richtig“ zu messen. Daher wurde ein Kantenbruchnormal entworfen, das bei der PTB zurückgeführt werden soll. Damit können sowohl das Messgerät als auch die Auswertemethode auf korrekte Funktion überprüft und die am Werkstück gemessenen Werte verifiziert werden.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

3.1 Konstruktion eines Kantenbruchnormals

Das Kantenbruchnormal besteht aus einem „Dach“ mit einem Öffnungswinkel von 140° , dessen Kammlinie von vorne nach hinten leicht angefasst ist. Am oberen Ende ist der Übergang der beiden Schenkel scharfkantig gratfrei, zum unteren Ende existiert eine Fase mit einer zunehmenden Breite auf maximal 0,2 mm. Damit ergibt sich über die gesamte Länge ein variabler Kantenbruch mit den beiden theoretischen Grenzwerten $0\text{ }\mu\text{m}$ und $106\text{ }\mu\text{m}$. Damit hat der Messort einen Einfluss auf den Messwert. Um reproduzierbar an der gleichen Stelle die Messung durchführen zu können, sind in einem Abstand von 0,2 mm von der Kante 10 Lasermarken auf der Oberfläche angebracht, anhand derer sich das Normal auf dem Messgerät ausrichten lässt.

Die Rauheit der Oberfläche wurde bewusst nicht so gut wie möglich hergestellt, sondern entspricht der Oberflächenrauheit der Werkstücke. Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich ideale Oberflächen zwar sehr gut rückführen lassen, bei der Vermessung mit einem optischen Flächenmessgerät aber ein anderes Verhalten zeigen als eine reale Werkstückoberfläche und daher die Ergebnisse nur bedingt miteinander vergleichbar sind. An dem Normal wurde an mehreren Stellen der R_z bestimmt, es ergaben sich typische Werte von $R_z = 0,4 \dots 0,5\text{ }\mu\text{m}$. Daher wurden die Korridor Grenzen für die Kantenbruchauswertung auf $\pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$ eingestellt.

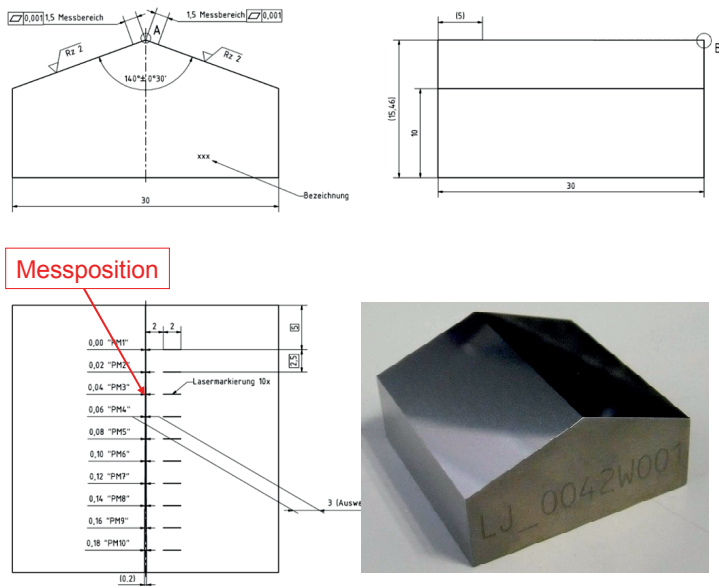


Abbildung 7: Konstruktion des Kantenbruchnormals.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

3.2 Messungen am Kantenbruchnormal

Um die Eignung des Kantenbruchnormals für eine Rückführung des Kantenbruchs zu untersuchen, wurden Wiederholmessungen an den Prüfpositionen 1 und 3 durchgeführt, d.h. auf der Seite des Kantenbruchnormals, wo die Fase schmal ist und sich damit sehr kleine Kantenbruchmesswerte ergeben. Bei diesen Wiederholmessungen wurde das Normal mit Hilfe einer Maske im Livebild bei jeder Messung erneut an der jeweiligen Lasermarkierung ausgerichtet. Gemessen wurde ein 60 µm breiter Streifen, aus dem 50 Profile extrahiert und ausgewertet wurden.

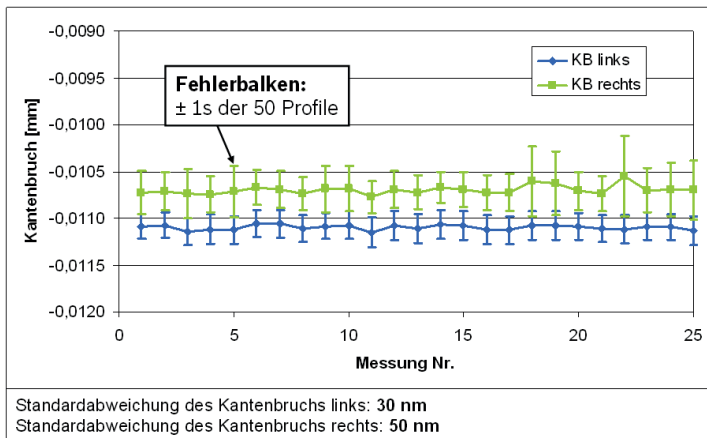


Abbildung 8: Ergebnis der Wiederholmessung am Kantenbruchnormal an der in Abbildung 7 gekennzeichneten Messposition.

Auch hier zeigt sich, dass die optische Messung des Kantenbruchs eine sehr gute Wiederholbarkeit liefert. Die Standardabweichung des Mittelwerts für den Kantenbruchmesswert ist kleiner als 50 nm. Außerdem ist die manuelle Positionierung des Kantenbruchnormals an den Lasermarkierungen ausreichend, um diese kleine Wiederholstreuung zu gewährleisten. Nach Abschluss der Kalibrierung bei der PTB wird das Normal zur Überwachung der Kantenbruchmessung eingesetzt werden.

4. QUELLEN

- [1] Zimmer, Martin: "Vorgehen bei der Bewertung von Kantenbrüchen und Radien"; In: XIII. Internationales Oberflächenkolloquium, 12.-14. März 2012, Chemnitz
- [2] Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe: „10. Fähigkeit von Mess- und Prüfprozessen“

Erzeugung und Charakterisierung komplexer Kantengeometrien

Eckart Uhlmann, Arne Dethlefs*

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb

Technische Universität Berlin

Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Produktionstechnisches Zentrum (PTZ), Sekretariat PTZ 1

Pascalstrasse 8-9, 10587 Berlin

E-Mail: dethlefs@iwf.tu-berlin.de

Im Rahmen von Untersuchungen zu Herstellung und Einsatz von gezielt verrundeten Schneidkanten an Zerspanwerkzeugen mit geometrisch bestimmter Schneide wurde am IWF ein innovativer Ansatz zur Charakterisierung von Kanten entwickelt und eingeführt [Uhlmann 2011a]. Diese Beschreibung eröffnet völlig neue Möglichkeiten zur gezielten Auslegung von Kanten, da erstmals Rückschlüsse auf die mikrogeometrische Fertigungsqualität möglich sind. Darüber hinaus bieten sich verbesserte Möglichkeiten zur Automatisierung von Qualitätssicherungsprozessen, da mit Hilfe der aufgenommenen Profilkennlinie eindeutige Kennwerte abgeleitet werden können. Es wird die neue Systematik erläutert und das Potenzial aufgezeigt, welches eine eingehende Analyse der Kantengestalt birgt. Weiterhin wird auf die spezifischen Fertigungsverfahren und innovativen Messtechnologien eingegangen, die am IWF zur Erzeugung und Charakterisierung komplexer Kantengeometrien eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang wird die Bauteilkante als komplexes Konstruktionselement betrachtet, für das je nach Bedarf unterschiedliche Fertigungsprozesse benötigt werden und dessen Beschreibung sich aus Sicht der Autoren nicht auf die Angabe von Radius oder Fasenbreite beschränken kann.

1. MOTIVATION

Die Herstellung und Charakterisierung von Kanten rückt in der Fertigungstechnik immer weiter in den Fokus. Dies gilt sowohl für Schneidkanten an Werkzeugen mit geometrisch bestimmter Schneide als auch in zunehmendem Maße für Kanten an Bauteilen. Im Bereich der Schneidkanten liegen bereits umfangreiche Forschungsergebnisse, insbesondere aus den letzten zehn Jahren vor [Denkena 2003, Risse 2006, Graf von der Schulenburg 2008, Richarz 2008, Tikal 2009, Uhlmann 2009a, Uhlmann 2009b, Aurich 2011, Uhlmann 2011a, Uhlmann 2011b, Uhlmann 2011d]. Für Kanten an Bauteilen liegen bis heute nur begrenzte Erkenntnisse im wissenschaftlichen Bereich vor, welche sich zudem im Wesentlichen auf das Entgraten von Bauteilen beziehen [Stein 2010,

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Denkena 2011]. Für geometrisch komplexe, hochbeanspruchte und somit kapitalintensive Bauteile z. B. aus den Bereichen Luftfahrt, Automobil oder der Medizintechnik werden allerdings oft komplexe Kanten geometrien in engen Toleranzen gefordert, für die heute noch keine einheitliche und eindeutige Beschreibung möglich ist. Eine genaue Spezifikation der Kante kann in der Regel nicht oder nur durch Angabe zahlreicher, nicht automatisiert überprüfbarer Anforderungen erfolgen. Zudem wird durch die Angabe von Radien als Bemaßung außer Acht gelassen, dass mit vielen Verfahren, die zur Erzeugung von Kanten eingesetzt werden, das Herstellen von Rundungen mit konstantem Radius und tangentialem Übergang nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich ist. In der Regel entstehen so Kanten geometrien, die nur in grober Näherung als Radius charakterisierbar sind.

2. PROFILKENNLINIE UND CHARAKTERISIERUNG VON KANTEN

Im Zuge von Untersuchungen zur Herstellung von gezielt gerundeten Schneidkanten an Hartmetall-Wendeschneidplatten durch Strömungsschleifen wurde eine Reihe nachbearbeiteter Schneidkanten mit verschiedenen optischen Verfahren vermessen. Hierbei zeigte sich, dass bei der Verwendung heute verfügbarer Charakterisierungsmethoden aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten augenscheinlich unterschiedliche Profile sehr ähnliche Kennwerte bezüglich der Schneidkante lieferten. Vor diesem Hintergrund wurde am IWF ein neues Modell zur Charakterisierung von geometrisch bestimmten Schneiden, die Schneidenprofilkennlinie (SPK), Abbildung 1, entwickelt [Uhlmann 2011a]. Anstatt nur einen Radius zur Beschreibung der Schneide heranzuziehen, definiert die SPK die tatsächlichen Span- und Freiwinkel durch Abbildung der Winkel über einer Laufvariable entlang der Schneidkante. Zunächst wird lotrecht zum angenommenen Spanwinkel $\gamma = 0^\circ$ der tiefste Punkt der Schneide P_0 ermittelt, der nun den Übergang zwischen Span- und Freifläche darstellt. Die Laufvariable p_γ startet an diesem tiefsten Punkt und läuft auf dem Spanflächenprofil. Im Punkt P_γ schneidet das Schneidkantenprofil die Tangente der Spanfläche. Die Laufvariable p_γ läuft auf dem Freiflächenprofil und schneidet die Freiflächentangente im Punkt P_α . Werden nun die tatsächlichen, lokalen Span- und Freiwinkel über den Laufvariablen aufgetragen, ergibt sich ein eindeutiges Abbild der Schneide.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

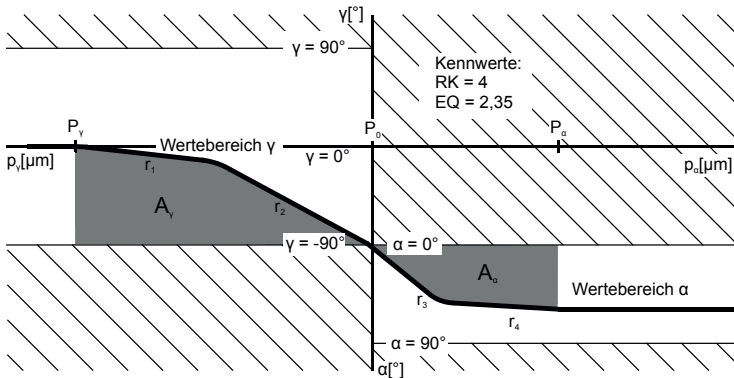
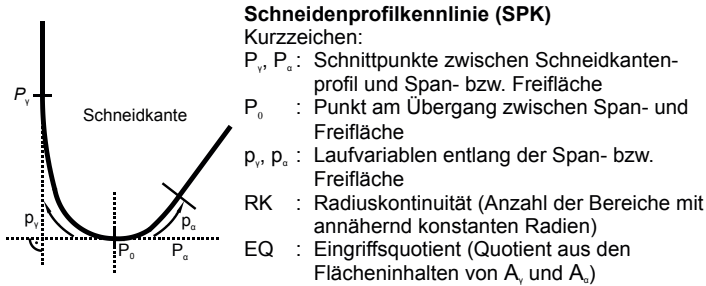


Abbildung 1: Darstellung der Schneidenprofilkennlinie (SPK)

Um einen stetigen Verlauf der SPK beim Schneiden der y-Achse zu gewährleisten, und somit die Aussagekraft des SPK-Diagramms zu erhöhen, erfolgten eine Verschiebung der Skala für den Freiwinkel um 90° nach unten und eine Multiplikation mit (-1) . Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine SPK für die abgebildete Schneide mit nicht kreisbogenförmigem Übergang von Span- zu Freifläche. In der linken Hälfte des Diagramms findet sich der Verlauf des Spanwinkels, in der rechten Hälfte der Verlauf des Freiwinkels. Abbildung 2 zeigt die SPK von drei Schneidkanten, wobei Schneide 1 einen kreisbogenförmigen Abschnitt zwischen Span- und Freifläche besitzt. Schneide 2 hat die gleiche Geometrie wie Schneide 1, allerdings geneigt, so dass sich ein Spanwinkel $\gamma = 6^\circ$ ergibt. In den jeweils abgeleiteten SPK ist dies deutlich erkennbar. Schneide 3 besitzt zusätzlich eine Fase, die ebenfalls eindeutig in der SPK erkennbar ist.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

- 1) Schneide mit ideal kreisförmigem Übergang zwischen Span- und Freifläche
 2) gleiche Geometrie wie Schneide 1), angestellt mit $\gamma = 6^\circ$
 3) gleicher Keilwinkel wie Schneide 1), mit Fase und kleinerem Radius

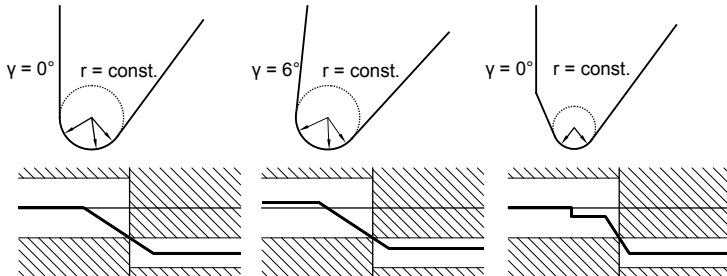


Abbildung 2: Verschiedene Schneiden mit zugehörigen Schneidenprofilkennlinien, Skalierung der Diagramme entspricht der Skalierung in Abbildung 1

Ausgehend von der neu definierten SPK können Kennwerte zur Beschreibung von Kanten definiert werden. In erster Näherung können komplexe Kantengeometrien als Ansammlung von Radian beschrieben werden, welche durch tangentielle Übergänge verbunden sind. Die Anzahl der verschiedenen Radian auf dem Kantenprofil gibt Auskunft über die Fertigungsqualität der Schneidkante und erlaubt eine genauere Beschreibung der zu fertigenden Kante. Als Kennwert wird hierzu die Radiuskontinuität RK definiert, welche die Anzahl der Bereiche entlang der SPK mit annähernd konstantem Radius beschreibt. Zur Identifikation der Bereiche mit annähernd konstanten Radian ist eine maximale Streubreite zu definieren, welche die zulässige Radiusabweichung innerhalb eines Bereichs vorgibt. Diese Streubreite ist in Abhängigkeit von der geforderten Fertigungsgenauigkeit der Kante und der Genauigkeit der verwendeten Messtechnik festzulegen. Weiterhin wird als Kennwert für die relative Lage der Schneidkante zu Span- und Freifläche der Eingriffsquotient EQ definiert. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis der in Abbildung 1 dargestellten grauen Flächen A_γ und A_a unter bzw. oberhalb der SPK.

Mathematisch betrachtet handelt es sich bei der SPK um die erste Ableitung des Profilverlaufs, aufgetragen über eine Laufvariable entlang des Profils. Somit ist eine Übertragbarkeit auf Bauteilkanten in einfacher Weise möglich. Abbildung 3 zeigt die Anwendung der Profilkennlinie auf eine gerundete Bauteilkante. Das gezeigte Profil entsteht in dieser Form z. B. beim Bürsten von Bauteilkanten. In Abbildung 3 zeigt sich deutlich, dass die Profilkennlinie eine wesentlich genauere Beschreibung der Kantengeometrie zulässt. Bei der Charakterisierung der Kante mit der Profilkennlinie kann die zulässige Fertigungstoleranz über den in Abbildung 3 dargestellten Korridor sowie zulässige Werte, welche die Steigung nicht über- bzw. unterschreiten darf, definiert werden. Ein weiterer Vorteil der Profilkennlinie besteht darin, dass sie sich gut zur automatisier-

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

ten Bewertung der Fertigungsqualität von Kanten eignet, da Anforderungen an die Kante in einfacher Weise mathematisch beschreibbar sind.

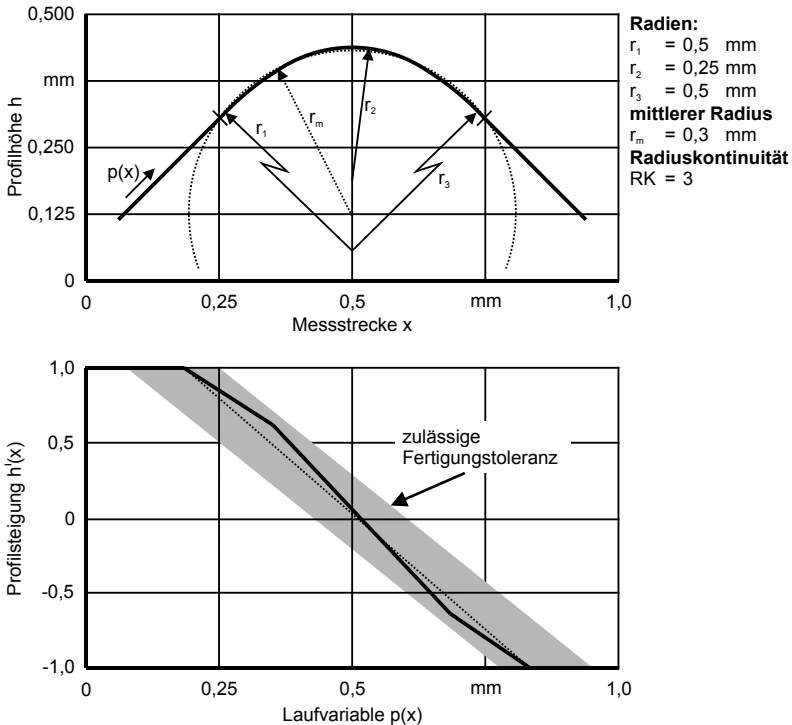


Abbildung 3: Profilkennlinie für eine beispielhafte Bauteilkante

3. VERFAHREN ZUR GEZIELTEN KANTENHERSTELLUNG UND CHARAKTERISIERUNG

Am IWF steht eine Vielzahl von Verfahren zur gezielten Erzeugung von Kanten zur Verfügung. Fasen und facettierte Kanten können durch Fräsen, sowohl auf Bearbeitungszentren als auch robotergeführt hergestellt werden. Bei der robotergeführten Bearbeitung werden hierzu nachgiebige Spindeln eingesetzt, durch welche die Positionierungenauigkeit des Roboters ausgeglichen werden kann. Weiterhin werden zur Fräsbearbeitung an Kanten auch kraftgeregelte Roboter eingesetzt. Dominierend bei der Kantenherstellung sind die Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide, von denen eine Vielzahl Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten am IWF ist. Mit hohem zeitlichem und materiellem Auf-

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

wand können auf Bearbeitungszentren durch Koordinatenschleifen sehr exakte Kantengeometrien hergestellt werden, wozu am IWF ein hochgenaues 5-Achs Bearbeitungszentrum eingesetzt wird. Weiterhin können kraft- und weggeregelt mit einem 6-Achs-Roboter und entsprechenden Spindeln Kanten mit Schleifstiften erzeugt werden. Die industriell am weitesten verbreiteten Verfahren zur Kantenbearbeitung werden am IWF ebenfalls erforscht und kontinuierlich weiterentwickelt, insbesondere das Bürsten, Gleitschleifen und Strömungsschleifen. Diese drei Verfahren wurden sowohl zum Erzeugen gezielt gerundeter Schneidkanten [Denkena 2003, Risse 2006, Graf von der Schulenburg 2008, Tikal 2009, Uhlmann 2009b, Uhlmann 2011d] als auch zur Nachbearbeitung von Kanten an Bauteilen eingesetzt. Großes Potenzial für eine effiziente und präzise Kantenbearbeitung birgt nach derzeitigem Stand der Erkenntnisse [Uhlmann 2011c] das am IWF entwickelte Verfahren „Robotergeführtes Tauchgleitschleifen“. Bei diesem Verfahren wird das Werkstück von einem Roboter durch eine Schüttung aus Gleitschleifkörpern bewegt, ähnlich dem Tauchgleitschleifprozess. Durch die große kinematische Flexibilität des Roboters ist es möglich auch bei geometrisch komplexen Bauteilen gezielt Kanten durch Gleitschleifkörper anzuströmen und somit präzise Kantengeometrien zu erzeugen. Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung des robotergeführten Tauchgleitschleifens ist eine genaue Kenntnis der Strömungssituation im Gleitschleifmedium sowie der grundlegenden Trennmechanismen beim Gleitschleifen. Diese Fragestellungen sind derzeit Gegenstand der Grundlagenforschung am IWF.

Messtechnisch können Kanten am IWF mit modernster Technologie sowohl optisch als auch taktil vermessen werden. Es stehen taktile Messgeräte wie die 3-D-Koordinatenmessmaschine Zeiss F25 und ein kombiniertes Rauheits- und Konturmessgerät der Jenoptik AG, das nanoscan 855 zur Verfügung. Zur optischen Vermessung von Kanten kann das InfiniteFocus G4 der Alicona Imaging GmbH eingesetzt werden das auf dem Prinzip der Fokus-Variation beruht. Weitere Möglichkeiten zur optischen Vermessung bieten das auf Laserinterferometrie basierende microProf MPR100 der FRT GmbH und das GFM MicroCAD pico der GF Messtechnik GmbH, welches nach dem Prinzip der Streifenlichtprojektion arbeitet.

4. FAZIT UND AUSBLICK

Durch die vielfältigen Möglichkeiten Kanten an Bauteilen oder Werkzeugen gezielt zu erzeugen, ergibt sich ein großer Bedarf an Geräten zur Vermessung und Modellen zur Charakterisierung von Kantengeometrien. Diesem Bedarf wird am IWF zum einen durch die kontinuierliche Verbesserung und Weiterentwicklung der Modelle zur Charakterisierung als auch durch den Einsatz modernster Messtechnologien Rechnung getragen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

5. QUELLEN

- [Aurich 2011] Aurich, J. C.; Zimmermann, M.; Leitz, L.: *The preparation of cutting edges using a marking laser*. Production Engineering Research and Development 5 (2011) 1, S. 17 - 24.
- [Denkena 2003] Denkena, B.; Weinert, K.; Friemuth, T.; Spengler, C.; Schulte, M.; Kötter, D.: *Kantenpräparation an Hartmetall-Werkzeugen – Einfluss der Prozessparameter beim Strahlen und Bürsten*. VDI-Z Spezial Werkzeuge 145 (2003) I, S. 51 - 54.
- [Denkena 2011] Denkena, B.; Böß, V.; Kaddour, R.; Friedrichs, J.; Bassett, E.: *Automatisiertes Entgraten mit Industrierobotern - durchgängige CAX-Prozesskette*. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 9, S. 623 - 628.
- [Graf von der Schulenburg 2008] Graf von der Schulenburg, M.; Mihotovic, V.; Uhlmann, E.: *Gezieltes Schneidkantenverrunden mit Diamantschleifmedien*. diamond business (2008) 3, S. 18 - 25.
- [Richarz 2008] Richarz, S.; Gebhard, S.; Mihotovic, V.: *Feinbearbeitung von Vollhartmetallbohrwerkzeugen*. Futur 10 (2008) 3, S. 2 - 3.
- [Risse 2006] Risse, K.: *Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl*. Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 15/2006. Hrsg.: Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Schuh, G.; Weck, M.; Brecher, C.; Schmitt, R. Aachen: Shaker, 2006.
- [Stein 2010] Stein, S.: *HSC-Kantenbearbeitung von Blech*. Schriftenreihe des PTW: „Innovation Fertigungstechnik“. Hrsg.: Abele, E. Aachen: Shaker, 2010.
- [Tikal 2009] Tikal, F. (Hrsg.): *Schneidkantenpräparation, Ziele, Verfahren, Messmethoden*. Kassel: kassel university press, 2009.
- [Uhlmann 2009a] Uhlmann, E.; Barthelmä, F.; Gröger, M.; Richarz, S.: *Entwicklung innovativer Werkzeuge zur Zerspanung harter Kompetenten (Hartspan)*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben; Zeitraum: 01.01.2008 bis 31.12.2009; Programm InnoNet / TU Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb.
- [Uhlmann 2009b] Uhlmann, E.; Richarz, S.; Mihotovic, V.: *Oberflächenvorbehandlung und Kantenpräparation an Hartmetallwerkzeugen*. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 1 - 2, S. 17 - 24.
- [Uhlmann 2011a] Uhlmann, E.; König, J.; Dethlefs, A.; Graf von der Schulenburg, M.: *Charakterisierung geometrisch bestimmter Schneiden*. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 7 - 8, S. 475 - 481.
- [Uhlmann 2011b] Uhlmann, E.; Richarz, S.; Fuentes, J.: *Hartdrehen von PM-Schnellarbeitsstahl*. Diamond Business (2011) 1, S. 10 - 19.
- [Uhlmann 2011c] Uhlmann, E.; Dethlefs, A.: *Polieren komplexer Bauteile*. WB Werkstatt + Betrieb (2011) 6, S. 28 - 31.
- [Uhlmann 2011d] Uhlmann, E.; Löwenstein, A.; Mahr, F.; Oberschmidt, D.: *Schneidkantenpräparation von Mikrofräsern*. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 1 - 2, S. 73 - 80.

Reproduzierbare Verrundung von Schneidkanten an Mikrowerkzeugen

Thiel, W.

Magnetfinish GmbH, Galgenried 18, CH-6370 Stans

thiel@magnetfinish.com

Abstrakt: Mikrowerkzeuge erobern sich immer neue Anwendungsbereiche. Mit dem Magnetfinishverfahren gelingt eine gezielte Präparation der Schneidkanten auch bei sehr kleinen Werkzeugdurchmessern. Sowohl Umfangsschneiden, als auch Stirnschneiden können im einstelligen Mikrometerbereich verrundet werden. Dabei ergeben sich spezielle Anforderungen an die Messtechnik der Radienbestimmung.

1. EINLEITUNG

Die Kantenverrundung an Schneidwerkzeugen ist heute ein probates Mittel um den Standweg der Werkzeuge zu verlängern. Zumindest für Standardwerkzeuge sind diese Zusammenhänge durch zahlreiche Veröffentlichungen belegt. Bei Mikrowerkzeugen ging man vor einigen Jahren noch davon aus, dass eine gezielte Oberflächenbehandlung durch Schneidkantenpräparation und Beschichtung verzichtbar sei. Aufgrund tendenziell immer breiterer Anwendungen steigen aber inzwischen die Anforderungen sowohl an die Beschichtungssysteme für Mikrowerkzeuge, als auch an die vorausgehende Schneidkantenpräparation. Das Magnetfinishverfahren ist in besonderer Weise prädestiniert Kanten an Mikrogeometrien zu bearbeiten, da es einerseits mit Abrasiven sehr kleiner Körnung arbeitet, andererseits durch die mögliche Richtungssteuerung des Abrasivestromes nur geringe Biegemomente auf die bruchgefährdeten Mikrowerkzeuge überträgt.

Das Magnetfinishverfahren liefert vollautomatische Lösungen für die verschiedenen Aufgaben der Oberflächenbehandlung unterschiedlichster Werkzeuge für Industrie und Medizin, sowie Komponenten aus dem Automobilbau. Die Palette der zu bearbeitenden Werkzeuge reicht von Bohren und Bohrköpfen, Tiefllochbohren, Schaftfräsen, Kugelkopffräsen, Radiusfräsen, Reibahlen, Gewindewerkzeugen bis zu Wendeschneidplatten, Stanzstempeln und Matrizen. Das Verfahren ist für die meisten industriellen Werkstoffe, wie Stahl, Hartmetall, Diamant, CBN, PKD, Keramik, sowie für diverse Legierungen und Beschichtungen einsetzbar.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

2. VERFAHRENSPRINZIP

Das Magnetfinishverfahren arbeitet mit zwei speziellen Komponenten (Bild 1 und 2)

- a) einem rotierenden Magnetfelderzeuger und
- b) darauf haftenden magnetabrasiven Pulver

Der Magnetfelderzeuger ist rotationssymmetrisch aus einem Array von Permanentmagneten aufgebaut. Jedes Pulverkorn des magnetabrasiven Pulvers besteht aus einem Gitter mit abrasiven und magnetischen Bestandteilen, welche fest miteinander verbunden sind. Die magnetischen Bestandteile haben die Funktion, das Pulverkorn im Magnetfeld zu halten, während die abrasiven Komponenten die Schneidfunktion bei der Relativbewegung zwischen dem Pulverkorn und der zu behandelnden Oberfläche übernehmen.

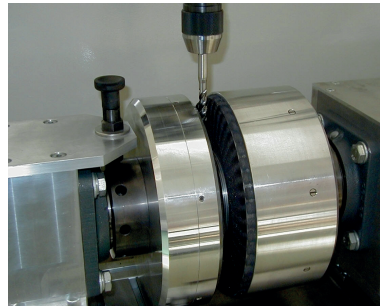
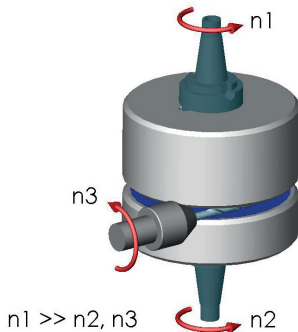


Abbildung 1: Prinzip für Schaftwerkzeuge

Abbildung 2: Kopfmodul

Zur Bearbeitung von Schneidwerkzeugen wird der Magnetfelderzeuger als zylindrischer Körper ausgebildet. Die Aussenflächen des Zylinders sind durch einen Mantel aus einem nicht-magnetischen Stoff, z.B. Aluminium, umgeben, so dass die magnetischen Feldlinien nur an der inneren Flachseite des Zylinders austreten. Auf dieser Fläche haftet das magnetische Pulver in einer Schichtdicke von 5-7mm. Zu dieser Fläche wird die zu bearbeitende Werkzeugoberfläche in einen definierten Abstand gebracht, so dass der Spalt zwischen Magnetfläche und Werkzeugoberfläche mit magnetabrasivem Pulver gefüllt ist.

Bei Rotation des Magnetkopfes entsteht eine Relativbewegung des Pulvers zur Werkstückoberfläche. Diese ermöglicht die gewünschte abrasive Bearbeitung.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Die magnetische Haftung des Pulvers erlaubt eine hohe Bahngeschwindigkeit der Pulverkörner relativ zur behandelten Oberfläche. So werden Prozesszeiten im einstelligen Sekundenbereich erreicht. Das magnetabrasive Pulver wird über die gesamte Länge des Werkzeuges gleichmässig auf dessen Oberflächen gepresst (Bild 3). So wird eine konstante Bearbeitungsqualität von der Spitze des Werkzeuges bis zum Schaft erzielt.

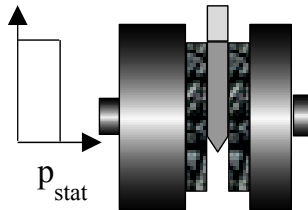


Abbildung 3: Gleichmässiger Bearbeitungsdruck über die ganze Werkzeuglänge

3. VERRUNDUNG VON WERKZEUGSCHNEIDKANTEN

Jeder Schleifprozess geht im mikrogeometrischen Bereich einher mit unerwünschten Oberflächendefekten. So ergeben sich an den Haupt- und Nebenschneiden der Werkzeuge zwangsläufig Grate oder Schartigkeiten, die beim Werkzeugeinsatz zu Mikroausbrüchen und damit vorzeitigem Verschleiss führen können. Durch gezielte Beseitigung dieser Oberflächendefekte und der Herstellung der gewünschten Mikrogeometrie kann sowohl die Standzeit der Werkzeuge verbessert, als auch die Zerspanleistung reproduzierbar gesteigert werden.

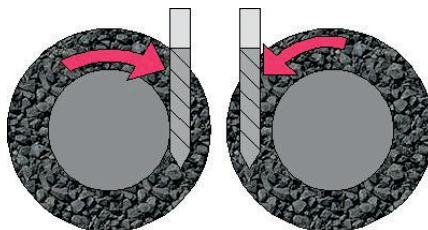


Abbildung 4: Polierung der Spannutt / Verrundung der Umfangsschneiden

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Mit verschiedenen Anströmwinkeln des Abrasives auf die Werkzeuggeometrie können unterschiedliche Wirkungen erzielt werden. Bei der Schneidkantenverrundung ist es möglich, die Umfangsschneiden unabhängig von den Stirnschneiden zu bearbeiten. Abbildung 4 (rechte Seite) zeigt das Prinzip der Verrundung an Umfangsschneiden. In Abbildung 5 ist die Verrundung der Stirnschneiden dargestellt. Durch das Prinzip der Anstellung des Werkzeuges gemäss seinem Bohrspitzenwinkel wird eine gleichmässige Bearbeitung der Schneidkanten erzielt.

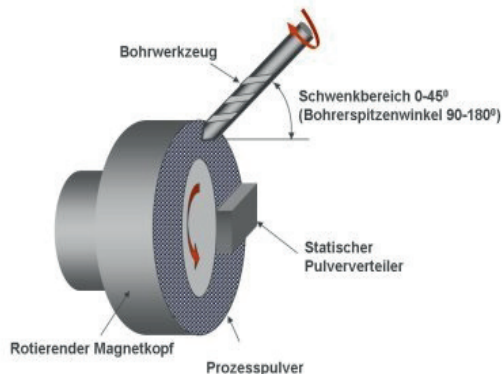


Abbildung 5: Verrundung der Schneidkanten an den Werkzeugspitzen

Abbildung 6 zeigt die Hauptschneide eines 16mm Hartmetallbohrers. Sie wurde auf 40my verrundet. Der relativ grosse Verrundungsradius prädestiniert dieses Werkzeug zur Zerspaltung von sprödem Material, wie z.B. Grauguss. Das Foto zeigt einen gleichmässigen Radius von der Schneidenecke bis zur Spitze. Durch eine gezielte Abweichung der Stellung des Magnetkopfes vom Spitzenwinkel des Werkzeuges sind auch graduell Verläufe mit zu- oder abnehmenden Verrundungsradien herstellbar.

Das gleiche Werkzeug wurde in Abbildung 7 durch die Optik eines Messgerätes zur Kantenverrundung fotografiert. Fa. Magnetfinish setzt bei der Radiusbestimmung ein Gerät ein, das auf der Streifenlichtprojektion beruht. Auf der rechten Seite ist einer der Schnitte innerhalb des Messbereiches dargestellt, der die Verrundung als näherungsweise kreisförmig ausweist.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

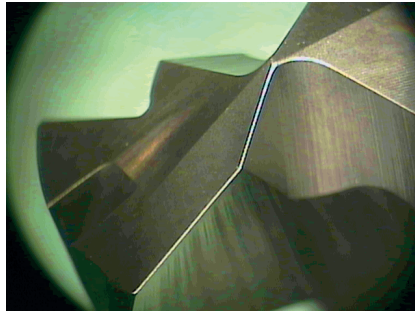


Abbildung 6: Verrundung der Hauptschneide eines 16mm-Hartmetallbohrers mit 40my

Messwert	Einheit	Mittel	Min	Max	StdAbw
-- Radiusmessung--					
Radius	μm	38,4	37,1	39,7	17,17
-- Schartigkeitsmessung--					
Schartigkeit	μm	0,6	0,0	2,3	

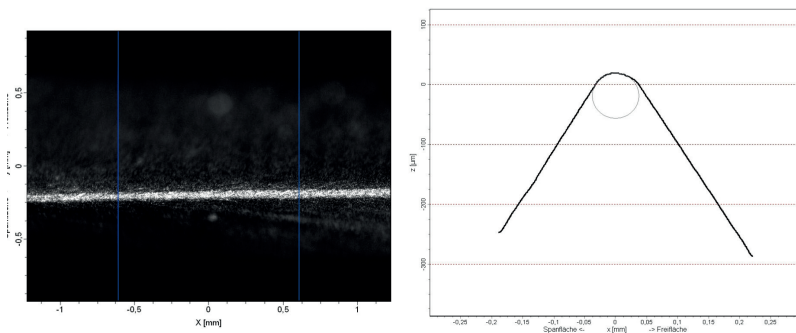


Abbildung 7: Foto mit Messbereich sowie zugehöriger Schnittdarstellung

4. SPEZIELLE ANFORDERUNGEN BEI MIKROWERKZEUGEN

Wenn von Mikrowerkzeugen gesprochen wird, sind heute meist Durchmesser kleiner 2mm gemeint, wobei der Schaft überwiegend als Einheitsschaft von $D=3\text{mm}$ nach DIN 6535 gefertigt wird. Werkzeuge dieser Dimensionen werden in steigender Zahl eingesetzt z.B. in der IT-Branche, der mobilen Kommunikationstechnik, der Medizintechnik und bei Einspritzsystemen im Motorenbau.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Bei Mikrowerkzeugen liegen die anwendungsbedingten optimalen Kantenradien zwischen 2 und 10 Mikrometern. Um Verrundungen in diesem Bereich vorzunehmen, sind mit dem Magnetfinish Verfahren Prozesszeiten zwischen 5s und 20s typisch. Um in diesem Bereich einstellbare und reproduzierbare Verrundungsradien zu erhalten, wird die Intensität des abrasiven Prozesses zurückgenommen. Dazu wird der Abstand zwischen Magnetfelderzeuger und Werkzeugoberfläche vergrößert. Abbildung 8 zeigt den Zusammenhang.

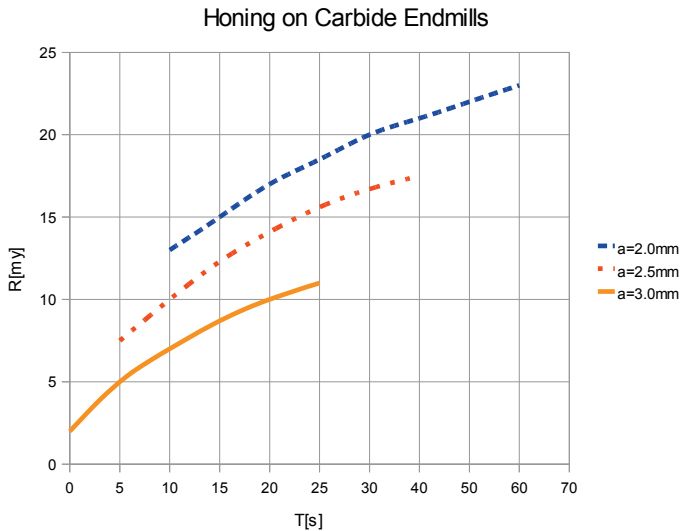


Abbildung 8: Abhängigkeit des Verrundungsradius von Zeit und Abstand

Mikrowerkzeuge werden typischerweise gemäß der unteren (durchgezogenen) Kurve mit einem Abstand von 3mm bearbeitet. Durch den verringerten Pulverdruck werden Werkzeugbrüche vermieden.

5. ERGEBNISSE VON SCHNEIDKANTENPRÄPARATIONEN

Abbildung 9 zeigt die Verrundung der Hauptschneide an einem 0.5mm Hartmetallfräser. Der Verrundungsradius von 4μm entspricht den Anforderungen an eine relativ scharfe aber schartenarme Schneidkante, wie sie beim Einsatz in zähem Material, wie z.B. Titan gewünscht wird.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Messwert	Einh.	Mittel	Min	Max	StdAbw
-- Radiusmessung--					
Radius	μm	4,3	3,5	5,1	1,98
-- Schartigkeitsmessung--					
Schartigkeit	μm	0,8	0,0	2,0	

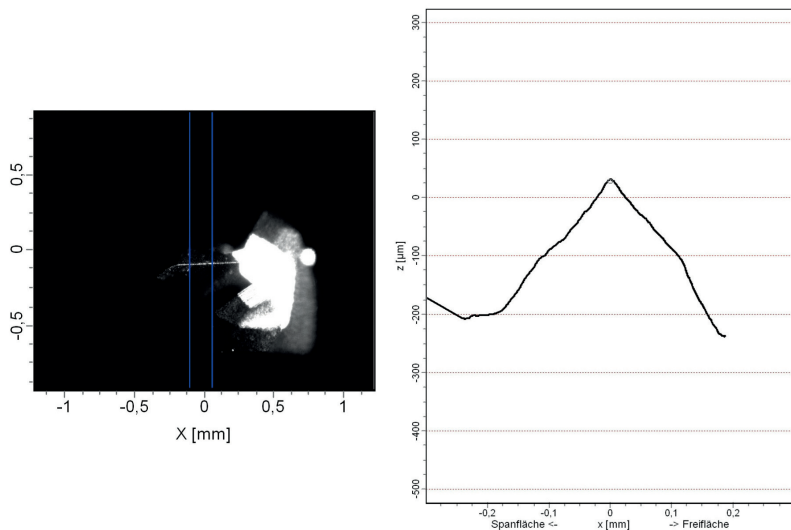


Abbildung 9: Fräser $D=0.5\text{mm}$, Werkzeugspitze verrundet mit 4my , Foto mit Messbereich sowie zugehörige Schnittdarstellung

Die Grenzen der herkömmlichen Messtechnik werden hier erreicht. Die kurzen Schneidkanten lassen nur noch wenige Messpunkte zu, da die Auflösung des Messsystems begrenzt ist.

Ebenfalls problematisch gestaltet sich die Bestimmung der Radien an den Umfangsschneiden der Mikrowerkzeuge. Diese Schneidkanten liegen nicht mehr wie an der Werkzeugspitze in einer Ebene, sondern sind gekrümmt. Der Krümmungsradius nimmt mit dem Aussendurchmesser des Werkzeuges ab. Das trifft in gleichem Masse für die Hauptschneiden von Kugelpkopfräsern zu, wie aus Abbildung 10 zu ersehen. Der noch fokussierbare Bereich der Schneidkanten ist hier auf ein Minimum geschrumpft.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Messwert	Einh.	Mittel	Min	Max	StdAbw
-- Radiusmessung--					
Radius	μm	10,0	9,4	10,6	4,50
-- Schartigkeitsmessung--					
Schartigkeit	μm	0,8	0,0	3,5	

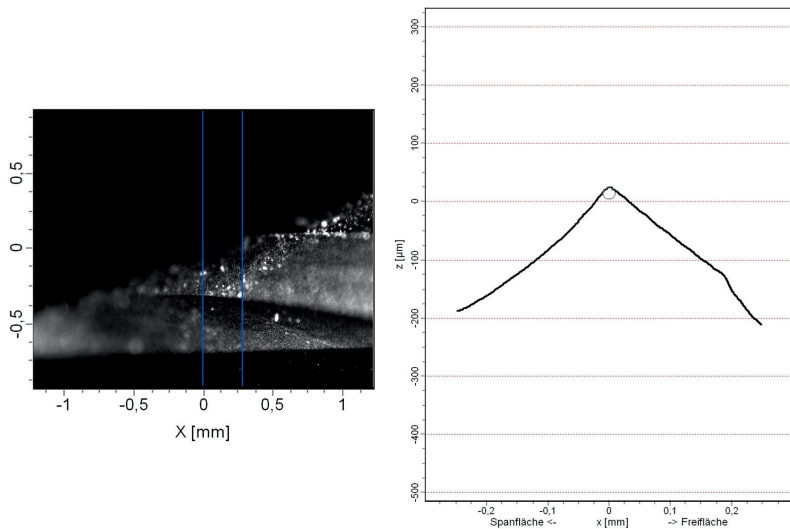


Abbildung 10: Kugelkopfräser $D=1.5\text{mm}$, Umfangsschneide verrundet mit 10my , Foto mit Messbereich sowie zugehörige Schnittdarstellung

QUELLEN

Denkena, B.; Kramer, N.; Siegel, F.; Kästner, J.: „Leistungsoptimierung an der Schneidkante“; *VDI-Z Special Werkzeuge*, August 2007

Tawakoli, T.: „Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung 2008“; *Hochschule Furtwangen University*, Mai 2008

Tikal, F.; Bienemann, R.; Heckmann, L.: „Schneidkantenpräparation“; *Kassel University*, 2009

Schneidkantenpräparation und Beschichtung: Schlüsselrollen beim Optimieren von Hochleistungswerkzeugen

Lümkemann, A., Büchel, C., Cselle, T., Morstein, M.
PLATIT AG, Eichholzstraße 9, CH-2545 Selzach, Schweiz
a.luemkemann@platit.com

Abstrakt: Bei der Weiterentwicklung von Präzisionswerkzeugen nehmen Hartstoffschichten sowie Schneidkantenpräparation wichtige Schlüsselrollen ein. Die gezielte Behandlung der Werkzeugschneide vor der anschließenden Beschichtung kann die Lebensdauer der Werkzeuge enorm verlängern. Neben der richtigen Wahl der geeigneten Hartstoffschicht muss die Methode zur Kantenbehandlung ebenso an die Anwendung angepasst sein.

In diesem Beitrag werden Beispiele für speziell an die Anwendung angepasste Hartstoffschichten im Zusammenspiel mit Schneidkantenpräparation für verschiedene Zerspanwerkzeuge vorgestellt.

Hinsichtlich Messung der Schneidkantenradien und Bestimmung der Symmetrie der Verrundung werden zudem Fragestellungen aus Sicht des Anwenders formuliert.

1. EINLEITUNG

Die Leistungsfähigkeit von Zerspanwerkzeugen wird im Wesentlichen durch folgende Faktoren bestimmt:

- Substrat
 - Makrogeometrie
 - Mikrogeometrie
 - Beschichtung
 - Bearbeitungsparameter
- } Schneidkante

Bei der Optimierung von Werkzeugen kann jeder einzelne Punkt einen wichtigen Beitrag leisten und als Resultat einen Leistungsschub bewirken. Immer wichtiger, die an die Anwendungen *angepassten Hartstoffschichten* zusammen mit entsprechend *zugeschnittener Schneidkantengeometrie*; beides liefert Alleinstellungsmerkmale und damit einen Wettbewerbsvorteil für den Werkzeughersteller. Den Trend hin zu dieser Form der Spezialisierung

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

verdeutlicht der Blick auf die Anzahl an verfügbaren Hartstoffschichten am Markt. Waren vor zwanzig Jahren nur einige wenige *Universalschichten* vorhanden, ist die Anzahl der *Spezialschichten* in der letzten Dekade quasi explodiert (siehe Abb. 1).

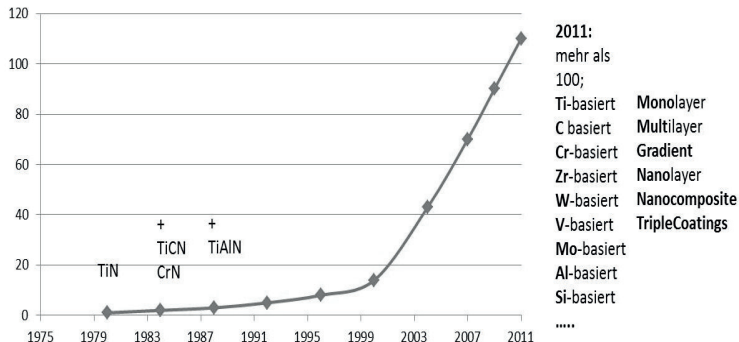


Abbildung 1: Anzahl verfügbarer Hartstoffschichten am Markt [Cselle 2011]

2. HARTSTOFFSCHICHTEN

2.1 Schichteigenschaften

Die Anforderungen an die nur wenige Mikrometer dünnen Verschleißschichten sind sehr vom Anwendungsfall abhängig und meist recht vielfältig:

- Hohe Schichthärte und hohe Verschleißbeständigkeit
- Hohe Zähigkeit und extrem gute Haftung auf dem Schneidstoff
- Chemisch stabil, d.h. möglichst Reaktionen zwischen Schneidstoff und Werkstückmaterial verhindern.
- Geringer Reibwert der Hartstoffschicht um z.B. Schnittkräfte gering zu halten und den Spanabfluss zu begünstigen

Insgesamt kann man sagen, dass die Hartstoffschicht möglichst als Trennmittel zwischen Werkzeug und Werkstück fungieren und die genannten Eigenschaften bei dem jeweiligen Temperaturbereich der Anwendung aufweisen soll.

Die folgende Tabelle zeigt eine Auswahl an Schichtkomponenten und deren Einfluss auf die Eigenschaften der Hartstoffschichten. Ausgehend von TiN als Basis werden die Veränderungen der Schichteigenschaften bei Zugabe eines Elements angegeben.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Element	Härte	Reibung	Struktur- beständig- keit vs. T	Oxidations beständ.	Verschleiß- Widerstand RT	Verschleiß- Widerstand 600°C
Titan (TiN)	Basis	Basis	Basis	Basis	Basis	Basis
Chrom (CrN)	Ø	(+)	–	Ø	++	+
Ti+Cr	(+)	(+)	Ø	Ø	(+)	Ø
+ Aluminium	+	–	+	+	Ø	++
+ Si (mit Ti)	++	Ø	+(+)	+(+)	+	++
+ Si (mit Cr)	++	Ø	+(+)	+	+	+
+ Kohlenstoff	++	++	–	--	++	--
+ Sauerstoff	–	– / +	++	++	(–)	+

Tabelle 1: Einfluss ausgewählter Elemente auf die Schichteigenschaften

Sowohl die Wahl der Schichtelemente als auch der Schichtaufbau / die Schichtstruktur haben Einfluss auf die Schichteigenschaften. Es können Schichteigenschaften von zwei oder drei verschiedenen Schichtzusammensetzungen u.a. in einer Mehrlagenstruktur wie z.B. bei den so genannten TripleCoatings® kombiniert werden [Cselle 2009].

2.2 Werkzeugtests mit verschiedenen Hartstoffschichten

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse eines Schichtvergleichs am Beispiel der Zahnradfertigung. Um den Einfluss der Beschichtung auf die Standmenge beurteilen zu können, wurden alle getesteten HSS-Wälzfräser einheitlich mittels Nassstrahlen vorbehandelt. Kantenverrundung am Zahnkopf lag im Bereich von 15µm bis 20µm.

Gegenüber der universell eingesetzten Referenzschicht AlTiN kann mit der Spezialschicht nATCRO^{3®} – einer TripleSchicht® bestehend aus AlTiCrN und AlTiCrN/SiN_x – die Lebensdauer bei dieser Anwendung verdoppelt werden.

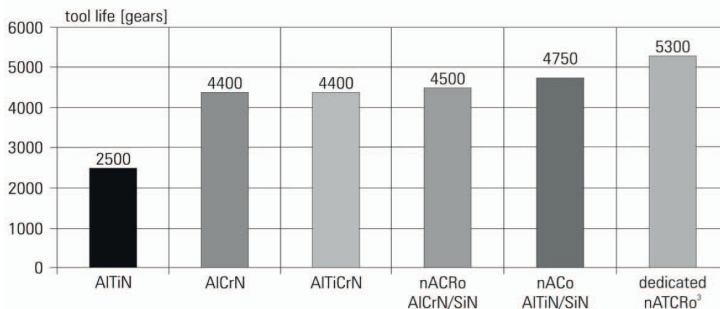


Abbildung 2: Einfluss Beschichtung beim Wälzfräsen

Material 100Cr6, 800-900 N/mm², Werkzeug PM-HSS, m=2.5, vc = 150 m/min
Entwickelt zusammen mit Fa. Liss in Rosnov, Cz

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Als weiteres Beispiel einer an die Anwendung angepassten Spezialschicht sind die Ergebnisse eines Hartfrästests in folgender Abbildung dargestellt. Es kommen auch in diesem Vergleich nur Werkzeuge mit identischer Kantenvorbehandlung zum Einsatz. Zur Vergleichbarkeit der Beschichtungen liegt der einzige Unterschied der getesteten Werkzeuge in der Art der Hartstoffschicht.

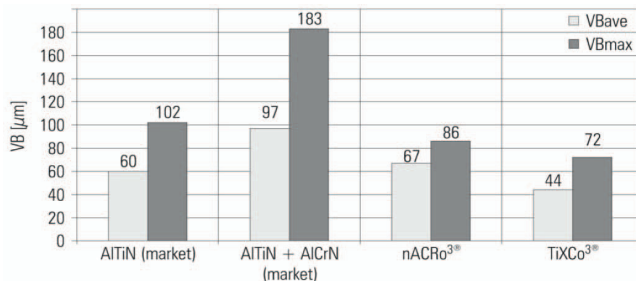


Abbildung 3: Schruppen mit Torusfräser in gehärtetem Formenbaustahl

X210Cr12, 61.5 HRC, $\varnothing=8\text{mm}$, $z=4$, $a_p=0.1\text{mm}$, $a_e=3\text{mm}$,
 $v_c=100\text{m min}^{-1}$, $n=4000\text{min}^{-1}$, $f_z=0.20\text{mm}$, $v_f=3200\text{mm min}^{-1}$, trocken
 Entwicklungsprojekt zusammen mit LMT-Fette

Besonders TiXCo3®, eine extrem harte PVD-Schicht mit TiN/SiNx basierter Decklage, zeigt einen niedrigen Verschleiß bei der Bearbeitung von hochgehärtetem (61HRC), abrasivem Kaltarbeitsstahl [Morstein 2011].

Die Hartstoffschichten können ihr ganzes Potential allerdings nur dann entfalten, wenn die vor der eigentlichen Beschichtung durchgeführte Schneidkantenbehandlung ebenso an die Anwendung angepasst wurde.

3. SCHNEIDKANTENBEHANDLUNG

3.1 Mikrogeometrie

Eine geschliffene scharfe Schneide weist eine Reihe von Mikrodefekten auf, welche einen negativen Einfluss auf die Standmenge des Werkzeuges haben können. Mit der Kantenpräparation wird das Ziel verfolgt, die Schneide zu stabilisieren, also die Ausfallwahrscheinlichkeit zu verringern, sowie eine höhere Lebensdauer des Werkzeuges zu erzielen. Wie in Abbildung 4 veranschaulicht wird mittels Schneidkantenbehandlung...

- ... die Schartigkeit der Schneide reduziert
- ... Schädigungen auf der Oberfläche sowie Schleifriefen eingeebnet
- ... eine "definierte" Mikrogeometrie (R, K-Faktor) erzeugt.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

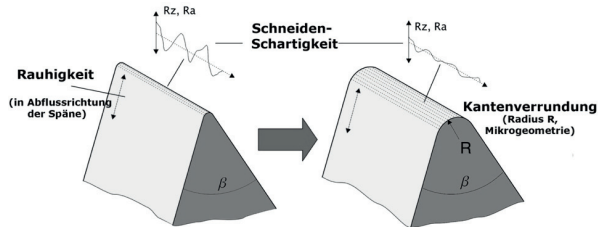


Abbildung 4: Mikrogeometrie am Schneidkeil

Eine definierte Kantenverrundung reduziert zudem den so genannten Antenneneffekt bei PVD-Schichten. Das bedeutet, der starken Erhöhung der Schichtdicke an scharfen Schneiden wird mit der Kantenverrundung entgegengewirkt. Dadurch wird kompressive Eigenspannung in der Schicht besser verteilt und als Resultat die Schichthaftung direkt an der Schneide verbessert.

Ein universell einsetzbares Verfahren zur Kantenvorbehandlung existiert jedoch nicht. Die Wahl des geeigneten Präparationsverfahrens (Mikrostrahlen, Bürsten, Schleppscheiben, Magnetfinish, ...) richtet sich nach dem Werkzeugtyp sowie der angestrebten Schneidkantenmikrogeometrie. Die optimale Präparation der Mikrogeometrie hängt von vielen Faktoren ab, wie im folgenden Kapitel gezeigt wird.

3.2 Schneidkantenradius

Der Einfluß einer definierten Kantenverrundung auf die Standmenge eines Werkzeuges wird anhand eines VHM-Torusfräasers bei der Bearbeitung von Kaltarbeitsstahl verdeutlicht. Es wurden verschiedene Kantenradien an diversen Schaftfräsern einer Sorte erzeugt und anschließend in einer Beschichtungscharge mit einer AlCrN/SiN_x Schicht (= nACRo[®]) versehen. Der einzige Unterschied zwischen den Schaftfräsern lag in der Höhe des Kantenradius. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis des Werkzeugtests.

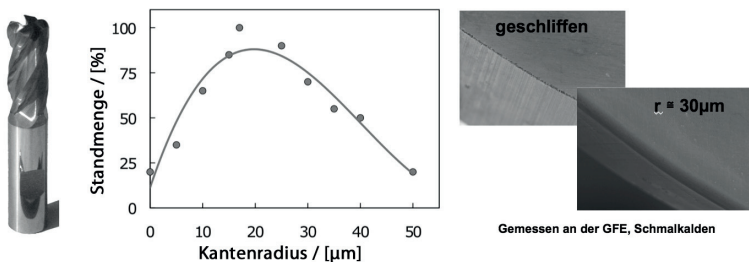


Abbildung 5: Einfluss der Kantenverrundung auf die Standmenge - VHM-Fräser
 $d=10\text{mm}$, $z=4$, $a_e=0.25 \times d$, $a_p=1.5 \times d$, $vc=150\text{ m/min}$, $fz=0.05\text{ mm/z}$
 Schicht: nACRo[®] - Werkstückmaterial: Kaltarbeitsstahl 1.2379

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Sehr deutlich ausgeprägt, die Zunahme der Standmenge gegenüber der unbehandelten, geschliffenen Schneide. Jedoch gibt es bei zu starker Verrundung einen Leistungsabfall. Der optimale Kantenradius in diesem Anwendungsfall liegt im Bereich von $R = 18 \pm 3 \mu\text{m}$.

Der ideale Bereich der Kantenverrundung ist nicht nur vom Anwendungsfall abhängig (Bohren, Fräsen, Drehen,...) sondern zum Beispiel auch vom Werkzeugdurchmesser und dem zu bearbeitenden Werkstückmaterial, wie folgende Abbildung für das Beispiel VHM-Bohrer zeigt:

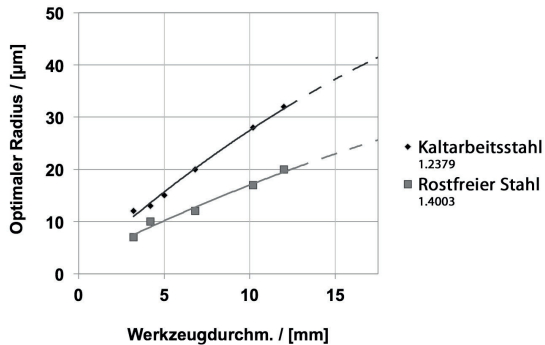


Abbildung 6: Einfluss Werkzeugdurchm. & Werkstückmaterial auf die optimale Kantenverrundung - VHM-Bohrer beschichtet mit $\text{nAlCo}^{\text{®}}$
Sackbohrungen – Kühlung: trockene Luft

4. BESTIMMUNG DER SCHNEIDKANTENGEOMETRIE

4.1 Messmethode

Bei der Entwicklung von Prozessen zur Schneidkantenpräparation ist die Bestimmung des Kantenradius bzw. die Bestimmung der Symmetrie der Verrundung ein sehr wichtiges Werkzeug. Abbildung 7 zeigt die optische Abbildung einer Schneidkantenengeometrie mittels GF Messtechnik und ein daraus resultierendes Profil über den Schneidkeil.

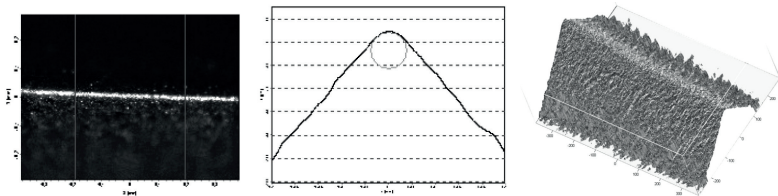


Abbildung 7: Optische Abbildung einer Schneidengeometrie

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Der Vorteil einer optischen gegenüber einer taktilen Abbildung der Schneidkanten geometrie besteht in der Vielzahl an Profilen, die mit einer einzigen optischen Messung aufgenommen werden können. Dadurch lassen sich Einzelprofile in Bereichen von Mikrodefekten auf der Schneide aus der Messung per Software rausnehmen, und über die verbliebenen Profile kann gemittelt werden.

Bei der Übertragung eines Prozesses zur Schneidenpräparation in die Produktion sowie bei der Qualitätsüberwachung der Schneidenverrundung stellen sich zwangsläufig Fragen hinsichtlich der Kantenradiusmessung. Im folgenden Kapitel einige Fragestellungen, die hinsichtlich Eindeutigkeit bei der Angabe von Schneidkantenverrundung betrachtet werden müssen.

4.2 Erwartungen an eine Norm zur Kantenverrundung

- Der Einfluss der Beschichtung auf den ermittelten Radius kann je nach Schichtdicke und Schneidkantenverrundung nicht unerheblich sein. Im Allgemeinen führt die Beschichtung tendenziell zu einer Erhöhung des Kantenradius gegenüber der unbeschichteten Schneide. Um diesen Einfluss zu umgehen sollte der Kantenradius im unbeschichteten Zustand ermittelt werden.
- Die Angabe der Kantenverrundung für einen Werkzeugtyp bedingt eine genaue Angabe der Messposition am Werkzeug. Beispielsweise wird die Verrundung an Stirn- und Umfangsschneide eines Schaftfräsers sehr wahrscheinlich unterschiedlich sein. Die Angabe der Verrundung sollte sich auf den Haupteinwirkort der Schneide beziehen, z.B. für einen Bohrer auf die Stirnschneide nahe einer Ecke.
- Bei unterschiedlichen Fitfunktionen kann ein unterschiedlicher Wert für den Radius ermittelt werden. Für den Idealfall $K=1$ ist die Situation noch relativ einfach (K-Faktorenmodell, siehe Abb. 8). Gerade beim Anfitzen des Kantenradius bei $K \neq 1$, also der Wasserfall- oder Trompetenform der Schneidkante, liefert das Fitten auf die maximale Krümmung ein anderes Ergebnis als ein Anfitzen auf den gesamten, im Eingriff befindlichen Bereich des Schneidkeils. Alternative Lösung für den Fall $K \neq 1$ wäre der Fit mit einer Ellipse.

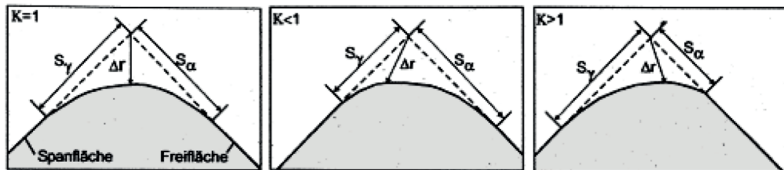


Abbildung 8: K-Faktorenmodell [Holsten 2009]

- Ungleich schwerer wird die Bestimmung des Kantenradius bei Formabweichungen, unabhängig davon ob der Schneidkeil taktil oder optisch abgebildet wurde. Bei sehr kleinen Radien ist die "Kreisform" der Schneide nicht unbedingt gegeben. Hilfreich bei der Messung von kleinen Radien wäre die Verfügbarkeit von Radiennormalen, auch im Radienbereich $<10\mu\text{m}$.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

- Das andere Extrem sind *Abflachungen der Schneide* im Falle sehr großer Radien (Abb. 9, links). Ebenso unklar ist, wie bei einer *sehr rauen Schneidoberfläche* (Abb. 9, mitte) der Kantenradius gefittet werden sollte.
- *Ausbrüche in der Schneide* (Abb. 9, rechts) verfälschen die Messung der Kantenverrundung. Idealerweise würde die Messung die Ausbrüche erkennen, die Anzahl und Größe der Ausbrüche angeben und diese Mikrodefekte systematisch von der Messung ausschließen.



Abbildung 9: links: Abflachung einer Schneidkante bei starker Verrundung
 mitte: Fit bei sehr "rauen" Schneidoberflächen
 rechts: REM-Aufnahme einer WSP-Schneide mit Mikrodefekt

5. FAZIT

- Es konnte gezeigt werden, wie die Spezialisierung bei der Werkzeugoptimierung hinsichtlich Hartstoffschicht und Schneidkantenpräparation einen Leistungsschub bewirken kann.
- Die optimale Schneidkantenverrundung ist je nach Anwendungsfall nicht nur vom Werkzeugtyp sondern auch z.B. vom Werkzeugdurchmesser und Werkstückmaterial abhängig.
- Bezüglich Messung der Schneidkantenradien wurden Fragestellungen betrachtet um bei Angaben der Kantenverrundung eindeutige Aussagen treffen zu können.

6. QUELLEN

- [Cselle 2009] Cselle, T.; Morstein, M.; Lümkmann, A.: "Der Anwendung angepasst"; In: *Werkstatt und Betrieb*; Hanser Verlag, München 2009
- [Cselle 2011] Cselle, T.: "Anpassung - Integration - Offenheit - Neue Regeln in der Beschichtungsindustrie "; In: *Werkzeug Technik*, Nr. 188; Februar 2011; ISSN Nr. 0997 - 6981
- [Holsten 2009] Holsten, S.: "Mikroprozesse an der Schneidkante"; In: *Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden*, S. 12-33; Kassel 2009; ISBN 978-3-89958-494-3
- [Morstein 2011] Morstein, M.: "Hochleistungszerspanung mit Nanokompositbeschichteten Werkzeugen"; Präsentiert am OTTI-Fachforum: *Neue Werkstoffe wirtschaftlich zerspanen*; Regensburg 2011

Kantenspezifikation durch Volumenelemente

Dipl.-Ing. Samuel Zind; Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Peter Dültgen

*Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe,
Berghauser Straße 62, 42859 Remscheid, Deutschland
zind@fgw.de*

Abstrakt: Schneidkanten von Messern und Sägezähnen weisen im Neuzustand selten die ideal geometrische Form eines Kreissegments auf. Vielmehr trifft man in der Praxis auf abweichende Konturen, mehr oder weniger regelmäßige Fasen und undefinierte Verläufe. Diese beobachteten Kantenformen werden derzeit meist über ein angenäherten Schneidkantenradius und den dazugehörigen K-Faktor beschrieben. Diese Methode wird den realen Schneidkantenformen in vielen Fällen jedoch nicht gerecht. In diesem Beitrag wird ein anderer Weg zur quantitativen Charakterisierung von Schneidkanten präsentiert. Hierbei wird die Schneidkante durch das fehlende Schneidkantenmaterial beschrieben und als Fehlvolumen definiert. Zur Vereinfachung kann für einen repräsentativen Querschnitt auch die Fehlfläche herangezogen werden.

1. AUSGANGSSITUATION

Die Schneidkante von Werkzeugen wird derzeit üblicherweise durch die Messung des Schneidkantenradius beurteilt [Denkena 2008]. Zur Charakterisierung der Schneidkantengeometrie werden außerdem die Form (Idealradius, Wasserfall, Trompete oder Fase) [Tikal 2006], die Fehlhöhe (Δr) und die Symmetrie über den K-Faktor [Denkena 2007] sowie die Rauigkeit der Schneidkante (Schartigkeit) [Weinert 2005] herangezogen.

Der Schneidkantenradius beschreibt sehr gut präparierte bzw. verrundete Schneidkanten von spanenden Werkzeugen. Mit dieser Kenngröße lässt sich eine Kante quantitativ sehr leicht beschreiben. Die einfache Nutzung des Radius als Kenngröße für eine Kante klingt verlockend, ist aber in einigen Fällen unzureichend.

Die Schneidkanten von einigen Werkzeugen, darunter Küchenmesser, Sägezähnen, Rasierklingen und technischen Messern, weisen nicht annähernd die geometrische Form eines Kreissegments auf. Im Ausgangszustand haben Messer mit einem Keilwinkel von 25° bis 35° meist einen Stumpf von 5 μm bis 10 μm (siehe Abbildung 1), der am besten durch die Stumpfbreite beschrieben wird [Landes 2006]. Bandsägezähne mit einem Keilwinkel von ca. 60° weisen nach dem Schleifen ebenfalls einen unregelmäßigen Stumpf auf. Weiter werden ausgebrochene Schneidkanten nur unvollständig vom Kennwert Schneidkantenradius beschrieben (siehe Abbildung 2).

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

In beiden Fällen ist der gemessene Radius problematisch, denn er bildet nicht genau die Realität ab. Auch die Nutzung von Hüll- und Pferchkreisen löst dieses Problem nicht genau (siehe Abbildung 1). Die Nutzung des Radius als Kenngröße für eine Kante ist als grobe Annäherung in vielen Fällen ausreichend. Doch um ein Schritt weiter zu gehen und die Mechanismen, die sich an der Kante ereignen, genau zu verstehen und zu erklären, reicht diese Größe nicht aus. Der Kantenradius als geometrische Größe genügt diesem höheren wissenschaftlichen Anspruch nicht, denn er bedarf einer genauen Interpretation unter Berücksichtigung von Symmetrie und Form. Somit wird die Handhabung von Kantenradien viel komplexer, als der erste Blick es vermag.

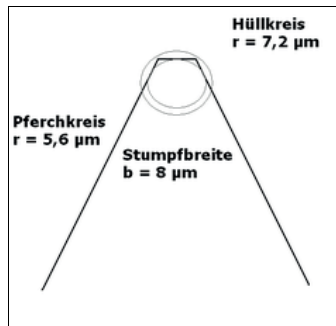


Abbildung 1: Querschnittskontur einer geschliffenen Messerklinge (Schneidenwinkel: 35° ; Stumpfbreite: $8\text{ }\mu\text{m}$)

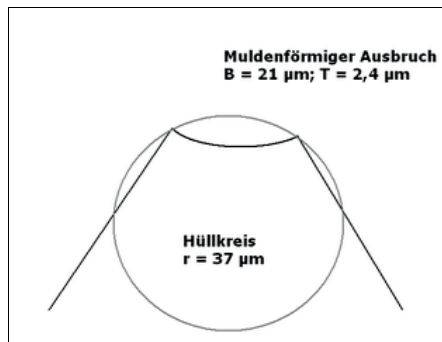


Abbildung 2: Querschnittskontur eines Bandsägezahns nach dem Einfahren mit Ausbruch (Schneidenwinkel: 60° ; Muldenbreite: $21\text{ }\mu\text{m}$; Muldentiefe: $2,4\text{ }\mu\text{m}$)

Der Schneidkantenradius ist somit von der Richtigkeit und von der Genauigkeit her nicht universell für alle Kanten verwendbar. Er bleibt in vielen Fällen der realen Schneidkantenform nicht gerecht, sein Einsatzgebiet bleibt auf

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

bereits verrundeten bzw. präparierten Werkzeuge beschränkt. Für eine genaue quantitative Spezifikation von Kanten und insbesondere von Schneidkanten bedarf es demnach einer anderen Größe, die unabhängig von der Kantenform genau ermittelbar ist und die Kante quantitativ beschreibt.

2. FEHLVOLUMEN UND FEHLFLÄCHE**2.1 Fehlvolumen**

Ein zu beschreitender Weg ist es, die Kante durch das fehlende Schneidkantenmaterial zu beschreiben. Das fehlende Material einer Kante ist das Volumen, das zwischen den weitergeführten Flächen der Flanken umschlossen wird. Für alle Kanten, die über kein überschüssiges Material verfügen (Grat), kann somit das Fehlvolumen definiert werden.

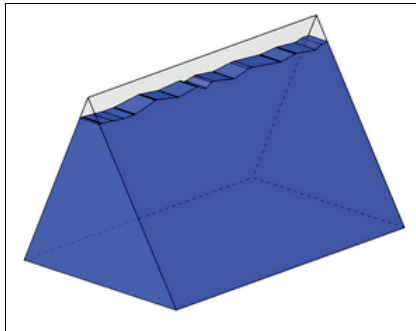


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Fehlvolumens eines geschliffenen Sägezahns (Schneidenwinkel: 60°; Stumpfbreite: ca. 10 μm)

Die Bestimmung des Fehlvolumens stößt derzeit auf Schwierigkeiten. Sie setzt eine 3D-Abbildung sowie eine 3D-Auswertung der Messerkante voraus. Die 3D-Auswertung wird jedoch von den auf dem Markt verfügbaren Messsystemen derzeit nicht angeboten. Auch durch zusätzlichen Aufwand ist es schwierig, das Fehlvolumen genau zu ermitteln.

2.2 Fehlfläche

Zur Vereinfachung kann an einem repräsentativen Querschnitt einer Kante orthogonal zur Schneidkante die Fehlfläche bestimmt werden. Die Fehlfläche ist die Differenz zwischen dem idealen Verlauf und dem realen Verlauf.

Die Messung der Fehlfläche wird zwar genauso wenig von derzeit verfügbaren Messsystemen angeboten, kann jedoch von messbaren 2D-Größen abgeleitet werden. Liegt eine charakteristische Kantenform vor, so kann aus gemessenen Größen, wie z.B. der Stumpfbreite, Fasenlänge, Fasenbreite

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

oder Fasenwinkel, die entsprechende Fehlfläche berechnet werden (siehe Abbildung 4).

			
Winkel: 30° Stumpfbreite: 10 µm Fehlfläche: 93 µm ²	Winkel: 60° Muldenbreite: 40 µm Muldentiefe: 10 µm Fehlfläche: 893 µm ²	Winkel: 30° Fasenwinkel: 10° Fasenlänge: 92 µm Fehlfläche: 1140 µm ²	Winkel: 90° Radius: 20 µm K-Faktor: 1 Fehlfläche: 86 µm ²

Abbildung 4: Fehlfläche von charakteristischen Kantenformen:

Links: Messerschneide; Mitte links: Sägezahn mit muldenförmiger Ausbruch; Mitte rechts: Messer mit Fase; rechts: verrundete Wendeschneidplatte

Die Formel 1 stellt beispielhaft die Berechnung der Fehlfläche eine Kante mit Stumpf dar. Die Berechnung der weiteren Kantenformen geschieht auf ähnlicher Weise mit Hilfe von Trigonometrischen Gleichungen.

$$F = \frac{B^2}{4 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (1)$$

B = Stumpfbreite [µm]
 α = Schneidenwinkel [°]
 F = Fehlfläche [µm²]

Die in Abbildung 4 dargestellten Beispiele zeigen ideale Formen, die selten in der Realität anzutreffen sind. Wenn reale Kantenformen solchen Referenzformen zugeordnet werden, kann jedoch die Fehlfläche nachträglich und indirekt mit guter Genauigkeit in Anlehnung an die Referenzformen berechnet werden. Damit ist eine kantenformunabhängige quantitative Größe definiert. Diese Methode setzt voraus, dass spezifische Maße der Kante ermittelbar sind. Bei rechtwinklig verrundeten Kanten können dafür die derzeit schon ermittelten Fehlängen von Span- und Freiflächen (s_a , s_f) herangezogen werden. Für Schneidkanten mit einem schärferen Schneidenwinkel müssen die spezifischen Maße einzeln gemessen werden. Dies setzt die Möglichkeit einer 2D-Analyse der Kantenquerschnitte voraus.

Bei nicht charakteristischen Kantenformen, dass heißt bei unregelmäßigen Kantenformen oder Kanten, die nicht mit geometrischen Körpern annähernd beschrieben werden können, ist es nicht möglich mit einfachen Gleichungen die Fehlfläche zu berechnen. Hier wäre eine automatische Auswertung durch Vergleich der Integration der Kantenfläche mit dem idealen Verlauf von Vorteil. Ein solches Tool ist derzeit kommerziell nicht erhältlich.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Eine umfassende Charakterisierung von Kanten mittels Fehlvolumen oder Fehlfläche sollte allerdings immer durch die eigentliche Kantenform (Stumpf, Wasserfall, Trompete, Fase) und ein Symmetriemerkmal, wie den K-Faktor, ergänzt werden.

3. ANWENDUNGSBEISPIELE

Am Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe wird seit einigen Jahren das Fehlvolumen bzw. die Fehlfläche von Werkzeugen und Schneidwaren für verschiedene Zwecke bestimmt. In diesem Abschnitt soll anhand eines Beispiels die Nutzung der Fehlfläche erläutert werden.

3.1 Bestimmung der Schneidfähigkeit von Messerklingen

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde festgestellt, dass Kochmesser, welche einen Feinabzug erhalten haben, oft eine geringere Schneidleistung aufweisen [Zind 2007a, Zind 2007b]. Der Feinabzug bei Messern kann wie einer Kantenpräparation verstanden werden. Abzug und Feinabzug von Küchenmessern geschehen heute noch immer überwiegend in Handarbeit. Bei genauerer Betrachtung der Schneidenkontur konnte festgestellt werden, dass feinabgezogene Messerschneiden eine mehr oder weniger gleichmäßige „Mikrofase“ an der Schneidkante aufweisen. Dieses Materialdefizit konnte durch die Fehlfläche quantifiziert werden. Es besteht ohne Zweifel einen Zusammenhang zwischen der erzielten Schneidleistung und der Fehlfläche wie es der folgenden Beispiel in Abbildung 5 dargestellt.

Die nicht präparierte Messerklinge mit einem Stumpf von $8\text{ }\mu\text{m}$ weist eine Fehlfläche von $56\text{ }\mu\text{m}^2$. Die feinabgezogene Klinge weist beidseitig eine Fase auf, die durch zusätzliches Abtragen von Material beim Feinabzug erreicht wurde. Die Berechnung ergibt hier eine Fehlfläche von $2880\text{ }\mu\text{m}^2$. Im Schneidleistungstest gemäß DIN EN ISO 8442-5 [DIN 2000] erzielten die beiden Klingen sehr unterschiedliche Ergebnisse. Während die feinabgezogene Klinge nur 20,3 mm Schneidfähigkeit und 59,3 mm Schneidleistung erreicht, erzielt die einfach abgezogene Klinge Werte von 39,7 mm bzw. 319,2 mm. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Schneidleistung umgekehrt proportional zur Fehlfläche sich verhält.

Es ist anzunehmen, dass solche Tendenzen auch bei anderen Werkzeugen festgestellt werden können. Mit der Nutzung von Kantenradien können solche Zusammenhänge zwischen Kantengestalt und Schneidleistung nur begrenzt hergestellt werden. Die generelle Verwendung der Fehlfläche in der Werkzeugforschung könnte neue Entwicklungen in puncto Kantenmikrogestalt entscheidend begünstigen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

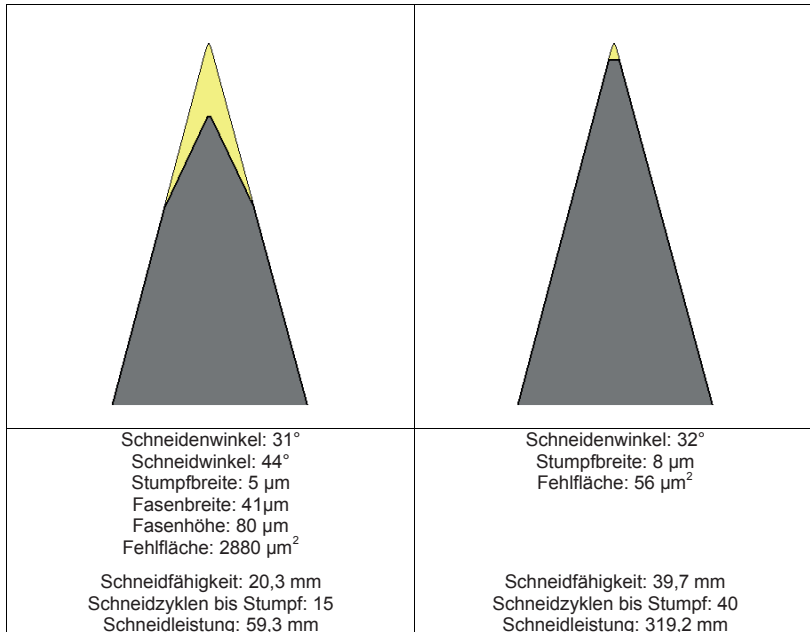


Abbildung 5: Querschnittkontur, Schneidenkenngrößen und Schneidleistung von Küchenmesserschneiden mit (links) und ohne Feinabzug (rechts)

3.2 Weitere Anwendung und Nutzen der Fehlfäche

Es ist davon auszugehen, dass die Verwendung der Fehlfäche als charakteristische quantitative Größe von Schneidkanten weiteren Nutzen bringt:

- Bei der Optimierung der Kantengestalt von Werkzeugen kann die Fehlfäche als beschreibende Größe einen quantitativen Vergleich von verschiedenen Kantenformen ermöglichen. Somit könnten erstmals der Einfluss der realen Mikrogestalt von Werkzeugschneidkanten quantitativ betrachtet werden.

- In der ganzen technischen Entwicklung war bisher die Definition eines „stumpfen“ Werkzeuges äußerst schwierig mit einer Größe zu quantifizieren. Derzeit behilft man sich mit eindimensionalen Verschleißmarken. Aber oft bestimmt der Anwender selbst, wann ein Werkzeug stumpf ist, z.B. wenn die Schnittqualität nicht mehr den Anforderungen entspricht. Würde das Fehlvolumen oder die Fehlfäche eines für stumpf bzw. nicht mehr schneidfähig deklarierten Werkzeuges bestimmt werden, so könnte der ermittelte Wert (maximale Fehlfäche) als Referenz und somit als Grenzwert dienen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

- Mit Hilfe der maximalen Fehlfläche einer Werkzeugschneidkante könnten Anwender eine quantitative Größe für den Zustand „stumpf“ definieren, welche die gesamte Schneidkante berücksichtigt. Im Rahmen einer Werkzeugüberwachung könnte somit der Zeitpunkt des Stumpfwerdens besser bestimmt werden und somit das Nachschärfen von teuren Werkzeugen wirtschaftlicher gestaltet werden.

- Somit kann die Fehlfläche auch als Maß für die verbleibende Schneidleistung eines gebrauchten Werkzeuges herangezogen werden.

- Ebenso kann die Fehlfläche und das Fehlvolumen für die quantitative Beschreibung von Verschleißhergängen an Werkzeugschneidkanten herangezogen werden.

4. ZUSAMMEFASSUNG UND AUSBLICK

Der Kantenradius als quantitative Kenngröße bildet in bestimmten Fällen (stumpfförmige Schneidkanten, Messerschneiden mit Mikrofasen, Kanten- ausbrüche, usw.) nur ungenau die reale Form von Schneidkanten ab. Zur quantitativen Spezifikation von Schneidkanten ist deshalb eine neue universelle Größe erforderlich.

Mit dem Fehlvolumen und der Fehlfläche werden zwei Merkmale definiert, welche eine Kante exakt, kantenformunabhängig (universell) und doch konturtreu spezifiziert. Beide Kenngrößen werden jedoch derzeit von keinem kommerziell verfügbaren Messsystem ermittelt. Ihre Bestimmung ist nur mit zusätzlichem Aufwand möglich. Die Fehlfläche als vereinfachte Form des Fehlvolumens kann nach der Messung formspezifischer geometrischer Kantengrößen berechnet werden.

Am Beispiel von Küchenmesserklingen wurde gezeigt, dass sowohl die Schneidfähigkeit als auch die Schneidleistung sich umgekehrt proportional zur Fehlfläche verhalten. Die Fehlfläche könnte auch für andere Werkzeuge als Maß für die Schneidleistung fungieren.

Fehlvolumen und Fehlfläche bieten weiter die Möglichkeit, den Verschleißhergang an Werkzeugschneidkanten zu überwachen und somit das Verschleißverhalten der Werkzeuge quantitativ zu verfolgen.

Die Fehlfläche könnte bei der Werkzeugüberwachung als zweidimensionale Größe die eindimensionalen Verschleißmarken sinnvoll ergänzen. Das genauere Bestimmen des Zeitpunkts des Stumpfwerdens könnte eine wirtschaftlichere Gestaltung des Nachschärfens von Werkzeugen erlauben.

Die maximale Fehlfläche wird als Fehlfläche eines nicht mehr schneidfähigen Werkzeugs definiert. Sie könnte als quantitative Größen oder als Grenzwert für die Definition des „stumpfen“ Zustands eines Werkzeuges herangezogen werden.

Bei der Optimierung der Kantengestalt von Werkzeugen ermöglicht die Fehlfläche einen quantitativen Vergleich von verschiedenen Kantenformen. Somit könnten erstmals der Einfluss der realen Mikrogestalt von Werkzeugschneidkante quantitativ betrachtet werden.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Die Spezifikation von Schneidkanten mittels Fehlvolumen und Fehlfläche birgt ein großes Potential für die Werkzeugforschung, da sich daraus Rückschlüsse auf das Leistungsverhalten ziehen lassen. Deshalb sollte in Zukunft die Nutzung von Fehlvolumen und Fehlfläche vorangetrieben werden. Die Werkzeugforschung benötigt dazu Kantenmesssysteme, welche automatisch Fehlvolumen und Fehlfläche ermitteln, insbesondere für komplexe und unregelmäßige Kantenformen.

5. QUELLEN

- [Denkena 2007]** Denkena, B.; Kramer, N.; Siegel, F.; Kästner, J.: "Leistungsoptimierung an der Schneidkante"; In: *VDI-Zeitschrift*, S. 24-26, (2007); ISSN 0931-864X
- [DIN 2000]** N.N.: DIN EN ISO 8442 „Werkstoffe und Gegenstände in Kontakt mit Lebensmitteln – Schneidwaren und Tafelgeräte - Teil 5: Festlegung der Schneidfähigkeit und Prüfung der Kantenbeständigkeit“, April 2004
- [Landes 2006]** Landes, R.: "Messerklingen und Stahl – Technologische Betrachtung von Messerschneiden"; S. 30-31, 2. Auflage, Bruckmühl 2006 ISBN 978-3-938711-04-0
- [Tikal 2006]** Tikal, F.; Holsten, S.: "Neue Anforderungen erfordern neue Werkzeuge"; In: *VDI-Zeitschrift*, S. 44-46, 148 (2006) 3, ISSN 0931-864X
- [Weinert 2005]** Weinert, K.; Kötter, D.: "5-achsiges Strahlen optimiert die Schneide"; In: *WB - Werkstatt und Betrieb*, S. 56-59, 138 (2005) 12, ISSN 0043-2792
- [Weinert 2007]** Weinert, K.; Terwey, I.: "Schneidkantenpräparation - Bestimmung der Schneidkantengestalt"; In: *Industrie Diamant Rundschau*, S. 62-63, 42 (2007) 1, ISSN 0935-1469
- [Zind 2007a]** Zind, S.; Weiser, M.: "Prozessnahe Qualitätskontrolle von Messerwaten durch Messung und Beurteilung von Watenschliff Fehlern" Forschungsbericht: IGF 14375 BG (2007)
- [Zind 2007b]** Zind, S.; Dültgen, P.; Weiser, M.: "Messerschneide genau betrachtet" in *Büchsenmacher Messer und Schere*, S. 32-33, 112 (2008) 03, ISSN 0007-3067

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

- Schneidkantencharakterisierung -**Anforderungen und Erfahrungen aus Sicht einer
Werkzeugforschungseinrichtung****Heinz-Wolfgang Lahmann, Petra Preiß***GFE-Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V.**Näherstiller Straße 10, 98574 Schmalkalden**info@gfe-net.de*

Abstrakt: Nach einer Einleitung wird zu Beginn des Beitrages auf die Bedeutung einer definierten Schneidkantenverrundung für den Einsatz von Zerspanwerkzeugen eingegangen und es werden Kantenpräparationsverfahren, die sowohl in der Forschung und Entwicklung als auch in der Industrie für die definierte Behandlung der Schneidkantengeometrie an Werkzeugen zum Einsatz kommen, präsentiert. Darstellungen zu Anforderungen, die sich daraus auch für die messtechnische Erfassung von Schneidkantenradius, Schneidkantenform und Schneidkanten-schartigkeit ergeben, schließen sich an. Die für die optische Erfassung der genannten Schneidkantenkenngrößen eingesetzten Messprinzipien in der GFE werden nachfolgend im Einzelnen kurz vorgestellt. Bei den zur Anwendung kommenden Prinzipien handelt es sich vorzugsweise um die Streifenprojektion, die Focus-Variation und die Weißlichtinterferometrie. Die während des Einsatzes gewonnenen Erfahrungen mit den auf den verschiedenen Prinzipien beruhenden Messsystemen werden anschließend näher beschrieben. Hierbei wird insbesondere auf die Bedeutung der Positionierung der Prüflinge und den Einfluss der Reflexionseigenschaften des zu erfassenden Schneidkantenbereiches eingegangen. Eine Zusammenfassung bildet den Abschluss des Beitrages.

1. EINLEITUNG

Die Bedeutung des Einflusses der Schneidkantengeometrie auf die Leistungssteigerung von Zerspanwerkzeugen ist unumstritten. Die Makro- und Mikrogeometrie der Schneidkante wirken sich in Abhängigkeit der Prozessparameter u.a. auf die Spanbildung, den Spanablauf, die erzielbare Oberflächenqualität auf dem Werkstück und auf das Verschleißverhalten des Werkzeuges aus. Auch im Zusammenhang mit der Hartstoffbeschichtung ist die Ausprägung der Mikrogeometrie der Schneide in Bezug zur Schichthaftung und den Eigenspannungen von besonderer Bedeutung. Die Herausforderungen zur Bearbeitungen neuer, zumeist schwer zerspanbarer Werkstoffe haben dazu geführt, dass der Makro- und insbesondere auch der Mikrogeometrie der Werkzeugschneiden besondere Aufmerksamkeit in den letzten 10 Jahren gewidmet worden ist. Um eine definierte Schneidenmikrogeometrie an Zerspanwerkzeugen erhalten zu können, haben sich in den letzten Jahren verschiedene Kantenpräparationsverfahren sowohl in der Forschung und Entwicklung als auch in der Industrie etabliert. Hierbei sind u.a. die Verfahren Mikrostrahlen, Bürstpolieren, Magnetfinish, Schleppschleifen und Flakktieren zu nennen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Zur Bewertung der mit den Kantenpräparationsverfahren erzielten Ergebnisse ist es notwendig, die Mikrogeometrie messtechnisch mit möglichst hoher Genauigkeit zu erfassen. Aufgrund dieser Forderungen wurden im vergangenen Jahrzehnt umfangreiche Anstrengungen auf dem Gebiet der optischen Messtechnik zur Charakterisierung der Schneidenmikrogeometrie unternommen. Auf der Basis verschiedener Messprinzipien wurden Lösungen bzw. Messgeräte entwickelt, mit denen eine relativ schnelle 3-D-Erfassung der Schneidkantenmikrogeometrie möglich ist. Ausgehend von den Anforderungen aus Industrie und Forschung konnten in den letzten Jahren umfangreiche Erfahrungen gesammelt werden, die zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Systeme und Geräte für die Schneidkantenmessung geführt haben, so dass man heute auf eine recht gute Basis zugreifen kann.

2. KENNGRÖSSEN DER SCHNEIDMIKROGEOMETRIE UND VERFAHREN ZUR KANTENPRÄPARATION

An dieser Stelle soll als erstes auf die Relevanz optimaler Schneidenmikrogeometrien an Zerspanswerkzeugen eingegangen werden. Die Mikrogeometrieausprägungen an den Werkzeugschneiden gewinnen im Hinblick auf die Bearbeitung von unterschiedlichsten Werkstoffen wie gehärteten Stahl, Titan, GFK / CFK usw. in der modernen Zerspantechnik immer mehr an Bedeutung. Sowohl in Forschungseinrichtungen als auch bei Werkzeugherstellern wurden in der jüngsten Vergangenheit weitreichende Anstrengungen unternommen, um ein optimal auf den Bearbeitungsfall abgestimmtes Regime zwischen Schneidenpräparation und Bearbeitungsergebnis zu erreichen und somit Produktivitätsgewinne im Zerspanprozess zu erreichen.

2.1 Kenngrößen der Schneidenmikrogeometrie

Die grundsätzlichen Kenngrößen der Schneidenmikrogeometrie (Schneidkantenradius, Schneidkantenformen und Schneidkantenschartigkeit) an einem Präzisionswerkzeug zeigt Abbildung 1:

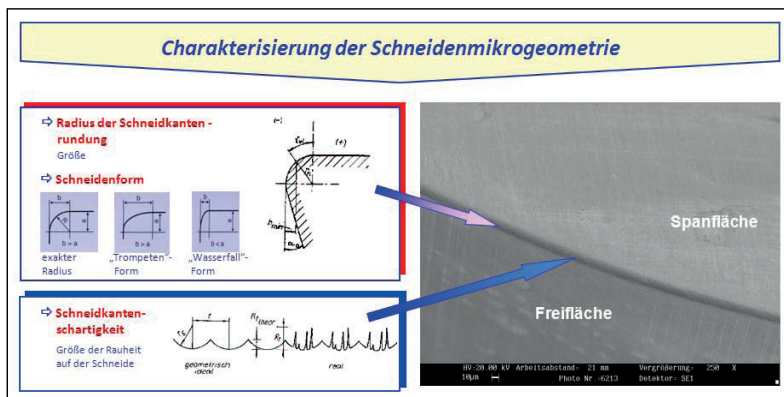


Abbildung 1: Charakterisierung der Schneidenmikrogeometrie eines Präzisionswerkzeuges

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

2.2 Generierung optimaler Schneidenmikrogeometrien durch Kantenpräparationsverfahren – ein iterativer Prozess

Gegenstand umfangreicher Untersuchungen sowohl in der Industrie als auch in Forschungseinrichtungen war bzw. ist es, eine gleichmäßige Verrundung entlang der gesamten Schneide zu erreichen. Die dafür zum Einsatz kommenden Kantenpräparationsverfahren wie beispielsweise Bürstpolieren, Strahlen, Magnetfinishbearbeitung oder das so genannte Schleppschleifen müssen diesem durch die Erarbeitung des jeweiligen Bearbeitungsregimes Rechnung tragen. Im Ergebnis wird eine Verbesserung des Ausgangszustandes nach dem Schleifen (Verringerung der Schneidenschartigkeit und damit Stabilisierung der Schneide) erreicht, was wiederum wesentliche Vorteile in Bezug auf das Standzeitverhalten bzw. den Standweg der Werkzeuge bedeutet. Letzteres ist ein wesentliches Kriterium für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Bearbeitungsprozesse. In Abbildung 2 ist eine Auswahl technischer Möglichkeiten dargestellt, wie eine auf den Bearbeitungsfall zugeschnittene Schneidenmikrogeometrie erreicht werden kann. Die den Prozess bestimmenden Parameter, in deren optimaler Abstimmung aufeinander eine gezielte Schneidkantenpräparation erreicht werden kann, sind dabei jeweils für die einzelnen Technologien mit angegeben.

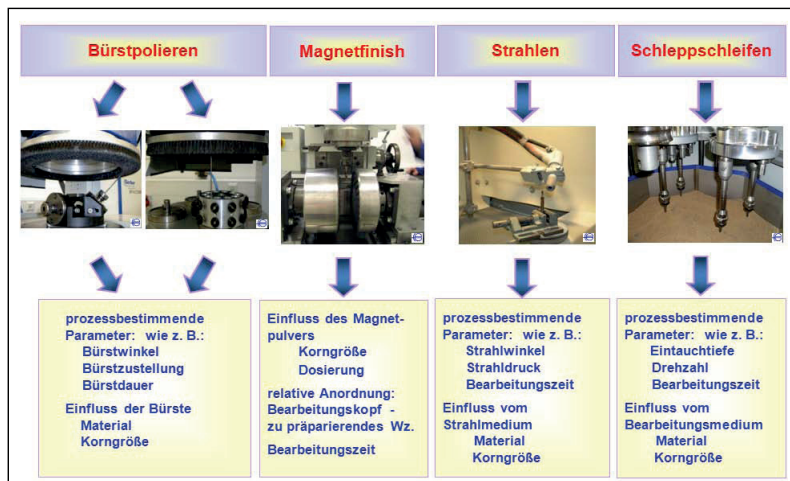


Abbildung 2: Möglichkeiten zur Erzeugung von Schneidenmikrogeometrien an Präzisionswerkzeugen (Auswahl GFE)

In Bezug auf die Vorgehensweise, wie man zu optimalen und auf den jeweiligen Bearbeitungsfall „zugeschnittenen“ Schneidenmikrogeometrien gelangt, ist festzuhalten, dass es sich dabei um einen so genannten „iterativen Prozess“ handelt, bei dem die messtechnische Erfassung und Analyse der nach jedem Arbeitsschritt erhaltenen Schneidenmikrogeometrie eine wichtige Rolle spielt und gleichzeitig wiederum den Ausgangspunkt für den nächsten technologischen Schritt darstellt.

In Abbildung 3 ist beispielhaft ein solcher iterativer Prozess dargestellt.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



Abbildung 3: Iterativer Prozess zur Erreichung optimaler Schneidenmikrogeometrien

Im Hinblick auf die nachfolgenden Darstellungen zur optischen Erfassung der Schneidenmikrogeometrie-Kenngrößen sollen an dieser Stelle beispielhaft einige Bearbeitungszustände, die mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) aufgenommen wurden, bildhaft dargestellt werden:

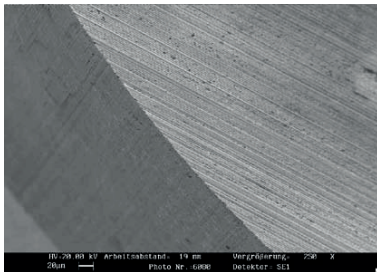


Abbildung 4: Schneide eines Torusfräasers im Ausgangszustand (geschliffen)

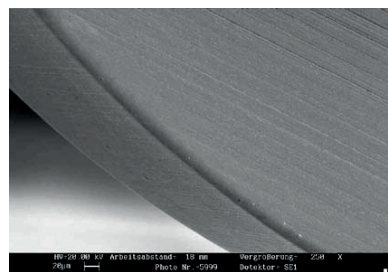


Abbildung 5: Schneide eines Torusfräasers nach dem Bürstpolieren

2.3 Schneidenmikrogeometrien vor und nach der Beschichtung

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Untersuchung des Zusammenhangs zur Schneidenmikrogeometrie vor und nach dem Beschichten von Hartstoffschichten. Hinzu kommt als interessanter Untersuchungsgegenstand die Schneidkante nach einer entsprechend gestalteten Schichtnachbehandlung, die ebenfalls mit den bereits erläuterten Verfahren erfolgen kann.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

3. ANFORDERUNGEN AN DIE OPTISCHE MESSTECHNIK ZUR SCHNEID-KANTENCHARAKTERISIERUNG

Ausgehend von den umfangreichen Arbeiten in den vergangenen Jahren auf dem Gebiet der Schneidkantenpräparation und der damit verbundenen messtechnischen Erfassung und Bewertung der mit den zuvor dargestellten Präparationsverfahren erzielten Schneidkantengeometrien haben sich aus Sicht der GFE vor allem die nachfolgend dargestellten Anforderungen an die optische Messtechnik zur Schneidkantencharakterisierung herauskristallisiert.

- Der Arbeitsabstand zwischen dem zu erfassenden Schneidkantenbereich und dem Sensor (zumeist eine CCD-Kamera) sollte möglichst im cm-Bereich liegen. Dadurch kann zumeist ein ausreichender Raum für die Positionierung des Werkzeuges auf dem Messgerät erreicht werden.
- Um Schneidkantenradien bis zu einem unteren Wert von 3 μm sicher erfassen zu können, ist eine laterale und vertikale Auflösung des optischen Systems im Sub-Mikrometerbereich notwendig.
- Schwankungen der Reflexionseigenschaften des zu bewertenden Schneidkantenbereiches sollten in möglichen Grenzen von dem optischen Messsystem „tolerierbar“ sein. Eine adaptive und automatische Einstellung der Beleuchtungsintensität in Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften der zu erfassenden Objektoberfläche ist wünschenswert.
- Die Mess- und Auswertezeit sollte bei wenigen Sekunden liegen, um insbesondere auch bei der fertigungsbegleitenden messtechnischen Schneidkantenprüfung wirtschaftlich arbeiten zu können.
- Um sich auf unterschiedliche geometrische Größenverhältnisse der zu erfassenden Schneidkantenbereiche möglichst optimal anpassen zu können, ist es sinnvoll, die Vergrößerung des optischen Messsystems in bestimmten Grenzen zu variieren. Die Erfassung steiler Kantenbereiche ist hierbei ebenfalls von relevanter Bedeutung.
- Hilfsfunktionen bei der manuellen Positionierung des Zerspanwerkzeugs zur korrekten Einstellung des zu erfassenden Kantenbereichs gegenüber dem Sensor sind als hilfreich anzusehen.
- Der Einsatz von Überprüfungsrouitinen zur Bestimmung der Messunsicherheit des optischen Messsystems mit angepassten Kalibrierungsnormen ist vorteilhaft.

4. EINGESETZTE OPTISCHE MESSPRINZIPIEN ZUR ERFASSUNG DER SCHNEIDKANTENMIKROGEOMETRIE IN DER GFE

Bezug nehmend auf die zuvor dargestellten Anforderungen an die optische Messtechnik werden in der GFE gegenwärtig drei verschiedene optische Messprinzipien zur Erfassung der Schneidkantenmikrogeometrie genutzt. Ein erstes Prinzip beruht auf der Projektion von Streifenmustern auf dem zu messenden Schneidkantenbereich. Mittels einer CCD-Kamera werden die projizierten Streifen auf dem Objektbereich (Abb. 6) unter einem bestimmten Winkel zum Projektor aufgenommen. Basierend auf dem Triangulationsgesetz lassen sich anhand der mit der Kamera aufgenommenen Streifenbilder 3-D-Informationen des Objektbereichs gewinnen. In Abb. 7 ist ein Gerät (GF Messtechnik), welches auf der Basis der Streifenlichts arbeitet, abgebildet.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

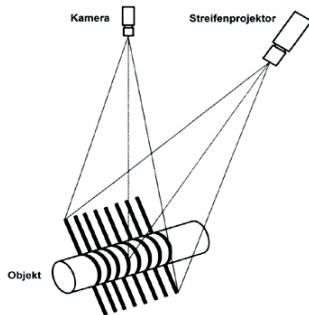


Abbildung 6: Streifenprojektion
Quelle: Breuckmann



Abbildung 7: Messgerät MikroCAD

Durch eine zusätzliche Phasenverschiebung der Streifen ist das Verfahren 10- bis 50-mal genauer als die einfache Triangulation. Die Erfassung der Bilddaten für die verschiedenen Streifenpositionen (Phasen) geht relativ schnell, so dass Messzeiten von wenigen Sekunden erreicht werden [FRA].

Ein zweites zum Einsatz kommendes Prinzip basiert auf der so genannten Fokus-Variation (Abb. 8). Bei diesem Prinzip wird die geringe Schärfentiefe der Optik bei hoher Vergrößerung genutzt, um Tiefeninformationen (3-D-Informationen) von der Objektoberfläche zu gewinnen. Dabei wird der Abstand zwischen Objekt und Sensor schrittweise oder kontinuierlich verändert und die jeweils auf dem Sensor scharf abgebildeten Objektbereiche zu einem 3-D-Bild zusammengesetzt. In dem Messgerät InfinteFocus (Alicona) ist das beschriebene Messprinzip [DAN] umgesetzt (Abb.9).

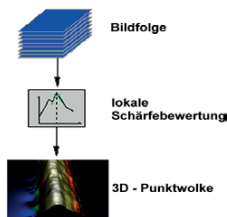


Abbildung 8: Prinzip Fokus-Variation



Abbildung 9: Messgerät InfinteFocus

Ein drittes in der GFE angewandtes Prinzip basiert auf der Weißlichtinterferometrie (Abb. 10, 11). Bei diesem Prinzip nutzt man die geringe Kohärenzlänge von wenigen Mikrometern einer Weißlichtquelle. Die von der Lichtquelle ausgehende Strahlung wird in zwei zueinander senkrechte Strahlen aufgespalten. Der eine Strahl (Referenzstrahl) trifft auf einen festen Spiegel und der andere Strahl auf das zu erfassende Objekt. Beide Strahlen werden zurück reflektiert und nach Durchgang bzw. Reflexion an dem halbdurchlässigen Strahlteiler zusammengeführt. Aufgrund der unterschiedlich zurückgelegten Weglängen der Strahlen kommt es zu Interferenzen, die auf dem Sensor über eine Optik abgebildet werden. Bedingt durch die geringe Kohärenzlänge des weißen Lichts entsteht ein so genanntes Korrelogramm. Wenn die zurückgelegten Wege der beiden Strahlen gleich sind, so entsteht

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien
 die maximale Amplitude. Über die Ermittlung des Maximums der Amplitude in Abhängigkeit der Scanposition erhält man die Z-Position (Höheninformation).

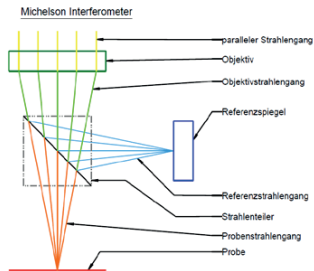


Abbildung 10: Interferometer-Messprinzip

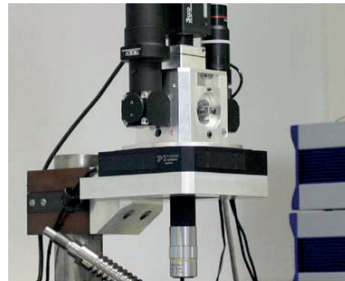


Abbildung 11: Weißlichtinterferometer

Messsysteme, die auf den drei erläuterten Messprinzipien beruhen, werden in der GFE für die Vermessung des Schneidkantenradius wie auch für die Ermittlung der Schneidkantenform und der Schneidkantenschartigkeit eingesetzt. Welches Gerät jeweils zur Anwendung kommt, hängt von der konkreten Aufgabenstellung und der spezifischen Reflexionseigenschaften der Zerspanwerkzeuge ab. Hierbei werden die messprinzipbedingten Vorteile der einzelnen Geräte weitestgehend optimal ausgenutzt.

5. GEWONNENE ERFAHRUNGEN BEI DER CHARAKTERISIERUNG DER SCHNEIDKANTENGEOMETRIE

Die gewonnenen Erfahrungen der GFE basieren auf einer umfangreichen Anzahl von Messungen an Schneidkanten verschiedenster Werkzeugtypen, die in den letzten Jahren im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten durchgeführt wurden. Als eine der ersten und oft nicht einfachen Aufgabe steht die Positionierung des Zerspanwerkzeugs. Diese muss so erfolgen, dass der interessierende Schneidkantenbereich mit dem optischen Erfassungssystem möglichst optimal aufgenommen werden kann. Dazu wurde eine spezielle Vorrichtung entwickelt und gebaut, die eine günstige Handhabung bei der Positionierung des Werkzeuges auf dem optischen Messsystem gestattet. In den Abbildungen 12 - 14 ist die Positioniervorrichtung mit der Werkzeugaufnahme für rotationssymmetrische Werkzeuge zu sehen. Sie ermöglicht definierte und arretierbare Positionseinstellungen in drei Achsen.



Abbildungen 12-14:
Positioniervorrichtung



Schwenkelement der
Vorrichtung



Vorrichtung mit
Werkzeug

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die nachfolgend aufgeführten Punkte besondere Berücksichtigung finden müssen:

- Die optische Vergrößerung ist so auszuwählen, dass auf dem Sensor der zu erfassende Schneidkantenbereich weitestgehend bildfüllend abgebildet wird. Dadurch kann eine bildpunktmäßige Auflösung auf den Sensor erreicht werden, der es ermöglicht Schneidkantenradien bis zu wenigen Mikrometern zu messen.
- Fremdlicht und Schwingungen, die die Messungen beeinflussen können, sind unbedingt zu vermeiden.
- Die Beleuchtung muss an die Reflexionseigenschaften des Schneidkantenbereiches so angepasst sein, dass es zu keiner Über- oder Unterbelichtung auf dem Sensor kommt. Die zu erfassende Schneidkante und die beiden Schneidflankenbereiche sollten weitestgehend homogen ausgeleuchtet sein (Abbildungen 15, 16), so dass die Wertigkeit (Güte) der mit dem Sensor aufgenommenen Bilddaten gleich ist. Das ist eine wesentliche Voraussetzung, dass die anschließende Berechnung auch die realen Geometrieverhältnisse wiedergibt.

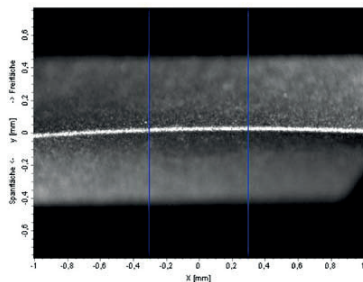


Abbildung 15: homogene Ausleuchtung

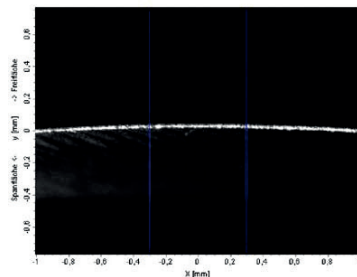


Abbildung 16: einseitige Ausleuchtung

6. ZUSAMMENFASSUNG

In den vergangenen Jahren wurden umfangreiche Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der optischen Schneidkantencharakterisierung durchgeführt. Die erreichte Anwendungsbreite in der Werkzeugindustrie und auch darüber hinaus zeigt, dass die entwickelte Messtechnik, basierend auf den genannten Messprinzipien, sich erfolgreich auf dem Markt platzieren konnte. Die aktuellen und zukünftigen Anforderungen wie auch die beim Einsatz dieser Messtechnik gewonnenen Erfahrungen werden dazu beitragen, dass die Entwicklungen weiter voran getrieben werden. An die untere Grenze (Radien im Sub-Mikrometerbereich), die durch den Einsatz von sichtbarem Licht gegeben sind, wird man sich zukünftig weiter annähern.

7. QUELLEN

[FRA 2009]; Frankowski, G., Hainich, R.; "DLP-Based 3D Metrology by Structured Light or Projected Fringe Technology for Life Sciences and Industrial Metrology", Proc. SPIE Photonics West, 2009

[DAN 2009], „Focus Variation- A New Technology For High Resolution Optical 3D Surface Metrology“, The 10th International Conference of Slovenian for Non-Destructive Testing, September 1-3, 2009, Ljubljana, Slovenia

Radiusbemaßung und -messung von Wälzlagern

Radius dimensioning and radius measurement of roller bearings

Dipl. Ing. Ernst Ammon, Herzogenaurach

Kurzfassung

Die Bemaßung von Radien führt immer wieder zu Diskussionen, weil sie unter bestimmten Bedingungen nur mit einer sehr großen Messunsicherheit bestimmbar ist. Insbesondere wenn die Radiustoleranz und der Ausschnittswinkel gering sind, kann die Messunsicherheit ein Vielfaches der Toleranz betragen. Deshalb wurde in der Schaeffler Gruppe ein messtechnischer Standard geschaffen, der das maßliche Prüfen solcher Radien durch eine Formmessung ersetzt.

Die Darstellung der messtechnischen Vorgaben stellt eine Ergänzung zu den internationalen Normen dar.

1. Anwendung bei Kugellagern

Kugellager sind Wälzlager, die in vielen Produkten eingesetzt werden. Für Standardkugellager sind die Maß-, Form- und Lagetoleranzen in der DIN 620 definiert. Sind besondere Anforderungen erwünscht, müssen diese Maß-, Form- und Lagetoleranzen geändert werden.

In den Normen sind nicht die Form- und Lageabweichungen der Rillenkontur festgelegt, deshalb muss diese je nach Anforderung noch exakt beschrieben werden. Um eine weltweit einheitliche Qualität zu erreichen, mussten firmeneigene Standards geschaffen werden.

2. Zeichnungsangaben für Radien

In der Normung ist der Radius nur als Nennmaß mit Toleranzangabe definiert.

Dies reicht bei vielen Anwendungen nicht mehr aus. Oft gibt es dann zwischen Kunden und Lieferanten Diskussionen über die Bewertung der Radien.

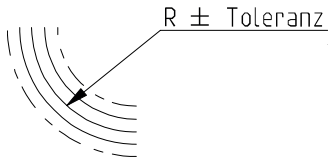


Bild 1: Radiusangabe

Aufgrund dieser Probleme sind einige Kunden dazu übergegangen, den Radius als Maß und mit einer Formabweichung zu definieren. Dies hat zur Folge, dass man zwei Bewertungsmöglichkeiten hat: einen Radius für Gut oder Ausschuss (siehe Bild 3).

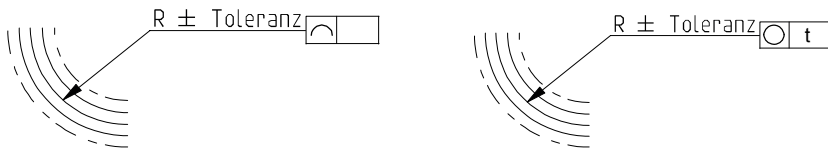


Bild 2: Radiusangabe mit Formabweichung

In Bild 3 wird ersichtlich, dass sowohl der Radius als auch die Formabweichung als Toleranz variiert werden können. Hier gibt es mehrere Möglichkeiten und keine eindeutige Aussage.

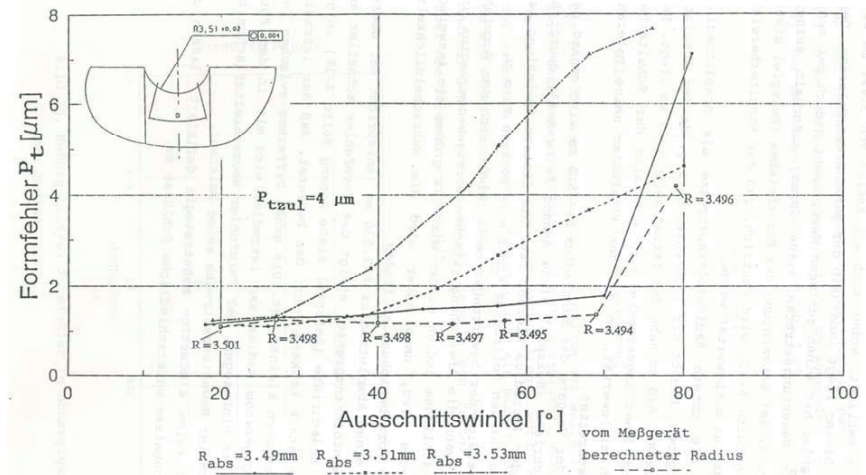


Bild 3: Radiusabweichung [1]

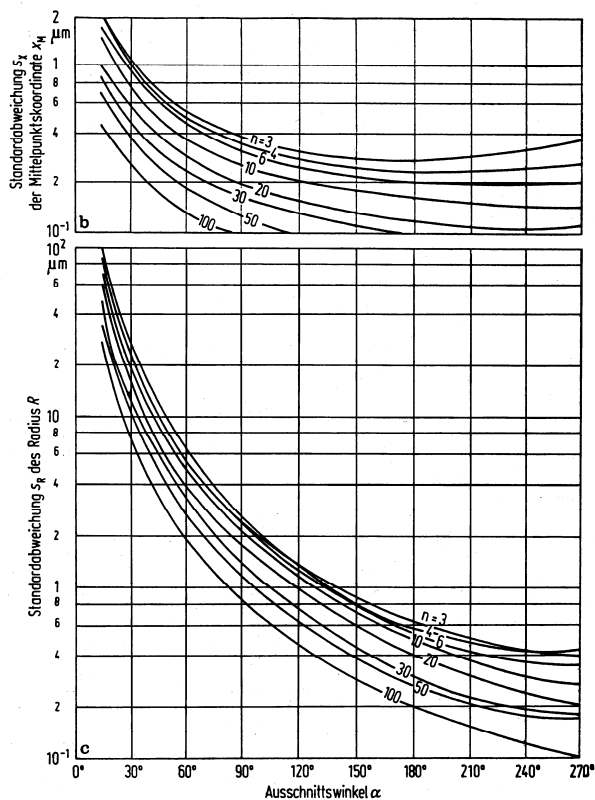


Bild 4: Standardabweichung des Radius und der Mittelpunktskoordinaten in Abhängigkeit des Ausschnittswinkels [4]

In Wälzlagerbereichen werden oft Radien gemessen, die in einem Ausschnittswinkel von kleiner 30° liegen und sehr genau sein müssen. Wie aus Bild 4 ersichtlich ist, ergibt sich für diese Fälle eine verstärkte Messunsicherheit.

3. Eindeutige Zeichnungsangaben für Radien

In der Zeichnung wird der Radius als eine theoretische Größe eingetragen.

Bezogen auf die theoretischen Sollgrößen des Radius wird entsprechend DIN 4760

t1 nach der Formabweichung 1. und höherer Ordnung und t2 nach der Formabweichung 2. und höherer Ordnung beschrieben.

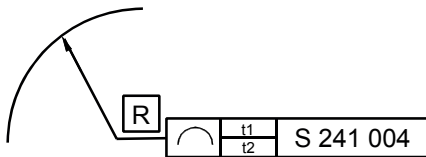
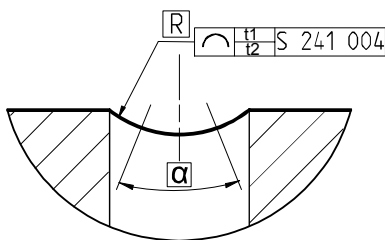


Bild 5: Radiusabweichung

In der Zeichnung muss immer die Auswertelänge (in Bild 6 als Winkelangabe α) angegeben werden. Nur so kann eindeutig ausgewertet werden und die Messaufzeichnungen können immer miteinander verglichen werden.



222

Bild 6: Zeichnungsangabe

4. Berechnung der Formabweichung 1. und höherer Ordnung

Die Formabweichung 1. Ordnung wird mit Hilfe des Cosinussatzes berechnet.

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos \alpha$$

Die Formabweichung 2. und höherer Ordnung muss vom Konstrukteur vorgegeben werden.

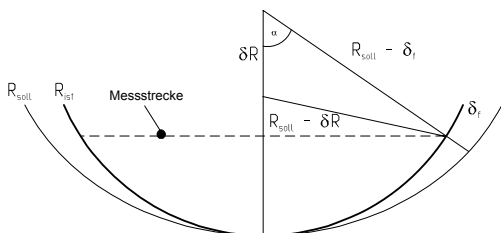


Bild 7: Berechnung der Formabweichung 1.Ordnung

Die Berechnung der Formabweichung 1. Ordnung (f) wird nach der unten aufgeführten Formel durchgeführt.

$$f = R - R_{Tol} \cdot \cos \alpha - \sqrt{(R^2 + R_{Tol}^2 \cdot \cos(\alpha)^2 - 2 \cdot R \cdot R_{Tol})}$$

R = Radius

R_{Tol} = Radiustoleranz

α = Winkel, der vom Radius eingeschlossen wird (Ausschnittswinkel)

5. Messung und Auswertung

Zuerst wird die Kontur erfasst. Die Auswertung vollzieht sich dann in drei Schritten:

1) Auswertung der 1. Ordnung mit höheren Ordnungen

Das erfasste Profil wird mit dem SOLL-Profil des Kreisbogenabschnittes verglichen.

Bei der Auswertung mit Konturmessgeräten erfolgt der Vergleich am abgewickelten Profil.

Als Maß des Formunterschiedes wird hier der Pt- Wert herangezogen.

Bei Koordinatenmessgeräten (KMG) wird in das erfasste Profil der SOLL-Radius eingepasst und der größte Unterschied von SOLL- und IST-Kontur bestimmt.

2) Auswertung der 2. Ordnung mit höheren Ordnungen

Hier wird die tatsächliche Kreisformabweichung bestimmt. Bei der Auswertung mit Konturmessgeräten wird hierbei zunächst der Ausgleichsradius bestimmt und am abgewickelten Profil die größte Formabweichung zum Ausgleichselement berechnet.

Als Maß wird hier ebenfalls der Pt- Wert herangezogen.

Bei KMG wird die Formabweichung 2. und höherer Ordnung als direkte Rundheitsmessung bestimmt.

3) Bestimmung der Differenz zwischen 1. und 2. Ordnung

Die Differenz zwischen den im Schritt 1 und 2 ermittelten Werten wird gebildet und mit der Differenz der Toleranzen t1 und t2 verglichen. Die errechnete Differenz darf in keinem Fall die Differenz t1-t2 übersteigen.

Die Auswertung für t1 erfolgt mit dem SOLL-Radius, die für t2 mit dem IST-Radius, wobei der in Abschnitt 7 beschriebene Zusammenhang hergestellt werden muss.

6. Auswertung der Messwerte

Bild 8 stellt eine Gerade dar, bei der IST-Kontur und SOLL-Kontur übereinstimmen

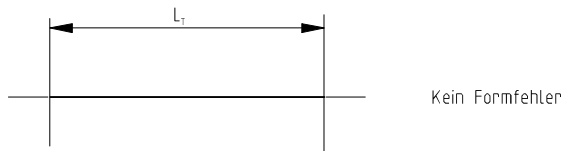


Bild 8: kein Formfehler [2]

Die in Bild 9 dargestellte konkave Bogenform entsteht, wenn die IST-Kontur kleiner ist als die SOLL-Kontur.

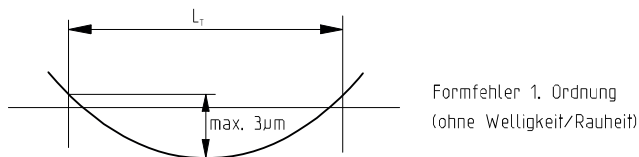


Bild 9: Formabweichung 1. Ordnung [2]

Die in Bild 10 dargestellte konvexe Bogenform entsteht, wenn die IST-Kontur größer ist als die SOLL-Kontur.

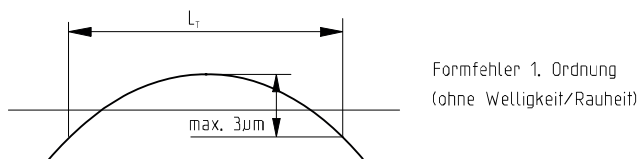


Bild 10: Formabweichung 1. Ordnung [2]

In Bild 11 wird die Gestaltsabweichung als Gerade mit überlagerten Abweichungen (Wellen, Rauheiten) dargestellt.

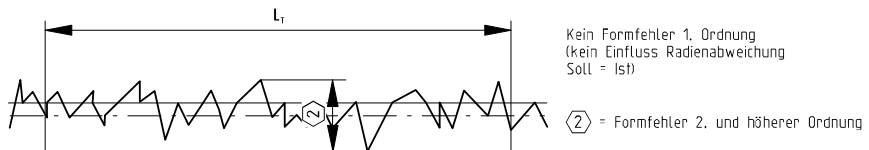


Bild 11: Formabweichung 1. Ordnung [2]

In Bild 12 ist die Formabweichung als konkave Bogenform mit überlagerten Abweichungen (Wellen, Rauheit) dargestellt.

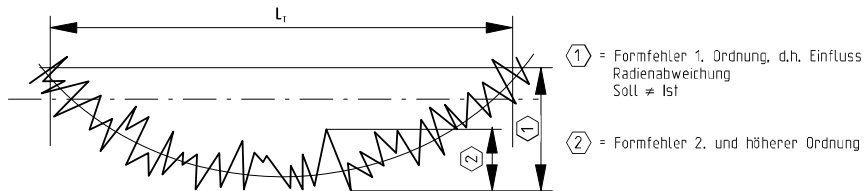


Bild 12: Formabweichung 1. Ordnung [2]

In Bild 13 ist die Formabweichung als konvexe Bogenform mit überlagerten Abweichungen (Wellen, Rauheit) dargestellt

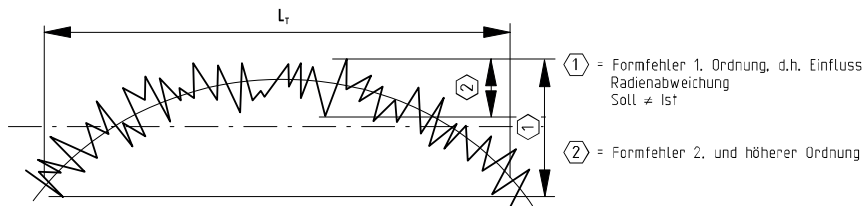


Bild 13: Formabweichung 1. Ordnung [2]

7. Anwendungsbeispiel

10 μm : Wert besteht aus der berechneten Gestaltsabweichung bestehend aus der zulässigen Formabweichung 2. und höherer Ordnung

4 μm : zulässige Gestaltsabweichung 2. und höherer Ordnung

	0,010	S 241004
	0,004	

Bild 14: Beispiel [2]

6 μm = 10 μm – 4 μm : zulässige Gestaltsabweichung des Radius.

Für die Auswertung der Werte ist es nicht zulässig, eine vergleichbare Anwendung vorzunehmen wie beim Maximum-Material-Prinzip.

Ist z. B. der gemessene Wert der Gestaltsabweichung 2. Ordnung 0, so darf die Gestaltsabweichung der 1. Ordnung nicht den Wert 10 μm annehmen (vgl. Bild 14), sondern die reale zulässige Radiusabweichung ist 6 μm .

6. Messgeräte für die Radiusauswertung

Die Bestimmung der beiden tolerierten Abweichungen gegenüber dem SOLL-Radius erfolgt mit den folgenden Messgeräten:

- Formtalsurf / LD 120
- Perthometer-Concept
- 3D-Koordinatenmessmaschinen (KMG)

Mit diesen Geräten, die in der Schaeffler Gruppe vorhanden sind, lassen sich unter Vorgabe des Sollwertes die Gestaltsabweichungen 1., 2. und höherer Ordnung direkt bestimmen oder aus dem Messschrieb ableiten.

7. Literaturnachweis

- [1] Steffi Preß; Bemaßung, Fertigung und Kontrolle von Kugellaufbahnen – Diplomarbeit 1994
- [2] S 241004 Sonderv Verfahren der Radienbemaßung und –messung
Schaeffler Gruppenstandard
- [3] DIN 4760 Gestaltsabweichung , Begriffe und Ordnungssystem
Beuth Verlag, Berlin
- [4] Dr. –Ing. Hans-Jürgen Warnecke und Dr. Ing. Wolfgang Dutschke
Fertigungsmeßtechnik; Handbuch für Industrie und Wissenschaft.
Springer –Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1984

Optische 3D-Messung von Kanten und Radien an Werkzeugen und Bauteilen

Gottfried Frankowski

GFMesstechnik GmbH, Warthestr. 21; D-14513 Teltow/Berlin
gottfried.frankowski@gfm3d.com

Abstrakt: Kanten und Radien bestimmen maßgeblich das Funktionsverhalten von Werkzeugen und Bauteilen und werden daher mit höchster Präzision gefertigt. Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, wie Kanten und Radien mit der phasenmessenden Streifenprojektionstechnik schnell gemessen werden können.

1. EINLEITUNG

Die Erzeugung definierter Kanten und Radien ist für die Funktionalität von Bauteilen und Werkzeugen von grundlegender Wichtigkeit. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen belegen, dass durch eine definierte Kantenverrundung sowohl die Standzeit von Zerspanungswerkzeugen als auch die Lebensdauer von Bauteilen erheblich gesteigert werden kann. In weiten Bereichen der Industrie ist es somit schon zum Standard geworden, in der Werkzeug- oder Bauteilzeichnung definierte Parameter für die Kantenverrundung vorzugeben, die im Herstellungsprozess erzeugt und gewährleistet werden müssen.

In der Fertigung steht die Aufgabe, durch entsprechende Kantenverrundungstechnologien, die Zeichnungsvorgaben zu gewährleisten und das erzielte Ergebnis sicher zu belegen. Diese Aufgabe kann nur erfüllt werden, wenn neben geeigneten Verrundungstechniken auch leistungsfähige Messtechnik verfügbar ist, um so erzeugte Kantenverrundungen und -radien schnell, sicher handhabbar und vor allem kostengünstig zu erfassen und zu dokumentieren.

2. MESSTECHNIK FÜR KANTENVERRUNDUNG

2.1 Verwendete Messmethoden

Für die Messung der Kantenverrundung kommen taktile und optische Systeme zum Einsatz. Taktile Systeme basieren auf der Verwendung von üblichen Antastkugeln, -nadeln oder -kufen. Sind die zu messenden Verrundungen sehr klein, so werden nur noch Tastnadeln mit sehr kleinem Tastspitzenradius verwendet. In Abb. 1 sind die Abtastverhältnisse einer Kante bei taktilem und bei optischer Antastung gezeigt. Die Prinzipskizze verdeutlicht, dass die Auflösung bzw. der Messpunktstand bei taktilem Antastung im wesentlichen durch den

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

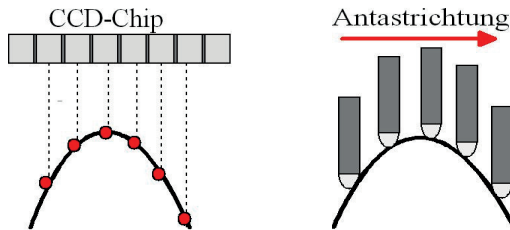


Abbildung 1: Vergleich optische und taktile Kantenantastung

Tastspitzenradius sowie die Verfah- und die Auslesegeschwindigkeit der Tasterposition bestimmt wird. Bei der optischen Antastung resultiert dagegen die Auflösung bzw. der Messpunktstand aus der Pixelanzahl bzw. -größe des Sensors unter Berücksichtigung der Größe des verwendeten Messfeldes.

Für die qualitative und quantitative Erfassung der Kantenverrundung wird derzeit vor allem die phasenmessende Streifenprojektion [Frankowski, 1997] eingesetzt. Weitere optische 3D-Messverfahren, die hier zur Anwendung kommen, sind die konfokale Mikroskopie [Nanofocus AG, 2011] und des Infinite-Fokus-verfahrens [Alicona GmbH, 2011]. In beiden Fällen handelt es sich um sogenannte Fokus-Suchverfahren, bei denen mittels eines Vertikalscans der Optik oder des Messobjektes die jeweils optimale Kontrastfunktion in denen einzelnen Abbildungsebenen gesucht wird. In den nachfolgenden Darstellungen in Abb. 2 sind die funktionalen Zusammenhänge der drei Verfahren gezeigt.

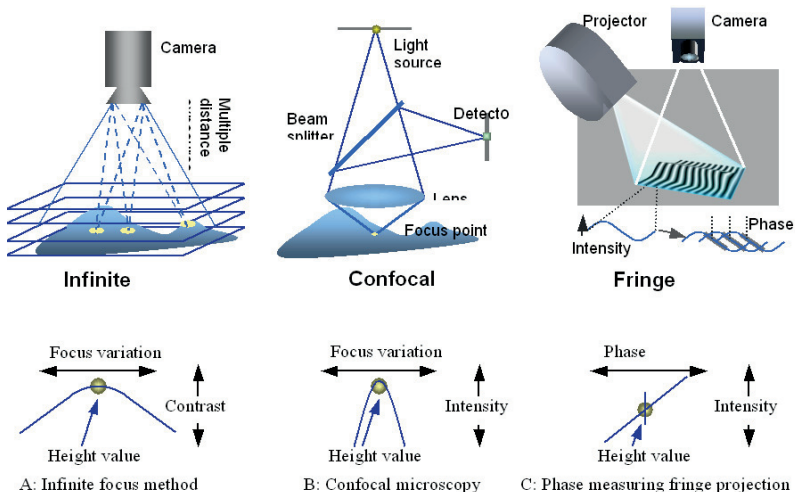


Abbildung 2 Funktionsprinzipien: Konfokale Mikroskopie, Infinite-Fokus und phasenmessende Mikrostreifenprojektion

3. PHASENMESSENDE STREIFENPROJEKTION

3.1 Funktionsprinzip

Die phasenmessende Streifenprojektion basiert, wie in Abb. 4 zu erkennen ist, auf einer Kombination von Triangulationsverfahren und interferometrischen Verfahren, woraus auch die Bezeichnung „phasenmessende Streifenprojektion“ resultiert. Der Triangulationseffekt ergibt sich aus der notwendigerweise schrägen Beobachtung oder Projektion der Lichtstreifen, die, wie in der Darstellung zu erkennen ist, bereits die 3D-Form des aufgenommenen Objektes anzeigt.

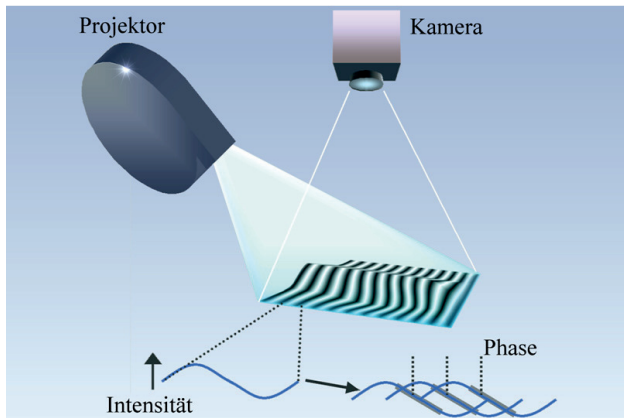


Abbildung 3 : Prinzip der phasenmessenden Mikrostreifenprojektion. Bestimmung der Streifen-Feinposition aus der Phasenlage

Der zu messende Höhenwert (z-Koordinate) resultiert bei der phasenmessenden Streifenprojektion direkt aus der triangulierten Streifenposition, die anhand eines Intensitätswertes im Einzelpixel des Sensors auf einem sehr kleinen Bruchteil der Streifenbreite und zudem exakt auf der Streifenflanke bestimmt wird. Somit ist die Höhenauflösung im Messpunkt unabhängig von der lateralen Auflösung des Sensors, wie dies auch in Abbildung 3 verdeutlicht wird.

Als sehr effektiv erweisen sich hierbei auch die schon seit Jahren für die phasenmessende Streifenprojektion verwendeten digitalen Lichtprojektoren auf der Grundlage der DLP™-Technologie von Texas Instruments, Inc., deren Projektionseinheit ein Array von bis zu einer Million mikrometergroßen Mikrospiegeln aufweist [Frankowski, 2000]. Von großer Wichtigkeit für den praktischen bzw. industriellen Einsatz derartiger Projektionssysteme für streifenprojektionsbasierte 3D-Messgeräte ist die Tatsache, dass die Komponenten von DLP-Projektionskomponenten erwiesenermaßen eine sehr hohe mechanische Langzeitstabilität und praktisch keine Drift oder Alterung besitzen sowie eine nur marginale Temperaturabhängigkeit aufweisen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

Ein ganz wesentlicher Vorteil der phasenmessenden Streifenprojektion gegenüber der o.g. konfokalen Mikroskopie und auch dem Infinite-Fokusverfahren ist, dass hier die Aufnahme der 3D-Daten in nur einer Aufnahme über die gesamte Tiefe und Breite des Messvolumens erfolgt. Im Gegensatz dazu erfordern die anderen beiden Verfahren methodisch bedingt, eine Höhenverstellung der Aufnahmeoptik bzw. des Messobjektes. Die 3D-Punktwolke der aufgenommenen Kante wird dann aus den Einzelscans berechnet, was dazu führt, dass die Höhenauflösung und die Messzeit von der Anzahl der Einzelschritte abhängt.

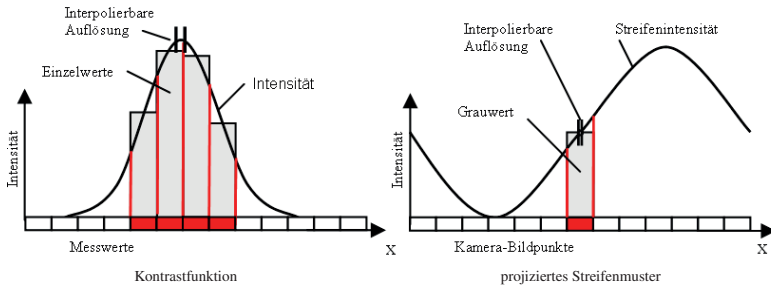


Abbildung 4: Vergleich der z-Interpolation bei optischen Kontrastverfahren und der direkten z-Messung bei der phasenmessenden Mikrostreifenprojektion

3.2. Systemparameter

Die wesentlichen messtechnischen Systemparameter eines streifenprojektionsbasierten 3D-Messgerätes ist die **Lateralauflösung** bzw. der Messpunktabstand A_x und A_y jeweils in x- und y-Richtung des Messfeldes M_x bzw. M_y sowie die Vertikal- bzw. **Profilhöhenauflösung** z_{xy} in der xy-Ebene.

Eine einfache Abschätzung der lateralen Auflösung A_x bzw. A_y eines streifenprojektionsbasierten 3D-Messgerätes ergibt sich damit aus der Anzahl der Bildpunkte (Pixel) P_x und P_y des verwendeten Sensors in x- bzw. y-Richtung, bezogen auf die x- und y-Maße des Messfeldes. Danach berechnet sich die laterale Auflösung wie folgt:

$$A_x = M_x/P_x \quad \text{bzw.} \quad A_y = M_y/P_y \quad (1).$$

Eine näherungsweise Abschätzung der Profilhöhenauflösung (z-Auflösung) ist unter Zugrundelegung der nachfolgenden Gleichung möglich:

$$z_{(x,y)} = \lambda_{\text{eff}} / 4\pi\Phi_{(x,y)} \quad (2).$$

In Gl. (2) ist λ_{eff} die sogenannte effektive Wellenlänge, die sich aus dem Streifenabstand bei einem Projektionswinkel von 45° berechnet. $\Phi_{(x,y)}$ ist die Phasenlage des Streifenmusters, die aber in der täglichen Praxis nicht bekannt ist. Eine Abschätzung der Profilhöhenauflösung wird daher zumeist so vorgenommen, dass die Länge der Messfelddiagonale durch den Wert 10.000 geteilt wird.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Der so erhaltene Wert ist näherungsweise ein sicheres Richtmaß für die Profilhöhenauflösung eines streifenprojektionsbasierten 3D-Messgerätes.

Beispiel: Die Länge des diagonalen Abstandes im Messfeld ist 10 mm bzw. 10.000 μm , d.h., dass die resultierende Auflösung des Streifenprojektionssystems bei ca. 1 μm liegt.

3.2.2 Objektzustand und Messgeschwindigkeit

Die Streifenprojektion ist physikalisch ein sogenanntes geometrisch-optisches Messverfahren. Damit kommt den Materialeigenschaften und besonders auch dem Oberflächenzustand eine immense Bedeutung zu. Prinzipiell sind Materialien bzw. Oberflächenzustände mit der Streifenprojektion nicht messbar, wenn

- die Messobjektoberfläche spiegelnd reflektiert;
- das Material des Messobjektes transparent oder teiltransparent ist;
- sich das Messobjekt während der Messdatenaufnahme (d.h. Projektion der Streifenmuster) in Bewegung befindet.

Während die Tatsache, ob ein Messobjekt transparent bzw. teiltransparent ist oder ob es sich bei der Messdatenaufnahme in Bewegung befindet, auch für wenig erfahrene Anwender ein eindeutig zu beurteilendes Kriterium ist, ist der Oberflächenzustand immer wieder ein offener Diskussionspunkt.

Ein erfolgversprechender Weg, um auch bei stark glänzenden Objektoberflächen noch Streifen abbilden bzw. messen zu können, ist so der bei GFM gewählte Weg, UV-Beleuchtungssysteme einzusetzen. Es konnte so gezeigt werden dass sich Messobjekte mit Oberflächenrauheiten von $R_z < 1 \mu\text{m}$, die einen starken Glanz aufwiesen, mittels UV-Beleuchtung noch sehr gut gemessen werden können. Das nachfolgend in Abb. 5 gezeigte Ergebnis der verglichenen Messung mit Weiß- und mit UV-Licht an einer feingedrehten Stahloberfläche zeigt die erzielbaren sehr guten Messmöglichkeiten auf [Liedmann, 2010].

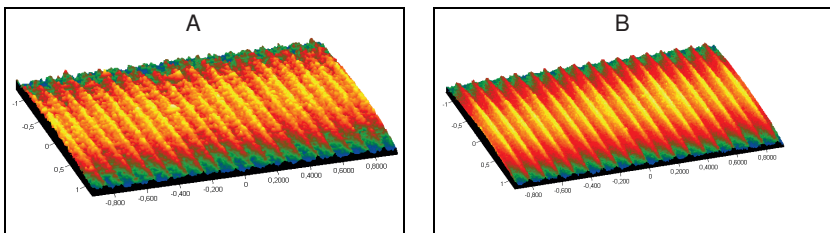


Abb. 5: Feingedrehte Stahloberfläche ($R_z = 1,1 \mu\text{m}$)

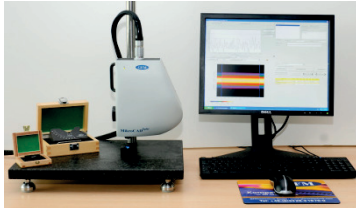
A – Aufnahme mit Weißlichtprojektion; B – Aufnahme mit UV-Lichtprojektion

Um direkt in Fertigungsanlagen zu messen, ist die Geschwindigkeit der Messdatenaufnahme entscheidend. Bei den GFM-Streifenprojektionsgeräten Kantenverrundungsmessungen liegt die Messzeit für ein 3D-Profil bei ca. 500 ms.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

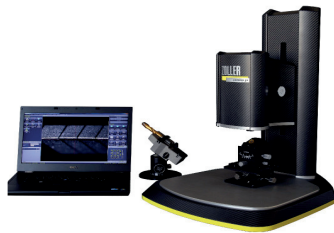
4. GERÄTE FÜR KANTENVERRUNDUNGSMESSUNG

Speziell für die Kantenverrundungsmessungen, stehen drei Typen von streifenprojektionsbasierten 3D-Messgeräten zur Verfügung, die als stand-alone, mobile und maschinenintegrierbare Messgeräte konzipiert sind. In den nachfolgenden Abb. 6 bis 8 sind diese drei Messgerätetypen gezeigt.

Messgeräteparameter:

- Messvolumen[mm³]: 2,4 x 1,8 x 1,0
- Lateralauflösung [μm]: 1,5
- Vertikalauflösung [μm]: 0,2
- Einzelmesspunkte : 2.000.000
- Gewicht [g]: 2400
- Abmessung [mm³]: 211x256x132

Abb. 6 Stand-alone-Messgerät: **MikroCAD^{premium}**

Messgeräteparameter:

- Messvolumen: 1,8 x 1,2 x 1,0
- Lateralauflösung [μm]: 2,5
- Vertikalauflösung [μm] : 0,3
- Einzelmesspunkte: 360.000
- Gewicht [g]: 870
- Abmessung: 131x153x61

Abb. 7 Mobiles Messgerät: **POM skp – go** [Zoller, 2010]

Messgeräteparameter:

- Messvolumen [mm³]: 5 x 3 x 2,6
- Lateralauflösung [μm] : 6,6
- Vertikalauflösung [μm] : 0,5
- Einzelmesspunkte: 360.000
- Gewicht [g]: 900
- Abmessung [mm³]: 164x144x55

Abb. 8 Maschinenintegrierbares Gerät: **TopoCAM-venturion**

5. ANWENDUNGSBEISPIELE ZUR VERRUNDUNGSMESSUNG

Anhand der nachfolgenden Anwendungsbeispiele sollen die komplexen Einsatzmöglichkeiten der streifenprojektionsbasierten optischen 3D-Messtechnik

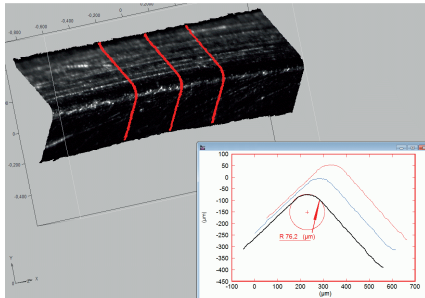


Abb. 9 Werkzeugschneidkante

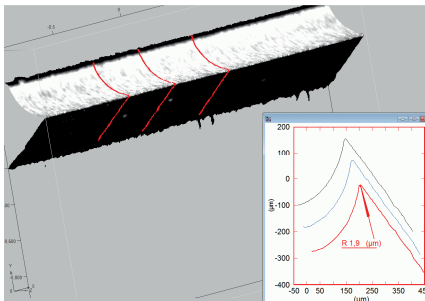


Abb. 10 Rasierklinge

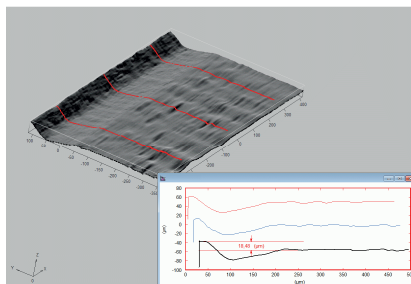


Abb. 11 Schnittblech mit Grat

für die Messung und Inspektion von Kantenverrundungen und -radien veranschaulicht werden. Als Standardanwendung kann dabei die in der nebenstehenden Abb. 9 gezeigte Messung von Schneidkanten an Zerspanungswerkzeugen bezeichnet werden. Hier ist die Anwendung an unterschiedlichsten Typen von Spanungswerkzeugen bzw. Wendschneidplatten gegeben. Eine spezielle und ggf. kundenspezifische Messsoftware sichert die einfache und bedienerfreundliche Gerätebedienung ohne spezifische Messtechnikenkenntnisse des Bedieners. Soll eine Einbindung des Messgerätes in Automatisierungslösungen erfolgen, so können ggf. CNC-Achsen für das Bauteilhandling bzw. auch die Sensorpositionierung bereitgestellt werden. Ein Autofokus ermöglicht zudem die schnelle und präzise Scharfstellung des Gerätes.

Die volle Leistungsfähigkeit eines Streifenprojektionsmessgerätes für die Messung kleinster Radien verdeutlicht das in Abb. 10 gezeigte Ergebnis der Radienmessung an einer Rasierklinge. Radien an Rasierklingen liegen üblicherweise im Bereich $< 1 \text{ mm}$.

Die flexiblen Verwendungs- und Gestaltungsmöglichkeiten von Streifenprojektionsystemen. Wie z.B. die Auslegung als handgeführte Systeme ermöglichen Messung direkt in der Fertigung wie das Beispiel Gratmessung an Blechen in Abb. 11 zeigt.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

6. ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von den unterschiedlichen taktilen und optischen Messverfahren für die Messung und Inspektion von Kantenverrundungen und –radien, werden die Möglichkeiten, welche die phasenmessende Streifenprojektion bietet, näher dargestellt und erläutert. Nach einer methodischen Darstellung der phasenmessenden Streifenprojektion werden unterschiedliche Typen von Messgeräten und Verfahren sowie Anwendungen zur Verrundungsmessung und –bewertung von Werkzeugen und Bauteilen gezeigt und diskutiert.

7. QUELLEN

[Frankowski, 1997] Frankowski, G.: "The ODS 800 – A new projection unit for optical metrology"; In: *Fringe 97 – Automatic Processing of Fringes*; S. 533 - 539; Akademie-Verlag Berlin 1997 ; ISBN 3-05-501644-0

[Nanofocus AG, 2011] www.nanofocus.de

[Alicona GmbH, 2011] www.alicon.at

[Frankowski, 2000] Frankowski, G.; Huth, T.; Chen, M.: „Real-time 3D shape measurement with digital stripe projection by Texas Instruments Micro Mirror Devices DMD“; In: *Proceedings of SPIE Conference 3958; Three-Dimensional Image Capture and Applications II*; S. 90 – 105; San Jose, USA; 24-25.01.2000

[Liedmann, 2010] Liedmann, M.: „MikroCAD^{premium+} - Optical measurement of surface structures and micro-geometries by UV light“; In: *“Procter & Gamble Workshop Industrial 3D Measurement of technical Materials“*; Cincinnati, USA; Dezember 2010

[Zoller, 2010] Firmeninformation zum optischen 3D-Messgerät „POM spk – go“ für die optische Vermessung von Werkzeugschneidkanten

Kantengeometrien reproduzierbar messen und auswerten

Raimund Volk

*Hommel Etamic GmbH, Jenoptik
Alte Tuttlinger Straße 20
78056 Villingen-Schwenningen
raimund.volk@jenoptik.com*

Abstract: Es wird ein Verfahren beschrieben, mit dem sich sowohl Kantengeometrien als auch Aufwürfe gleichzeitig automatisch messen und auswerten lassen. Die Kontur des Werkstücks wird senkrecht zur Kante mit einem Tastschnittgerät erfasst. Das Gerät muss in der Lage sein gleichzeitig die Kontur und die Feinstruktur der Oberfläche zu erfassen. Besondere Bedeutung kommt dabei dem Tastelement zu. Der Konturverlauf wird durch eingepasste Geraden referenziert. Relativ zu dem so angelegten Bezug wird der Konturverlauf in einem von der zu prüfenden Toleranz abhängigen Korridor bewertet. Überschreitungen des Konturverlaufs außerhalb des Toleranzkorridors werden erfasst und als Ergebnis der Messung ausgewiesen.

1. MESSAUFGABE - TASTSCHNITTVERFAHREN

Kanten haben an Werkstücken häufig eine funktionale Bedeutung. Wichtig ist oft der Nachweis der Abwesenheit von Graten oder Aufwürfen. Solche Abweichungen von der Idealform können beispielsweise dazu führen, dass zusammengebaute Teile nicht mehr dicht sind.

Das Werkstück soll dazu entlang einer genügend breiten Zone erfasst werden, wobei die Kantenform mit hoher Auflösung und Genauigkeit gemessen werden muss. Zur Messung bietet sich das Verfahren des mechanischen taktilen Tastschnitts an. Die taktile Messung ist vor allem bei den in der Praxis häufig vorkommenden Innenstrukturen vorteilhaft.

Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für ein Werkstück mit einer komplexen Innenstruktur. Der besseren Sichtbarkeit wegen ist ein Teil der Außenkontur entfernt worden. Von rechts ragt ein Tastarm eines Tastschnittgerätes in die Innenkontur hinein, hier dargestellt mit einer Doppeltastspitze für nacheinander folgenden Messungen an zwei 180° gegenüberliegenden Messstellen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

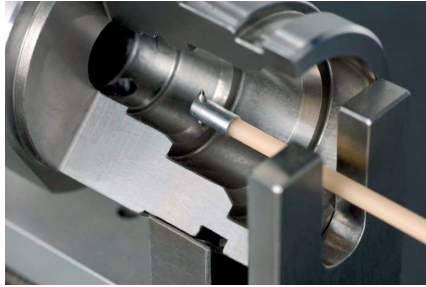


Abbildung 1: Werkstück mit Innenkonturen.

Um die geforderten feinen Details erfassen zu können muss eine Tastspitze mit ausreichend kleinem Krümmungsradius verwendet werden. In der Regel wird eine konische Tastspitze mit Krümmungsradius von $r_{tip} = 2\ \mu\text{m}$ oder $5\ \mu\text{m}$ und einem Öffnungswinkel γ von 60° oder 90° eingesetzt [ISO 25178-601 2010]. Flache Tastelemente aus Hartmetall werden auch häufig verwendet.

Zwischen der durch den Krümmungsradius der Tastspitze bedingten Auflösung und der durch den Öffnungswinkel bedingten Störkontur der Tastspitze muss ein Kompromiss gefunden werden. Werden die in der Rauheitsmesstechnik etablierten Diamanttastspitzen verwendet ist der maximal messbare Winkel der erfassten Werkstückkontur auf etwa den halben Öffnungswinkel begrenzt.

Für eine gebräuchliche 60° -Tastspitze ergibt sich ein maximal erfassbarer Profilanstieg von 60° . Wegen der in typischen Tastspitzengeräten angewendeten kreisbogenförmigen Führung der Tastspitze reduziert sich der nutzbare Winkel noch weiter.

In der Standardausführung eines modernen Tastschnittgerätes führt der Tastarm über den vollen Hub eine Winkelbewegung über einen Bereich von $\beta \approx 15^\circ$ aus. Bei symmetrischer Lage des erfassten Profils im Höhenmessbereich des Tastschnittgerätes reduziert sich der nutzbare Bereich der maximalen Profilsteigungen δ weiter auf

$$\delta \leq 90^\circ - \frac{1}{2}\gamma - \frac{1}{2}\beta \quad (1)$$

Für übliche Tastschnittgeräte ergibt sich damit aus Formel (1) ein theoretischer Wert von ca. $\delta < 52^\circ$. In der Praxis begrenzen aber auch noch einerseits Fertigungstoleranzen in der Geometrie der Tastspitze an der Stelle des Übergangs der präzise ausgeführten Verrundung auf den Konuswinkel (siehe Abbildung 2) sowie andererseits die Reibung der Tastspitze in Verbindung mit einer nicht ganz zu vernachlässigenden Elastizität des Tastarms die nutzbare Obergrenze der noch zuverlässig auswertbaren Profilsteigungen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

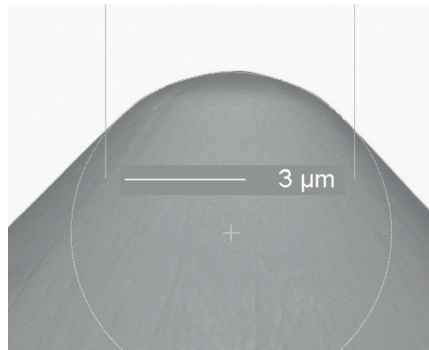


Abbildung 2: Typische 5 µm / 90°-Diamanttastspitze. Spitzenverrundung und Übergang in den konischen Flankenbereich.

Die Diamanttastspitze aus Abbildung 2 ist zusätzlich mit vertikalen Begrenzungslinien versehen, die den zentralen Kreisbereich von den seitlichen Flankenbereichen trennen. Nur in den zentralen Bereich wurde ein Kreis eingepasst. Die radialen Abweichungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Für den eingepassten Kreis wurde ein Radius von $r_{tip} = 3,9 \mu\text{m}$ ermittelt. Die maximalen gemessenen Abweichungen zur Kreisform im Sinne einer Rundheit betragen $RONt = 0,08 \mu\text{m}$.

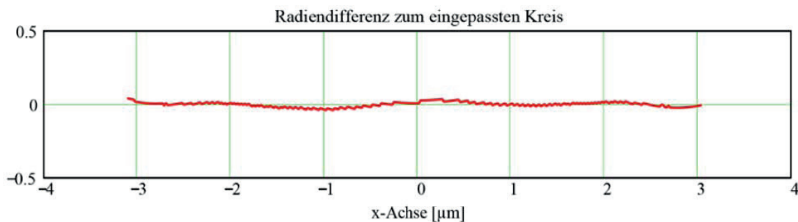


Abbildung 3: Radiale Abweichungen der Tastspitze zum eingepassten Kreis. Horizontal: 1 µm / div, vertikal: 0,5 µm / div.

Für die Auswertungs-Obergrenze wird häufig ein Wert von $\pm 45^\circ$ empfohlen. Profile mit stärkeren Neigungen, wie etwa 90° -Kanten, müssen vor der Messung entsprechend geneigt werden. Da die Auswertung der interessierenden Messgrößen im Allgemeinen im Koordinatensystem des Werkstücks erfolgt, muss diese Rotation entsprechend berücksichtigt werden.

Davon unbeeinflusst ist ein erweiterter Bereich, innerhalb dessen die Tastspitze der Oberfläche folgen kann ohne hängen zu bleiben oder sogar abzureißen. Diese max. Steigfähigkeit kann bis zu 88° betragen (bei Hartmetall-Tastelementen), wobei zumeist zwischen in Messrichtung ansteigenden oder abfallenden Tastspitzenbewegungen unterschieden werden muss.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Für spezielle Messaufgaben werden aber auch Tastspitzen verwendet, die in einer um die y-Achse geneigten Position eingebaut werden. Damit ergibt sich dann sowohl im Auswertungs- als auch im Bereich der maximalen Steigfähigkeit eine unsymmetrische Verschiebung zwischen ansteigenden und abfallenden Flanken.

2. AUSWERTUNG

Es wird ein in der betrieblichen Praxis erprobtes und optimiertes Verfahren eingesetzt [Bosch Kanten 2010]. Mit diesem Verfahren lassen sich sowohl Kantengeometrien als auch Aufwürfe gleichzeitig automatisch messen und auswerten.

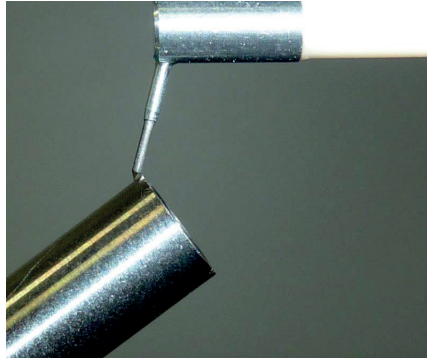
Das Verfahren sieht vor, entlang der auf die Kante zulaufenden Oberflächen Ausgleichsgeraden zu bilden. Deren Länge soll möglichst groß sein, mindestens aber die doppelte Länge des Kantenbruchs aufweisen. Parallel dazu werden innen und außen Oberflächengrenzen definiert. So entsteht ein Korridor, dessen Breite die Rauheit und Welligkeit der betreffenden Oberfläche einschließt. Durchschneiden Ist-Konturen die inneren oder äußeren Oberflächengrenzen, liegen Konturabweichungen vor.

An der inneren Grenze sind diese für die Beurteilung des Kantenbruchs relevant, und an der äußeren Grenze handelt es sich um Materialaufwurf, sprich Gratbildung. Zur Kantenbeurteilung werden Schnittpunkte, an denen Konturabweichungen die innere oder äußere Oberflächengrenze durchbrechen, herangezogen und im Verhältnis zum Schnittpunkt der jeweiligen Oberflächengrenze betrachtet. Diese Schnittpunkte lassen sich stabil definieren und vermaßen.

3. KANTENMESSUNG

Abbildung 4 zeigt den Teil eines Werkstücks, dessen Kantenform funktional geprüft werden soll. Die verwendete Tastspitze ist in diesem Beispiel mit einer Grundneigung ausgestattet. Eine geneigte Tastspitze eignet sich unter Umständen besser dazu, nahe an Stufen messen zu können.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



*Abbildung 4: Werkstück (Rohr) mit funktionaler Kante.
Tastarm mit Messspitze in Messposition.*

Am Werkstück ist hier die Außenkante zu überprüfen. Messtechnisch stellt die Makroform dieser Kante einen 90° -Winkel dar. Das Werkstück wurde deshalb entsprechend um die y -Achse gedreht, so dass bei der Abtastung der maximale Steigungswinkel unterhalb von $\pm 45^\circ$ bleibt und sichergestellt ist, dass die Tastspitze ausschließlich innerhalb ihres präzise definierten Verrundungsbereiches mit der Oberfläche des Werkstücks in Kontakt kommt.

Das Profil direkt nach der Aufnahme ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Maßstab ist für beide Achsen gleich eingestellt, so dass sich eine winkeltreue Abbildung ergibt. Neben der eigentlichen Region um die Kante herum sind beidseitig relativ lange gerade Profilabschnitte mit aufgezeichnet worden. Diese Abschnitte werden in der nachfolgenden Auswertung als Geraden-Referenzen benötigt.

Der Einfluss der Tastspitze ist in Anlehnung an das „Erosions“-Verfahren nach ISO 16610-40 bereits herausgerechnet [ISO 16610-40 2006]. Außerdem natürlich alle geometrischen Einflüsse aufgrund beispielsweise der Kreisbogenbewegung der Tastspitze. Die so erhaltene Oberfläche entspricht der „mechanischen Oberfläche“ der neueren GPS-Normung [ISO 14406 2010]. Das Profil gibt die Oberfläche als morphologisch mit einem Kreisscheibenelement von $r = r_{tip}$ gefiltert wieder. In diesem Fall bedeutet das für $r_{tip} = 3,9 \mu\text{m}$, dass alle Oberflächenmerkmale des Werkstücks mit einer schwächeren Krümmung als ca. $4 \mu\text{m}$ richtig wiedergegeben werden.

Für die folgende Auswertung ist das Profil in Abbildung 5 gedreht worden, so dass eine der gemessenen Flanken mit dem Auswerte-Koordinatensystem zusammenfällt. In diesem Beispiel wurde die ansteigende Flanke als Bezug gewählt.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

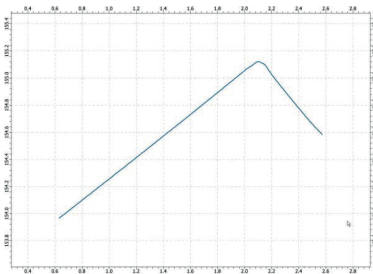


Abbildung 5: Kantenkontur, vor dem Ausrichten.

x: 0,2 mm / div, z: 0,2 mm / div.

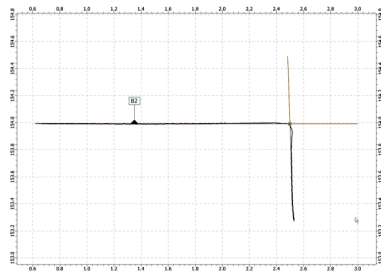


Abbildung 6: Profil, nach dem Ausrichten (Rotation).

x: 0,2 mm / div, z: 0,2 mm / div.

Auf das Profil in Abbildung 6 wird das Kanten-Auswertungsverfahren nach der aktuellen Bosch-Werksnorm angewendet [Bosch Kanten 2010]. Die Toleranzonen und die ermittelten Werte sind in Abbildung 7 eingezeichnet.

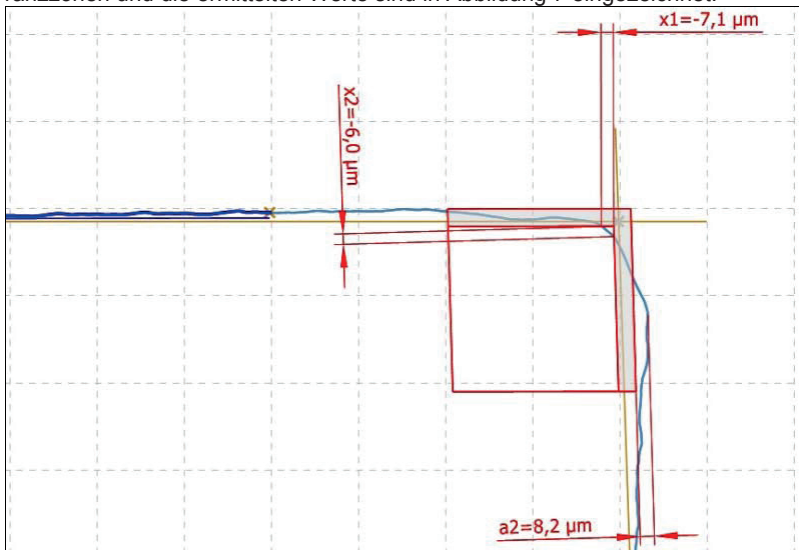


Abbildung 7: : Profil der Kante mit Auswertungszonen.

x: 0,05 mm / div, z: 0,05 mm / div.

Diese Auswertung erfolgt an modernen Geräten entweder interaktiv am Bildschirm oder ist auch nach einmaliger Anlage eines Messstellenplans halbautomatisch durchführbar. Die Ergebnisse sind in der Dialogbox des Auswerteprogramms in Abbildung 8 dargestellt.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

The dialog box 'Kantenauswertung' has four tabs: 'Ergebniswerte', 'Weitere Parameter', 'Bezugselemente', and 'Allgemeine Einstellungen'. The 'Ergebniswerte' tab is active, displaying four measurement results in a 2x2 grid:

Parameter	Ergebniswert	Toleranz
Kantenbruch x1	-7,1 μm	-100,0 μm
Kantenbruch x2	-6,0 μm	-100,0 μm
Überhöhung x1	0,0 μm	0,0 μm
Überhöhung x2	8,2 μm	0,0 μm

At the bottom left, there is a checkbox labeled 'Werte einzeln am Profil bemaßen' which is currently unchecked. At the bottom right, there are two buttons: 'OK' and 'Abbrechen'.

Abbildung 8: Dialogbox mit Messergebnissen.

Die interaktiv am Bildschirm bestimmten Werte können in aller Regel zusammen mit weiteren Messungen zu einer Statistik aufbereitet werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die messtechnische Überprüfung der funktionalen Form von Werkstückkanten erfordert Tastschnittgeräte mit der Eignung für die gleichzeitige Erfassung von einerseits vertikalen Konturen im mm-Bereich und andererseits mit einer Auflösung und Genauigkeit im μm -Bereich. Es stellen sich besondere Anforderungen an die verwendeten Tastspitzen.

Es wurde ein Beispiel der funktionalen Messung einer Werkstückkante gezeigt und der Ablauf der interaktiven Auswertung in einer modernen Gerätesoftware veranschaulicht. Im Zusammenspiel von hochwertiger Geräte-mechanik und -elektronik mit einer leicht bedienbaren und präzisen Auswertesoftware können Funktionsprüfungen in der Praxis effizient und reproduzierbar

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

durchgeführt werden. Mit dem neuen Verfahren sind Kantenbrüche erstmals auf einfache Weise wiederholgenau mess- und auswertbar.

5. QUELLEN

[ISO 25178-601 2010] Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 601: Merkmale von berührend messenden Geräten (mit Taster) (ISO 25178-601:2010); Deutsche Fassung EN ISO 25178-601:2010

[ISO 16610-40 2006] ISO/TS 16610-40, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 40: Morphologische Profilfilter: Grundbegriffe, Ausgabedatum: 2006-11

[ISO 14406 2010] DIN EN ISO 14406, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Erfassung (ISO 14406:2010); Deutsche Fassung EN ISO 14406:2010, Ausgabedatum: 2011-04

[Bosch Kanten 2010] Bosch-Norm N42AP 620, „Prüfung von Werkstückkanten mit unbestimmter Form“, *Robert Bosch GmbH*, 2010

Auswertestrategien zur Verifikation komplexer Konturen

Heinz-J. Kedziora

Mahr GmbH, Carl-Mahr-Straße 1, D-37073 Göttingen
Heinz.Kedziora@Mahr.de

Abstrakt: Die Kontur eines Werkstücks setzt sich in der Regel aus unterschiedlichen Geometrieelementen zusammen: Geraden, Kreisbögen oder für die Funktion erforderlichen Freiformelementen. Was bei der Konstruktion an der CAD-Anlage und bei der Programmierung von CNC-Bearbeitungsmaschinen relativ einfach lösbar ist, ist bei der Konturmessung nicht trivial, da jede Werkstückoberfläche Gestaltabweichungen (Rauheit, Welligkeit und Formabweichungen) enthält. Zusätzlich überlagern sich bei der messtechnischen Erfassung noch die Einflüsse aus dem Messprozess.

Es gibt unterschiedliche Strategien zur Ermittlung von Auswertebereichen für die einzelnen Geometrieelemente. Die gewählte Auswertestrategie ist ein wichtiger Faktor für die Durchführung möglichst genauer, reproduzierbarer und fähiger Messungen.

In diesem Beitrag werden hierzu verschiedene Auswertestrategien aufgezeigt, die Vor- und Nachteile verdeutlicht und der Versuch unternommen, die Reproduzierbarkeit und die Messunsicherheit zu bewerten.

1. EINLEITUNG

Die Bedeutung der Konturmesstechnik innerhalb der Fertigungsmesstechnik hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen, die Anforderungen an die Messgerätetechnik sind gestiegen, und erst durch die Entwicklung von Normalen und Prüfverfahren wurde die Rückführung von Konturmessungen ermöglicht [Neugebauer 2004]. Im Jahre 2005 erschien das erste Blatt einer Richtlinienreihe zu Konturenmessgeräten [VDI/VDE 2629-1], gefolgt von Blatt 2 zur Ermittlung der Unsicherheit von spezifischen Konturmessungen [VDI/VDE 2629-2]. Jedoch sind für die Konturmessungen an Werkstücken bis heute zahlreiche Fragen nicht beantwortet.

In der Konturmessung nach der Methode des Tastschnittverfahrens wird die Kontur eines Werkstücks entlang der Taststrecke erfasst. Das linienförmige Konturprofil besteht aus vielen Messpunkten, üblicherweise als x-z-Wertepaare, und enthält in der Regel mehrere Formelemente, z. B. Geradenabschnitte, Kreisbögen oder andere Geometrieelemente. In der Werkstückzeichnung sind diese Formelemente einzeln spezifiziert. Für die Konturauswertung müssen zuerst die auszuwertenden Formelemente aus dem gesamten Konturprofil extrahiert werden. Die Reproduzierbarkeit der Konturauswertung hängt stark davon ab, wie gut die einzelnen Formelemente identifiziert werden können.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Die Konturauswertung umfasst üblicherweise folgende Schritte:

1. Definition der Abschnitte des Konturprofils, denen die Formelemente zugeordnet werden.
2. Berechnung der Ersatzelemente aus den Messpunkten der zugeordneten Profilabschnitte, meist nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate.
3. Ermittlung von Merkmalen einzelner Ersatzelemente, z. B. der Radius eines Kreisbogens oder Ermittlung von Merkmalen aus dem Bezug zweier Ersatzelemente zueinander, z. B. der Winkel zwischen zwei Geraden.

2. BEISPIEL EINER WERKSTÜCKGEOMETRIE

Als Beispiel für eine reale Werkstückgeometrie ist für die folgenden Betrachtungen das Konturprofil der Schneide eines Zerspanungswerkzeugs ausgewählt. Die Schneidengeometrie eines Zerspanungswerkzeugs ist ein wesentlicher Faktor für die Lebensdauer, die Verschleißfestigkeit und letztlich für die Qualität der Zerspanung. Aber es geht hier nicht um spezifische Fragestellungen in Verbindung mit der Auswertung komplexer Schneidengeometrien, sondern um allgemeine Betrachtungen, die von diesem Beispiel auf Standard-Konturmessaufgaben übertragen werden können.

Abb. 1 zeigt das Konturprofil einer gerundeten Schneide mit dem Radius R , den es zu ermitteln gilt.

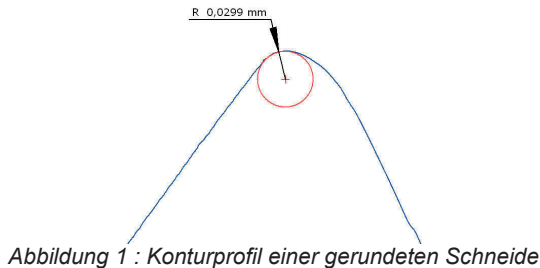


Abbildung 1 : Konturprofil einer gerundeten Schneide

Der Radius ist ein wichtiger Parameter für die Funktion der Schneide, aber bei der Ermittlung des Verrundungsradius hängt das Ergebnis stark davon ab, über welchen Abschnitt des Konturprofils das kreisförmige Ersatzelement berechnet wird. Es werden in Abschnitt 3 drei Auswertestrategien aufgezeigt, nach denen auf Basis der **gleichen** Rohdaten der Verrundungsradius ermittelt wird.

In Ermangelung eingeführter Begriffe werden folgende Arbeitstitel verwendet:

1. Freies Ersatzelement
2. Stabiles Bezugselement
3. Ersatzelement mit tangentialem Übergang

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

3. AUSWERTESTRATEGIEN

3.1 Freies Ersatzelement

Der Anwender definiert zwei Profilpunkte, zwischen denen das Ersatzelement „Kreisbogen“ berechnet wird. In der Praxis der Konturmesstechnik wird diese Auswertestrategie nur für die schnelle, grobe Ermittlung weniger kritischer Konturmerkmale verwendet. Das Ergebnis der Konturauswertung hängt bei diesem Ansatz sehr stark von der Vorkenntnis und der Sorgfalt des Benutzers ab, den „geeigneten“ Abschnitt des Konturprofils für die Berechnung des Ersatzelements festzulegen. Die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses ist erwartungsgemäß nicht besonders hoch, wie in Abb. 2 und Tabelle 1 bei 25-maliger Wiederholung gezeigt wird.

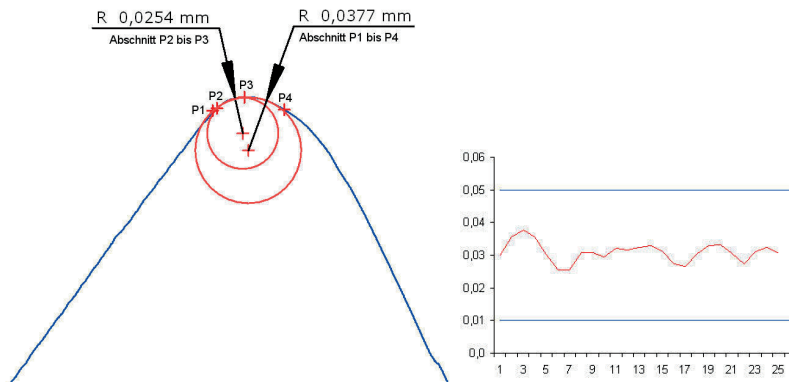


Abbildung 2: Mehrfache Auswertung der gleichen Rohdaten

0,0299	0,0256	0,0322	0,0274	0,0304
0,0355	0,0254	0,0317	0,0265	0,0273
0,0377	0,0307	0,0323	0,0304	0,031
0,0357	0,0308	0,0328	0,0328	0,0323
0,0303	0,0296	0,0311	0,0333	0,0305

Tabelle 1: Ergebnis von 25 Radiusberechnungen nach der Auswertestrategie „Freies Ersatzelement“ (alle Werte in mm)

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

3.2 Stabiles Bezugselement

Während in der ersten Strategie der Benutzer direkt den Profilabschnitt für das auszuwertende Ersatzelement definiert, wird in dieser – weit verbreiteten – Strategie zunächst ein möglichst stabiles Bezugselement durch den Benutzer festgelegt, das den Bezug für die weitere Auswertung bildet. Der Name „Stabiles Bezugselement“ ist gewählt, weil dieses

- den Bezug für die weitere Auswertung bildet und
- das Bezugselement mehr oder weniger unkritisch gegenüber der Wahl des zugeordneten Profilabschnitts durch den Benutzer ist.

Die Vorteile dieser Auswertestrategie sind

- Arbeitserleichterung durch (teil-)automatisiertes Auswerten
- Reduzierung von Benutzereinflüssen und Erhöhung der Prozesssicherheit
- Funktionsgerechte Auswertung

Die Auswertestrategie „Stabiles Bezugselement“ bedeutet für dieses Beispiel folgendes Vorgehen:

1. Die Gerade G1 aus dem Profilabschnitt P1 bis P2 ermitteln. Dies ist hier das Ersatzelement, für das der entsprechende Profilabschnitt in einfacher Weise und möglichst reproduzierbar definiert werden kann.
2. Die Gerade G2 parallel zur Geraden G1 im Abstand d erzeugen.
3. Den Schnittpunkt P3 der Geraden G2 und des Konturprofils bestimmen.
4. Einen Kreis K1 mit dem Mittelpunkt P3 und dem Radius R1 definieren.
5. Den scheitelnahen Schnittpunkt P4 des Kreises K1 und des Konturprofils bestimmen (der zweite Schnittpunkt wird nicht weiter betrachtet).
6. Das Ersatzelement Kreisbogen K2 aus den Messpunkten des Konturprofils zwischen P3 und P4 berechnen.
7. Der Radius des Kreises K2 ist das gesuchte Ergebnis.

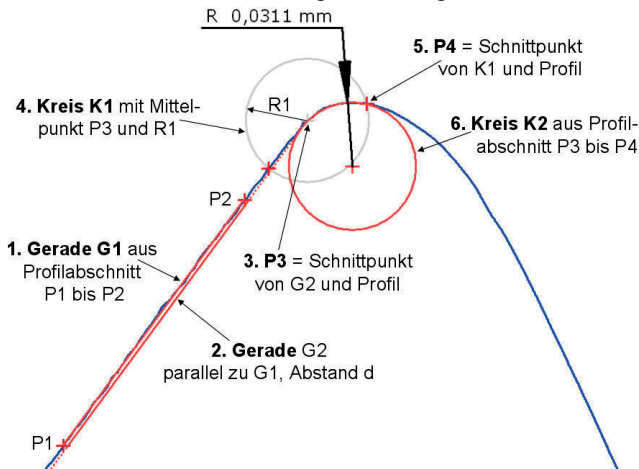


Abbildung 3: Beispiel für die Strategie „Stabiles Bezugselement“ (hier G1)

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

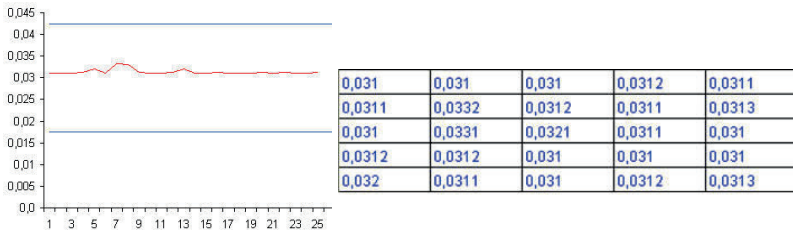


Abbildung 4: Einzelergebnisse von 25 Radiusermittlungen nach der Auswertestrategie „Stabiles Bezugsselement“ (alle Werte in mm)

Die hier beschriebene Auswertestrategie lässt sich auf viele Konturmessaufgaben übertragen. Die Voraussetzung ist immer, dass es ein oder mehrere möglichst stabile Bezugsselemente gibt, auf die die weitere Auswertung nach vorgegebenen Regeln aufbaut.

3.3 Ersatzelement mit tangentialtem Übergang

Die unter 3.2. beschriebene Strategie führt zu sehr viel stabileren Ergebnissen, hat aber einen wichtigen Nachteil: Die einzelnen Ersatzelemente werden unabhängig voneinander ermittelt und liegen daher im Allgemeinen nicht aneinander. Gerade im Übergangsbereich kann die Linienformabweichung nicht ermittelt werden. Der Konstrukteur wird aber in der Regel bemüht sein, in der Sollgeometrie einen „weichen Übergang“ zwischen den Geometrieelementen zu definieren, was bedeutet, dass die Ersatzelemente tangential aneinander liegen. Dieses wird sinnvollerweise auch in der Auswertestrategie berücksichtigt. Die betroffenen Ersatzelemente werden dann nicht mehr unabhängig voneinander berechnet, sondern mit der Nebenbedingung, dass sich die Ersatzelemente an der Übergangsstelle tangential aneinander anschließen. Die zu bestimmenden tangentialen Ersatzelemente können an ein oder zwei Bezugsselemente anschließen.

Abb. 5 zeigt Beispiele möglicher tangentialer Übergänge, Kennzeichnung des Bezugslements durch .

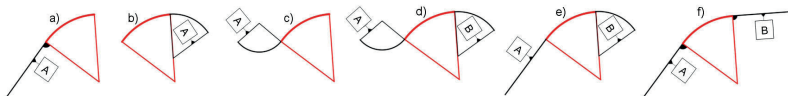


Abbildung 5: Tangentiale Ersatzkreise an a) einer Bezugsgeraden, b) einem Bezugskreis, c) einem Bezugskreis mit Krümmungswechsel (Wendepunkt), d) zwei Bezugskreisen, e) einem Bezugskreis und einer Bezugsgeraden, f) zwei Bezugsgeraden

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Im Folgenden wird der Testdatensatz nach der Strategie des Ersatzelements mit tangentialem Übergang ausgewertet.

Die Schritte 1 bis 5 dieser Auswertestrategie sind identisch mit denen der Strategie gemäß Abschnitt 3.2.

1. Die Gerade G1 aus dem Profilabschnitt P1 bis P2 ermitteln.
2. Die Gerade G2 parallel zur Geraden G1 im Abstand d erzeugen.
3. Den Schnittpunkt P3 der Geraden G2 und des Konturprofils bestimmen.
4. Einen Kreis K1 mit dem Mittelpunkt P3 und dem Radius R1 definieren.
5. Den scheinbaren Schnittpunkt P4 des Kreises K1 und des Konturprofils bestimmen (der zweite Schnittpunkt wird nicht weiter betrachtet).
6. Das Ersatzelement Kreisbogen K2 mit der Nebenbedingung, dass der Übergang Gerade/Kreisbogen tangential ist, ermitteln.
7. Der Radius des Kreises K2 ist das gesuchte Ergebnis.

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis einer Radiusauswertung des Testdatensatzes mit tangentialem Übergang für den Kreisbogen.

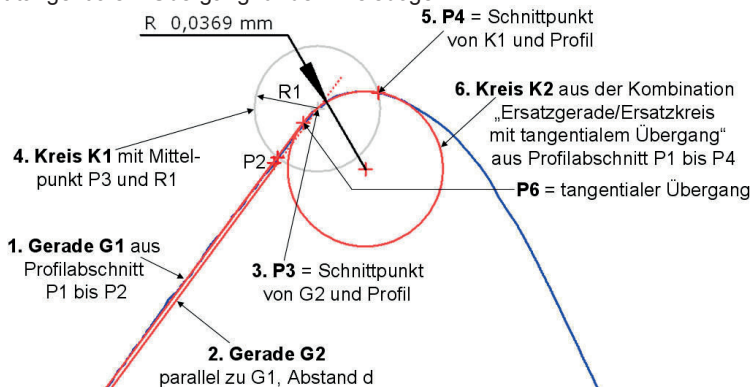


Abbildung 6: Konturauswertung mit tangentialem Übergang zwischen der Geraden G1 und dem Kreisbogen K2

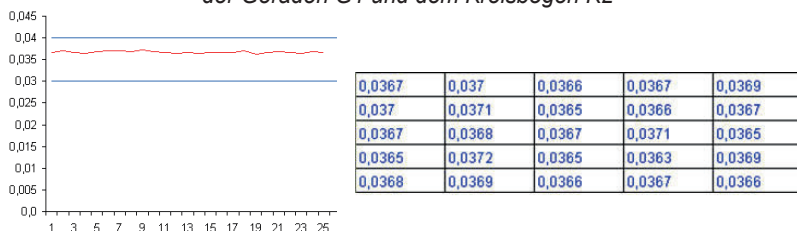


Abbildung 7: Einzelergebnisse von 25 Radiusermittlungen nach der Auswertestrategie „Tangentialem Übergang“ (alle Werte in mm)

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Bei zwei unabhängigen Ersatzelementen kann die Linienformabweichung nur über die an der Berechnung der Ersatzelemente beteiligten Profilabschnitte berechnet werden. Zwischen den beiden Ersatzelementen ist dann keine Aussage über die Linienformabweichung möglich, obwohl für die Funktion häufig gerade der Übergangsbereich eine große Bedeutung hat. Neben den deutlich stabileren Ergebnissen hat die Auswertestrategie „Tangentialer Übergang“ den weiteren Vorteil, dass über die beiden Ersatzelemente mit tangentialem Übergang die Linienformabweichung lückenlos berechnet werden kann. Dieses ist in Abbildung 8 visualisiert.

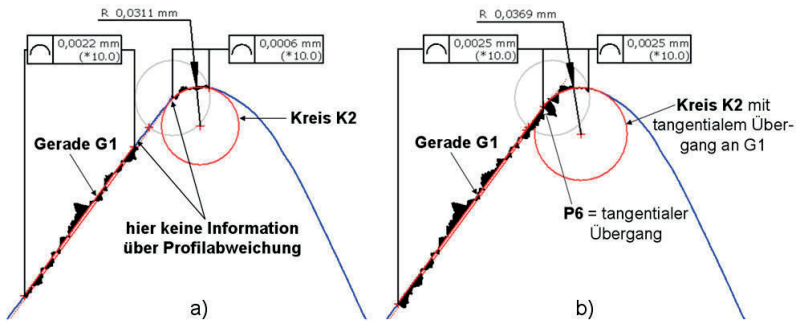


Abbildung 8: Darstellung der Profilabweichungen a) ohne und b) mit tangentialem Übergang der Ersatzelemente

4. FÄHIGKEITSBETRACHTUNGEN

In diesem Abschnitt erfolgt eine kurze Abschätzung des Messunsicherheitsbeitrags der Auswertestrategie. Hierzu wird in Anlehnung an Verfahren 1 gemäß Bosch Heft 10 [Bosch 2010] die Wiederholbarkeit für die vorgestellten Auswertestrategien ermittelt. Aus der Streuung der Ergebnisse für den auszuwertenden Radius bei 25-maliger Wiederholung der Auswertung kann bei gegebenen Toleranzgrenzen der Fähigkeitsindex C_g ermittelt werden.

$$C_g = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s} \quad (1)$$

mit

T = oberer Grenzwert – unterer Grenzwert

s = Standardabweichung der Messwerte

Durch Auflösung von Formel 1 nach T kann aus den Stichproben berechnet werden, für welche Toleranz ein Fähigkeitsindex von $C_g = 1,33$ erreicht würde. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

	Auswertestrategie		
	Ereies Ersatzelement	Stabiles Bezugelement	Tangentiales Ersatzelement
Standardabweichung	2,995 μm	0,612 μm	0,224 μm
Toleranz für $C_g = 1,33$	120 μm	24 μm	9 μm

Tabelle 2: Statistischer Vergleich der Auswertestrategien

5. DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hero Weber, Jade Hochschule, für seine Diskussions- und Programmbeiträge zu tangential anschließenden Konturgeometrien.

6. QUELLEN

[Bosch 2010] Robert Bosch GmbH; Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe Technische Statistik, Heft 10 – Fähigkeit von Mess- und Prüfprozessen; Ausgabe 05.2010

[Neugebauer 2004] Neugebauer, M.; Jusko, O.; Wäldele, F.; Kedziora, H.-J.; Meyer, M.; Volk, R.: „Geometrische Normale zur Prüfung von Konturenmessgeräten“; In: Technisches Messen (71) 2004 11, S. 590-595

[VDI/VDE 2629-1] VDI/VDE 2629 Blatt 1 „Genauigkeit von Konturen-messgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Konturenmessgeräte nach dem taktilen Tastschnittverfahren“; Beuth Verlag Berlin 2008

[VDI/VDE 2629-2] VDI/VDE 2629 Blatt 2 „Genauigkeit von Konturen-messgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Ermittlung der Unsicherheit von spezifischen Konturenmessungen mit Normalen/kalibrierten Werkstücken“; Beuth Verlag Berlin 2008

Messmöglichkeiten und Kalibrierstrategien für UV-Licht-basierte optische 3D-Sensoren zur messung und Bewertung von „scharfen“ Schneidkanten

Matthias Liedmann

GF Messtechnik GmbH, Warthestr. 21; D-14513 Teltow/Berlin
Matthias.Liedmann@gfm3d.com

Kanten von Werkzeugen werden gewöhnlich dann als „scharf“ bezeichnet, wenn die Radien deutlich unterhalb von 10 μm liegen. Da die Beurteilungen entsprechender Kanten mit dem Rasterelektronenmikroskop mit hohem gerätetechnischem- und Zeitaufwand verbunden ist, kann die Einsatzgrenze von optisch flächenhaft antastenden Systemen hin zu kleineren Radien verschoben werden, wenn die Lichtwellenlänge durch Einsatz von blauen und UV Lichtquellen reduziert wird.

Ziel des Vortrages ist die Vorstellung der Messmöglichkeiten mit entsprechenden Sensoren an Kanten mit Radien ab ca. 1 - 10 μm . Dazu werden die damit verbunden Herausforderungen einer im Vergleich zum „Kantenradius“ stark zerklüfteten Mikrostruktur, parabel- oder wasserfallartig asymmetrischer Verrundung diskutiert.



MikroCAD



Messmöglichkeiten und Kalibrierstrategien für UV-Licht-basierte optische 3D-Sensoren zur messung und Bewertung von „scharfen“ Schneidkanten

Vorteile durch UV-Licht
Einsatzbeispiele

GF Messtechnik GmbH
Warthestrasse 21; 14513 Teltow/Berlin
Tel.: 03328/9360-0; Fax: 03328/305188
E-Mail: info@gfm3d.com
www.gfm3d.com

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Mikrostreifenprojektion mit UV Licht

GFM



MikroCAD premium+



Teilbereich Klinge / Elektrorasierer

Mit dem System MikroCAD premium+ wird der erfolgreiche Weg von der Mikrostreifenprojektion mit weißem Licht über den Einsatz blauer LED Lichtquellen nun im UV Bereich fortgesetzt. Der Einsatz von Lichtquellen immer kürzerer Wellenlänge bringt praktische Vorteile. Die Ursachen sowie die Möglichkeiten - insbesondere bei der Messung relativ scharfer Kanten - werden im folgenden beschrieben.

Spezifikation der lateralen Systemauflösung...

GFM

$$\text{Vergrößerung} = \frac{\text{scheinbare Objektgröße}}{\text{wahre Objektgröße}}$$

- *Klassischer Parameter in der Mikroskopie*
- *Mit dem Einsatz digitaler Kameras, Monitore und Zoommöglichkeiten kaum zur Spezifikation von Systemen geeignet*

$$\text{Messpunktdichte} = \frac{\text{Messpunkanzahl}}{\text{Messfeldgröße}}$$

- *Standardangabe von Systemherstellern und auch gut geeignet, Systeme gleicher Funktionsweise zu klassifizieren*
- *Eingesetzte Optik, Datenqualität... bleiben leider unberücksichtigt*

$$\text{Optisches Auflösungsvermögen} = \frac{1,22 \cdot \text{Wellenlänge}}{2 \cdot \text{numerische Apertur}}$$

- *Beschreibt die Qualität optische Systeme wesentlich besser*
- *Vorsicht: Eigenheiten bei der Erfassung von 3d Daten bleiben auch hier unberücksichtigt*

Schlussfolgerungen:

- *Grundsätzlich müssen Messpunktdichte und optische Auflösung erhöht werden, um möglichst feine Strukturen hochauflösend messen zu können*
- *Da Unterschiede bei der Erfassung von 3d Daten auftreten, ist der Vergleich an realen Messobjekten notwendig, um die „Strukturauflösung“ der Systeme zu beschreiben*

Verbesserung der Systemauflösung

GFM

Messpunktdichte

Kamera / Messpunktzahl

- Einsatz höherauflösender Kameras zumeist möglich
- Führt zu höherem Systempreis und größeren Messzeiten

Messfeldgröße

- Verringerung führt zu höherer Messpunktdichte
- Jedoch durch Anwendung vorgegeben und kann nicht verkleinert werden

Optische Auflösung

Wellenlänge

- Kürzere Wellenlänge erhöht die optische Auflösung
- Durch die Verfügbarkeit von blauen und UV LED machbar

Numerische Apertur

- Die Apertur-Vergrößerung führt direkt zu geringeren Arbeitsabständen
- Kompliziert das Handling und schränkt die Anwendungsmöglichkeiten ein

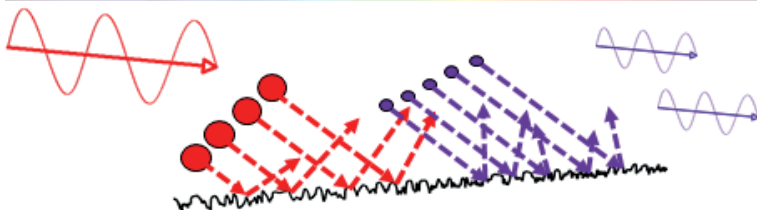
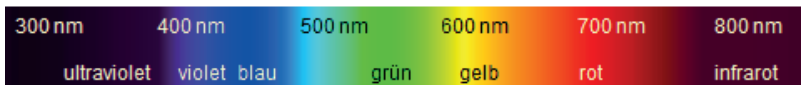


Messung mit UV-Licht
und großem
Arbeitsabstand



Mikroskop mit geringem
Arbeitsabstand

Vorteile des Messen mit UV-Licht

GFM


- Die optische Auflösung ist proportional zur Wellenlänge, so dass mit UV-Licht auch wesentlich kleinere Strukturen aufgelöst werden können
- Durch die kürzere Wellenlänge vergrößert sich der Streulichtanteil
- Mit erhöhtem Streulichtanteil können chromglänzende Bauteile und Bauteile mit steilen Flanken einfacher gemessen werden

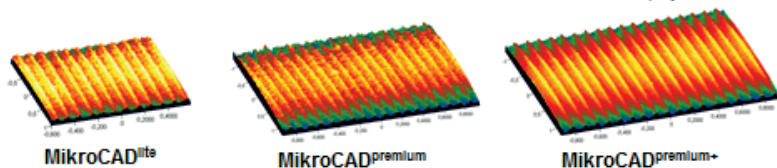
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Systemvergleich

GFM

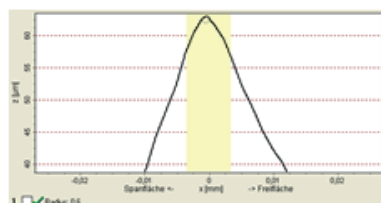
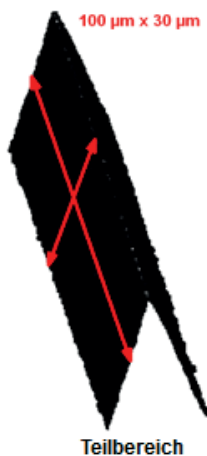
	MikroCAD lite	MikroCAD ^{premium}	MikroCAD ^{premium+}
Beleuchtung	Weiß LED	Blaue LED	UV LED
Kamera	0,4 Megapixel	2 Megapixel	5 Megapixel
Messvolumen*	1,8 x 1,2 x 1 mm ³	2,4 x 1,8 x 1 mm ³	2,9 x 2,4 x 1 mm ³
Messpunktdichte	2,5 µm	1,5 µm	1,2 µm
Höhenauflösung	0,2 µm	0,1 µm	0,05 µm
Geschwindigkeit	200.000 Punkte/s	300.000 Punkte/s	500.000 Punkte/s

Gedrehte Oberfläche mit einer mittleren Strukturhöhe von 1,3 µm

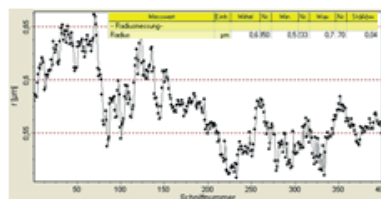


Messung Skalpel mit UV Sensor

GFM



Profilschnitt



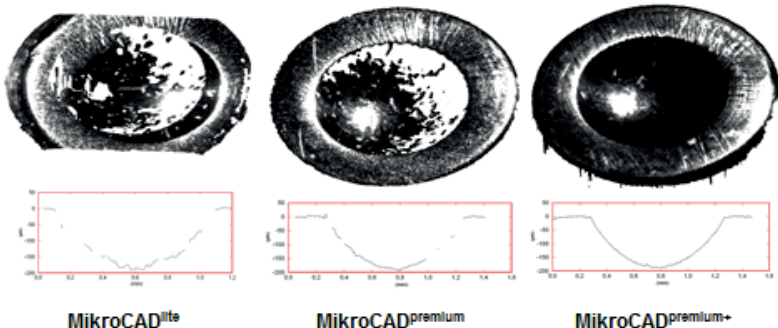
Radienwerte < 1 µm

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Vergleich von Bauteilreflexionen



Oberflächenvertiefung eines glänzenden Bauteils – Vergleich der Rohdaten



Die Messergebnisse veranschaulichen die Verbesserung der Datenqualität beim Übergang von Standardbeleuchtung über den blauen hin zum UV-Spektralbereich. Trotz Vergrößerung des Messbereiches können durch den Einsatz kürzerer Wellenlängen, angepasster Optik und Kamera bessere Ergebnisse erzielt werden und das Objekt mit starkem Glanz, konvexer Oberfläche und starken Neigungen 100%ig erfasst werden.

Radiennormale



„Radiennormal“ mit scharfer Kante:
Durch den geringen „Radius“ kann das Normal für Tests des Auflösungsvermögens bzgl. der Radienmessung an scharfen Kanten eingesetzt werden.

Measurement results

The radius, the angle and the shape deviation are the average values from the 5 measurements obtained on each cutting tool edge.

Cutting tool standard	Radius (µm)	Angle (°)	Form deviation (µm)
~ 3µm Radiennormal	0.2	89.83	0.10

Uncertainty of measurement

Radius: $U = 0.5 \mu\text{m}$
Angle: $U = 0.05^\circ$
Form deviation: $U = 0.20 \mu\text{m}$



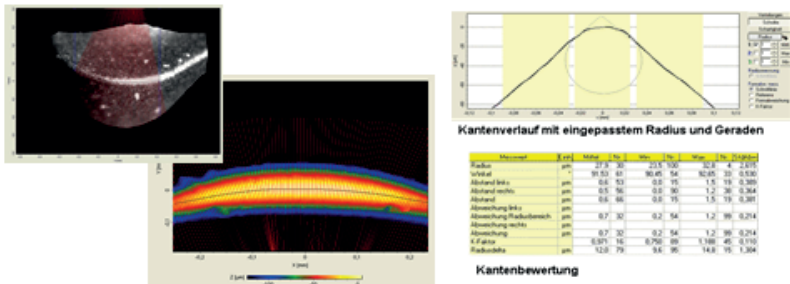
Standard Radiennormale:

...sind mit Radien von ca. 5 µm, 10 µm, 20 µm und 40 µm stehen für Systemabnahmen zur Verfügung und sind kommerziell verfügbar. Grenzen sind durch die taktile Antastung bei der Kalibrierung sowie die Fertigung der Radiennormale gesetzt. Beides führt zu Kalibrierunsicherheit von ca. 0,5 µm.



1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Radienmessung an komplexen Bauteilkanten



An komplexen Kantenverläufen, wie der oben dargestellten Kante einer WSP wird durch Verfolgung des Kantenverlaufes sichergestellt, dass alle Schnittlinien senkrecht verlaufen und keine Verkipfung oder Verdrehung des Bauteils zu systematischen Messfehlern führt.

Zusammenfassung

**Einsatz von UV Licht**

- Führt zu deutlicher Verbesserung der Systemauflösung
 - Die kürzere Wellenlänge ermöglicht es, deutlich kleinere Strukturen zu messen
 - Der erhöhte Streulichtanteil vereinfacht die Messung glänzender Bauteile

Messung von scharfen Bauteilkanten mit Radien von 1 – 10 µm

- Ist mit dem System MikroCAD premium+ möglich
- Algorithmen für die Kantenverfolgung und verschiedene Formtypen stehen zur Verfügung
- In der Fertigungskontrolle können die Messungen mit UV-Licht Zeit und Kosten im Vergleich gegenüber Messungen mit Rasterelektronenmikroskopie sparen

Kalibriernormale

- Normale mit scharfen Kanten und Radien beginnend ab ca. 5 µm sind verfügbar und werden zum Nachweis der absoluten Messgenauigkeit verwendet

Ausblick

- Die Entwicklung kann grundsätzlich hin zu noch kürzeren Wellenlängen weitergeführt werden
- Vorab können Verbesserungen an Radiennormalen sowie Vergleiche mit 3D REM Aufnahmen genutzt werden, um die absolute Messgenauigkeit der Systeme weiter zu erhöhen

Optische Darstellung von Kanten und Radien

Dipl.-Ing.(FH) Frank Stanzel

Dr. Robert Sachs

ZygoLOT GmbH Darmstadt

Im Tiefen See 58, 64293 Darmstadt

stanzel@zygolo.de

sachs@zygolo.de

Abstrakt:

In diesem Abstrakt werden zunächst ausgewählte Zygo Messungen an realen Bauteilen vorgestellt, sowohl aus der Metallverarbeitung als auch der Medizintechnik. Danach wird unter Zuhilfenahme eines Elektronenmikroskops auf einzelne Messfälle eingegangen, in dem eine deutliche Abweichung zwischen taktiler und optischer Messung zu erwarten ist. Schließlich folgt eine Zusammenfassung.



*Abbildung 1 NewView
mit Objektiven*

1.Einführung: Der Bedarf der Industrie an neuen Messmöglichkeiten zur Bestimmung von Mikrostrukturen und Mikrogeometrien steigt stetig. Aktuelle Beispiele sind in der Fertigung von Common Rail Injektoren zu finden, in der Medizintechnik bei der Fertigung von Zahnimplantaten, sowie der Werkzeugindustrie. Bei immer engeren Toleranzen sowie fallender Teilegröße nimmt der Stellenwert der flächenhaften Messung gegenüber der herkömmlichen taktilen Messung immer mehr zu. Hierzu besonders geeignet ist die mikroskopische Weißlichtinterferometrie, eine Kernkompetenz der Firma Zygo, die auf diesem Gebiet zahlreiche Patente aus über 40 Jahren Erfahrung gesammelt hat. Die NewView Produktreihe hat sich besonders in der Industrie bewährt, und wird nun von der ZeGage Reihe ergänzt.

Die interferometrische Messung erfolgt berührungslos, und hat unabhängig von der Vergrößerung immer dieselbe hohe vertikale Auflösung und Genauigkeit. Abhängig von der Strukturgröße sowie der Flankenwinkel oder Krümmungen werden Objektive mit verschiedener Vergrößerung und Öffnungswinkel benutzt. Schwer zugängliche Proben können von Objektiven mit besonders langem Arbeitsabstand (40 mm - 58 mm) gemessen werden. Die Ausrichtung des Bauteils wird optisch vorgenommen, was die Geschwindigkeit und Reproduzierbarkeit der Messung positiv beeinflusst. Weiter können in einer Messung die unterschiedlichsten Resultate angegeben werden, so z.B. Form- zusammen mit Winkel- und Lageergebnissen. Durch die hohe Anzahl der Datenpunkte gelingt es in der Regel auch, Messmittelfähigkeiten zu erzielen, die die eines taktilen Systems übersteigen.



*Abbildung 2
NewView in der
Fertigung*

2. Messergebnisse an realen Bauteilen

Im Folgenden werden drei Beispiele gezeigt, bei denen sich eine flächige berührungslose Messung besonders eignet. Im ersten Beispiel ist eine Kante entlang seiner Länge stark unterschiedlich verrundet, wodurch einzelne taktile Messungen keine statistisch aussagekräftige Werte liefern können. Im zweiten Beispiel haben wir es mit einem Kunststoffteil zu tun, wo aufgrund des Materials eine zerstörungsfreie Messung taktil schwierig ist. Das dritte Beispiel zeigt eine Bauteilstörung in Form eines Grates.

2.1 Kantenausformung an einem KFZ Pumpenbauteil

Abb. 3 zeigt schematisch ein Detail eines Pumpenbauteiles. Die Kante ist ideal dargestellt, und ist u.U. bemaßt und mit Toleranzen versehen. Die Zygo Messung zeigt, wie sich eine solche Kante in der Realität ausbildet. Entlang der Kante tauchen stark schwankende Anfangs- bzw. Endpunkte des Kantenbruches auf, so dass es schwierig sein kann, einen Radius oder Kantenbruch zu definieren.

Hierzu ist exemplarisch ein Schnittbild gezeigt, das durch eine unregelmäßige Stelle der Kante verläuft. Statistisch ist es wahrscheinlich, dass eine taktile Messung eine

solche Stelle erfasst. Im flächigen Datensatz hingegen kann der Verlauf der Kante gut erkannt werden und von seinen Störstellen unterschieden werden. Das Graubild gleicht einer gewöhnlichen Mikroskopansicht, in der die Störstellen zu sehen sind, aber nicht mit Werten zu belegbar sind.

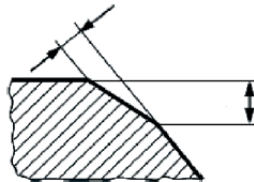


Abbildung 3 Kante

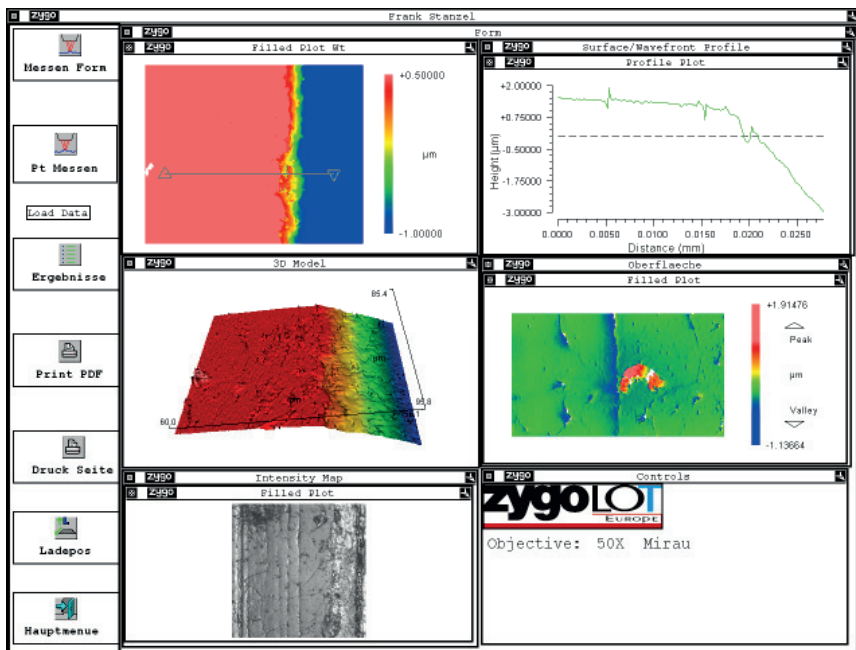


Abbildung 4 Reale Kante

2.2 Kantenformung in der Medizintechnik

Ein weiteres Beispiel aus der Medizintechnik zeigt ein PEEK Bauteil mit extremen Anforderungen an die Mikrostruktur. Hier soll die Form einer Schneidkante ermittelt

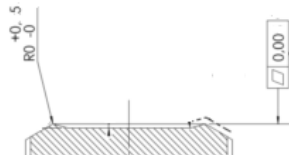


Abbildung 5 Medizintechnik Peek

werden, deren Radius und Ebenheit definiert sind. Mit einem taktilen Messgerät ist eine zerstörungsfreie Prüfung aufgrund des Materials PEEK unmöglich. Außerdem könnte der Messwert fehlerbehaftet sein, da die Diamantspitze unweigerlich in das Material eindringt. Die Lösung durch eine flächige Messung simuliert in diesem Fall viele (> 1000) virtuelle Tastschnitte, deren Maxima die Schneidkante definieren. Mit dieser Datenmenge gelingt es, verlässlich sowohl den Mittelpunkt der Kreises, sowie deren Radius und Ebenheit auszuwerten. Somit entfallen unzählige taktile Einzelmessungen und die Messung erfolgt zerstörungsfrei.

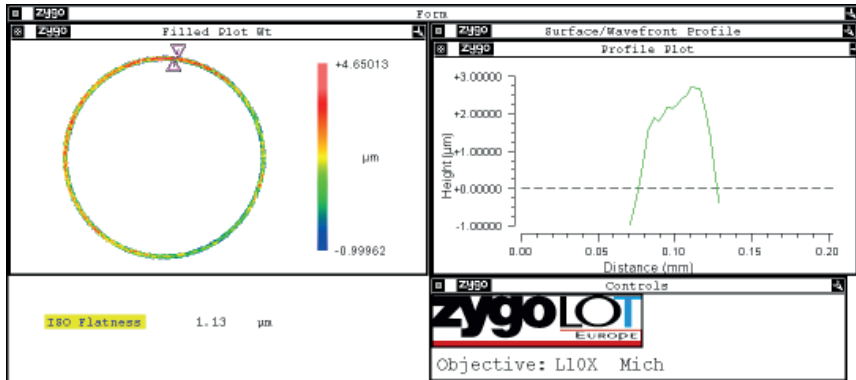


Abbildung 6 Peek Ergebnis Zygo

2.3 Ausbildung eines Grates und Fertigungsfehlers

Bei der Fertigung kleiner Bauteile und der Abfolge von einzelnen Fertigungsschritten kommt es unweigerlich zu Situationen, in denen eine Kante eben nicht dem Ideal der Zeichnung entspricht, sondern abweichende Strukturen aufweist. Das folgende Bild zeigt eine Aufnahme mit einem PhenomTM Elektronenmikroskop.



Abbildung 7 PhenomTM Grat

Es sind hier durch Maschineneinstellungen verursachte Ausbrüche zu erkennen. Für ein Tastschnittgerät oder auch ein NewView ist es nicht möglich, die Ausbrüche in dieser Auflösung als solche zu erkennen. Allerdings ist es mit einem Elektronenmikroskop nur möglich den Ausbruch sichtbar zu machen. Ein umlaufender Grat ist nicht festzustellen und es ist nicht möglich, den Grat zu quantifizieren. Dazu ist ein Weisslichtinterferometer sinnvoll. Allerdings ist hier wieder die Wahl des Objektives zu beachten und die Lage des Werkstücks, bzw. der Kante zum Objektiv. Bei geeigneter Formkorrektur oder Formabzug kann ein Grat dargestellt und vermessen werden.

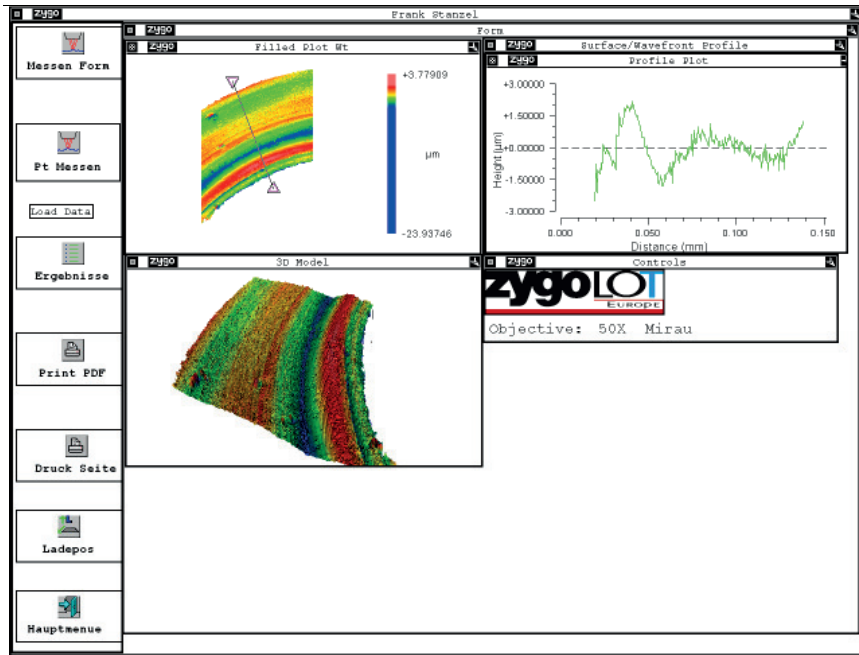


Abbildung 8 Zygo Grat

Die Messung des Grates erfolgte als Segment mit einem 50x Objektiv. Danach wurde die Form des Bauteiles herausgerechnet, um den Grat visuell herauszuarbeiten. Anhand eines einzelnen Schnittes ist es nicht möglich zu erkennen, dass der Grat umlaufend an dem Bauteil vorhanden ist. Mit einem schnellen automatischen Objektivwechsel kann ein 10x Objektiv verwendet werden. Damit kann eine Übersicht geschaffen werden. Es ist möglich die gleiche Stelle zu finden, an der der Ausbruch mit dem Elektronenmikroskop gefunden wurde. Nur ist der Ausbruch schwierig als solcher zu erkennen, er wird mehr als Störung der gesehen. Auf dem Übersichtsbild des Bauteiles ist der Grat zu erkennen und es ist deutlich zu sehen, daß er nicht umlaufend ist.

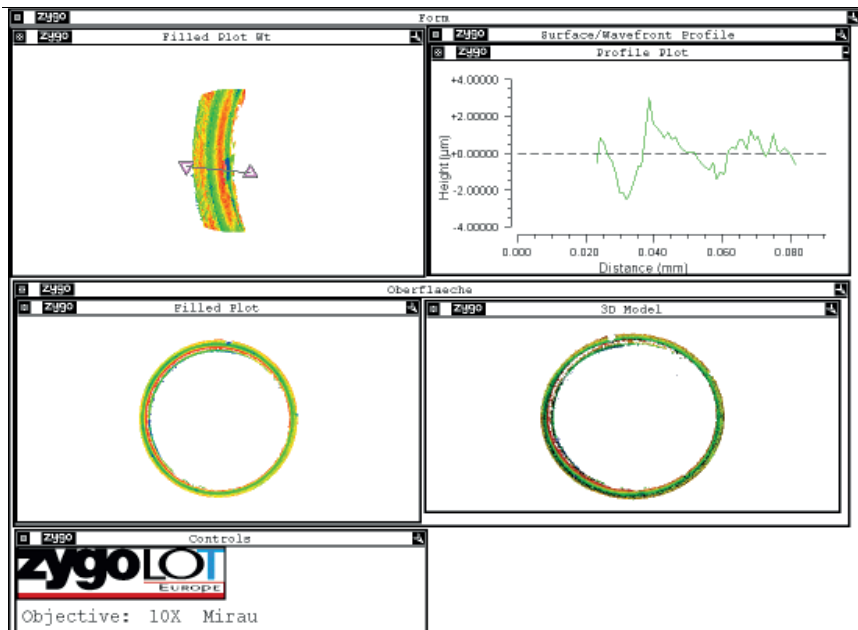


Abbildung 9 Zygo Grat Übersicht

2.4 Betrachtung einer taktilen Schnittlinie in weichem Material

ZygoLOt und die Hochschule Magdeburg-Stendal haben erfolgreich ein Kooperationsprojekt abgeschlossen, das eine optimale Vergleichbarkeit zwischen taktil und optisch ermittelten Rauheitskenngrößen hergestellt hat. Im Zuge dieses Projekts haben detaillierte Untersuchungen auch gezeigt, wie sich eine Tastspitze im mikroskopischen Bereich verhalten kann, wodurch unsere Erkenntnisse physikalisch untermauert werden.

In Abb. 9 sind auf einer weichen, kreuzgeschliffenen Fläche die vertikalen Spuren einer Tastspitze sichtbar. Es stellt sich heraus, dass die Tastnadel durch Riefen über eine gewisse Strecke eingefangen wird, während sie von Spitzen abgelenkt wird. Es ist auch anzunehmen, dass die Tastnadel nach dem Verweilen in einer Riefe elastisch über die benachbarte Erhöhungen springt. Durch die Summe dieser Effekte muss man von taktilen Messungen einen systematisch niedrigeres Rauheitsergebnis erwarten als es real existiert.

Diese Vermutung deckt sich auch mit unseren Erkenntnissen. Es stellte sich heraus, dass bei optischen Messungen am Rauhnormal, DIN-konforme Filterungen den Istwert des Normals reproduzieren. An realen Bauteilen jedoch war es nötig, die

Filterung einheitlich zu verstärken, um über alle Materialien und Bearbeitungsarten eine konsistente Übereinstimmung zu den taktilen Werten zu erreichen. Das reale Verhalten der Tastnadel an Oberflächen ohne Vorzugsrichtung kann dieses Ergebnis erklären.

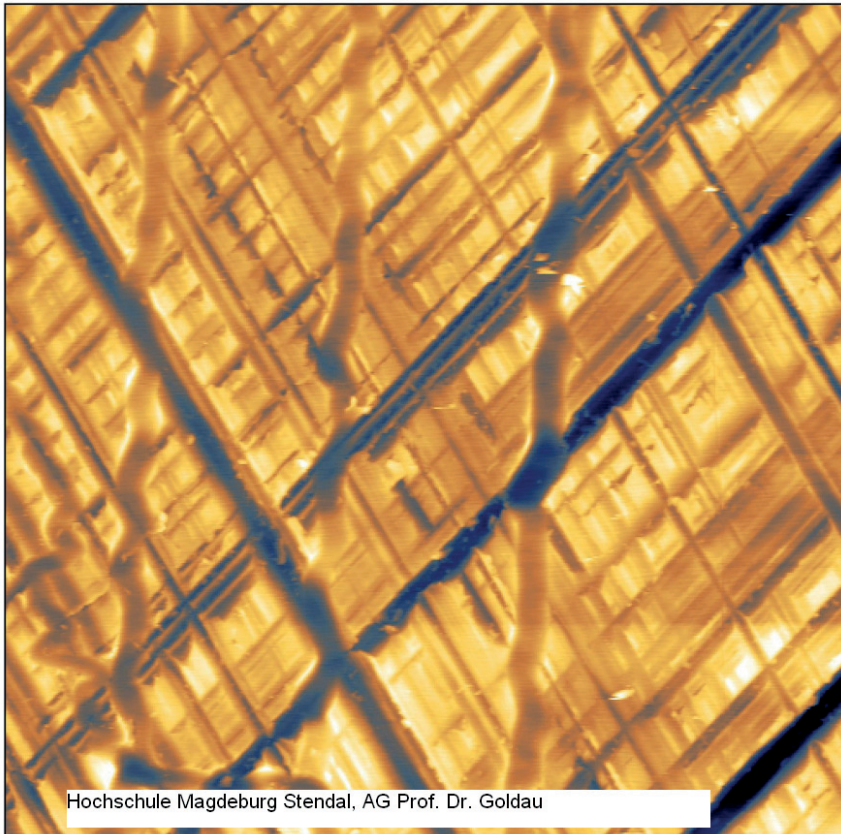


Abbildung 10 Abdruck und Verlauf einer Tastspur

3.Quellen:

[1] Hochschule Magdeburg Stendal

[2] Phenom™

[3] ZygoLOT GmbH

Automatisierte Kantenradienmessung und -Auswertung

Dr. Rolf Klöden

microspace Messtechnik GmbH

Otto-Schmerbach-Str. 19, 09117 Chemnitz

rolf.kloeden@micro-space.de

Abstrakt: Um im Funktionsfall Kerbwirkungen an technischen Bauteilen in Kantenbereichen zu vermeiden ist es notwendig, diese Merkmale mit einer ausreichend abgerundeten Geometrie zu versehen. Konstruktionseitig erfolgt dies durch die Bemaßung und Tolerierung mit Radien. In der Praxis ist die Messung dieser oft sehr kleinen Radien mit großen Messunsicherheiten behaftet. Eine alternative Tolerierung mit Rundheits- oder Profilformtoleranzen ist kein Garant für die Vermeidung von spitzen Kantengeometrien. Die in der Norm beschriebene Tolerierung der Oberflächenrauheit unter Nutzung der morphologischen Filterung bietet hier eine elegante Lösung zur Vermeidung scharfkantiger Geometrien und somit zu kerbwirkungsfreien Oberflächen. Durch die intelligente Kombination der damit gewonnenen Oberflächenparameter lässt sich einfach und automatisierungsfreundlich eine Vielzahl von Informationen zur funktionsrelevanten Beurteilung der Kantengeometrie gewinnen. Der Beitrag zeigt neben den mess- und auswertetechnischen Möglichkeiten auch Lösungen für Zeichnungseintragungen zur Umsetzung der aufgezeigten Variante der Kantenbemaßung bzw. -tolerierung.

1. EINLEITUNG

Mit der Spezifikation von Kantenradien wird eine Vielzahl von Funktionseigenschaften gesichert. So soll die Minimierung von Kerbwirkungserscheinungen bei dynamisch hochbelasteten Bauteilen verbessert werden. Die Tolerierung der Kantengeometrie wird im Wesentlichen auf die Zeichnungsangabe des Radius beschränkt. Diese Tolerierungsart trägt in der Vielzahl von Anwendungsfällen den eigentlichen funktionellen Besonderheiten nur wenig Rechnung. Es ist deshalb notwendig, auch in der Tolerierung der Kantenradien entsprechend der zu erzielenden Funktionen Neuland zu betreten, das sich insbesondere durch Neuerungen in der internationalen Normung eröffnet.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

2. TOLERIERUNG UND MESSUNG VON KANTENRADIEN

Die klassische Tolerierung von Kantenradien erfolgt mit der Zeichnungseintragung wie sie in Bild 1 zu sehen ist. Nach Erfassung der Kanten geometrie am realen Körper mit Hilfe eines Konturscans ist deutlich zu erkennen, dass der Makrogeometrie kurzwellige Anteile überlagert sind. Zur Bestimmung des Radius wird standardmäßig ein mittleres Element (Gaußelement) als Kreisbogen in die Kontur eingelegt und somit der Radius dieses Gaußelementes bestimmt (Bild 2).

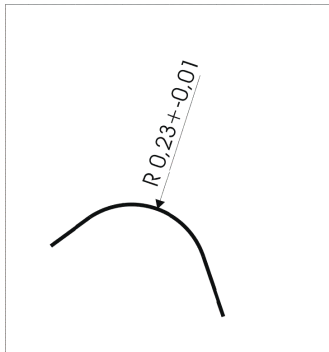


Abbildung 1: Zeichnungseintragung Radiustolerierung

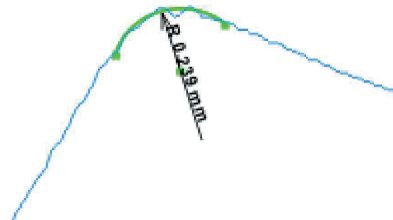


Abbildung 2: Radiusbestimmung über Gaußelement

Die Größe des ermittelten Radius wird zum einen bestimmt aus der Verteilung der erfassten Messpunkte, die entsprechend der kurzwelligen Anteile mehr oder weniger streuen und zum anderen von der Größe des Suchfensters. Das heißt, dass durchaus Anteile der geraden Elemente, die sich an den Kreisbogen anschließen, mit in die Radienbestimmung einfließen können. Da besonders bei der manuellen Auswertung des Profilschans die Übergangsbereiche von den Geraden in den Radius und aus dem Radius heraus in die Gerade nicht exakt definiert werden können, führt dies immer wieder zu erheblichen Messunsicherheiten, die das Gesamtergebnis sehr fragwürdig gestalten. Aus diesem Grund ist es sinnvoller, die Radiengeometrie über eine Rundheitstoleranz einzuschränken. Hierbei wird geprüft, ob sich die jeweiligen Messpunkte des Scans innerhalb der Toleranzzone befinden, die als Kreisbögen zweier konzentrischer Kreise mit einem radialen Abstand in Größe der Toleranz gebildet wird (Bild 3). Da sich die Rundheitstoleranz nur auf den Kreisbogen bezieht, bleiben die angrenzenden Elemente der beiden Geraden unberücksichtigt. Aus diesem Grund wäre eine verbesserte Tolerierung über die Profilformtoleranz zu erreichen (Bild 4).

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

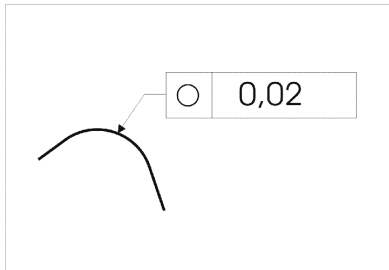


Abbildung 3: Rundheitstoleranz

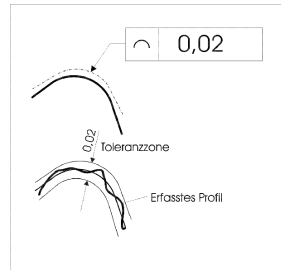


Abbildung 4: Profilformtoleranz

Hierbei ist es unerheblich, aus wie vielen Geometrieelementen die Kanten-geometrie zusammengesetzt wird, da hier immer das Gesamtprofil in die Betrachtung einfließt. Die Toleranzzone wird als symmetrische Toleranzzone um das Nennprofil erzeugt. Insbesondere für die automatisierte Auswertung des Messergebnisses ist ein Nennprofil in Form eines CAD-Datensatzes notwendig, mit Hilfe dessen eine Bestfit-Anpassung der Messpunkte an dieses Nennprofil durchgeführt wird. Diese Bestfit-Anpassung bringt die erzeugten Messpunkte entsprechend des Gaußkriteriums, dass die Summe der Abstandsquadrate ein Minimum werden muss, so nah wie möglich an das Nennprofil heran. Danach kann geprüft werden, ob sich alle Messpunkte innerhalb der Toleranzzone befinden, die symmetrisch um dieses Nennprofil in Größe der angegebenen Toleranz aufgebaut wird. Die Auswertung der Profilform bietet hierbei eine geringere Messunsicherheit und eignet sich wesentlich besser für die Automatisierung des gesamten Messprozesses. Nachteilig bei diesem Verfahren ist u.a., dass durch die Bildung der Toleranzzone um das Nennprofil eine spezielle Struktur der Kanten-geometrie, die kerbwirkungsrelevante Nachteile mit sich bringt, nicht in Gänze verhindert werden kann. Das heißt, die Formtoleranzen begrenzen langwellige Abweichungen, die kurzwelligen kerbwirkungsrelevanten Gestaltsanteile bleiben dabei unberücksichtigt. Innerhalb der Toleranzzone können weiterhin Spitzen und Kerben auftreten, die die Funktion bei dynamisch hoch beanspruchten Bauteilen negativ beeinflussen können.

3. RAUHEITSBEZOGENER ANSATZ ZUR TOLERIERUNG UND MESSUNG VON KANTENRADIEN UNTER NUTZUNG MORPHOLOGISCHER FILTERUNG

Um die unter 2. aufgezeigten Nachteile der verschiedenen Tolerierungsmöglichkeiten der Kanten-geometrien, insbesondere Kantenradien, zu vermeiden, wird bei der aufzuzeigenden Methode ein Ansatz gewählt, der die kurzwelligen Anteile des Profils in den Vordergrund stellt, da diese bei der Tolerierung von Kantenradien den wesentlichen funktionsrelevanten Anteil darstellen. Es geht

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

deshalb darum, die Tolerierung und Auswertung der kurzwelligen Gestaltsanteile zu realisieren. Somit wird ein rauheitsbezogener Ansatz gewählt. Funktionsbezogen erweist sich für die Trennung von langwelligen und kurzwelligen Anteilen der Kantenradiengestalt das morphologische Filter als vorteilhaft. Das in ISO/TS 16610-41 definierte morphologische Filter erschließt die Möglichkeit über Dilatation und Erosion einen morphologischen Öffnungsfiler zur Anwendung zu bringen, der in dem im Bild 5 dargestellten Beispiel die untere Hüllkurve von der Materialseite an das Profil der dargestellten Kanten geometrie anlegt.

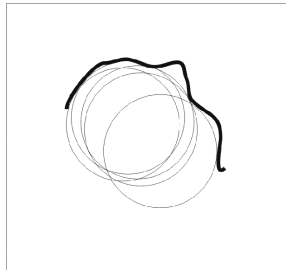


Abbildung 5: Morphologische Filterung

Das gefilterte Profil (langwelliger Anteil) ergibt sich aus der Bahnkurve des Mittelpunktes eines Kreises der unterhalb dieses Profils von der Materialseite abgerollt wird, korrigiert um den Radius der Kreisscheibe. Der Radius dieser Kreisscheibe stellt dabei den entscheidenden Filterparameter dar. Somit wird bei größeren Radien der Kreisscheibe ein stärkerer Filtereffekt erzielt als bei kleineren Radien. Hätte die Kanten geometrie, bestehend aus Gerade, Kreisbogen, Gerade eine Ideal geometrie, d.h. der kurzwellige Anteil ist Null und der Filterparameter als Radius der abzurollenden Kreisscheibe entspricht genau dem Radius der in der Kanten geometrie spezifiziert ist, würde sich als gefiltertes, langwelliges Profil diese Ideal geometrie zu 100% abbilden. Da bei dem rauheitsbezogenen Ansatz der funktionswichtige kurzwellige Anteil der Kanten geometrie ausgewertet werden soll, wird allerdings nicht der gefilterte langwellige Anteil betrachtet sondern die „Restinformation“ des Profils, die sich aus der morphologischen Filterung ergibt. Abweichungen von dieser Ideal geometrie in Form kurzwelliger Anteile, Kerben und Spitzen ergeben sich somit als Information innerhalb des Restprofils in Form von erhöhten Spitzenwerten. Bild 6 zeigt eine reale Messinformation, die nahezu ideal ist. Im oberen Teil des Bildes ist der Profils scan ungefiltert zu sehen, im unteren Teil ist nach der morphologischen Filterung der kurzwellige Anteil abgebildet. Abgesehen von einem geringen Rauschen der Oberfläche ist dieser kurzwellige Anteil nahezu zu vernachlässigen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

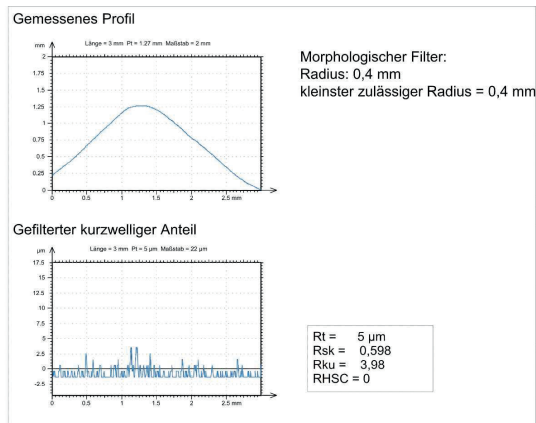


Abbildung 6: Kantengeometrie ohne Auffälligkeiten

Im Bild 7 ist dagegen eine Kantengeometrie zu sehen, die deutlich eine Kerbe im Radiusbereich aufweist. Diese Kerben und Spitzen sind im unteren Teil nach der morphologischen Filterung im kurzwelligen Anteil deutlich als Spitzen innerhalb des kurzwelligen Profils zu erkennen.

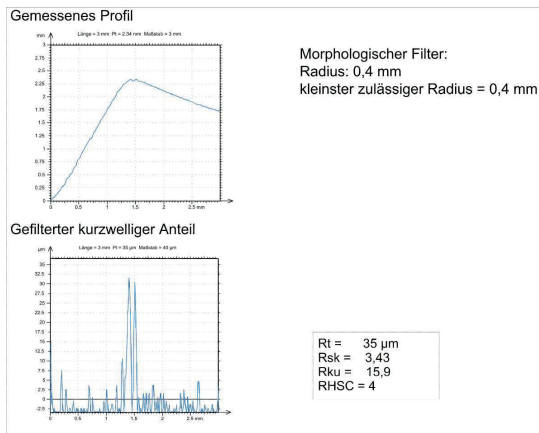


Abbildung 7: Kantengeometrie mit Kerbe

Auch eine unzureichend abgerundete Kante, wie sie im Bild 8 zu erkennen ist, liefert ein entsprechend signifikantes Signal nach der morphologischen Filterung und der Auswertung des kurzwelligen Anteils.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

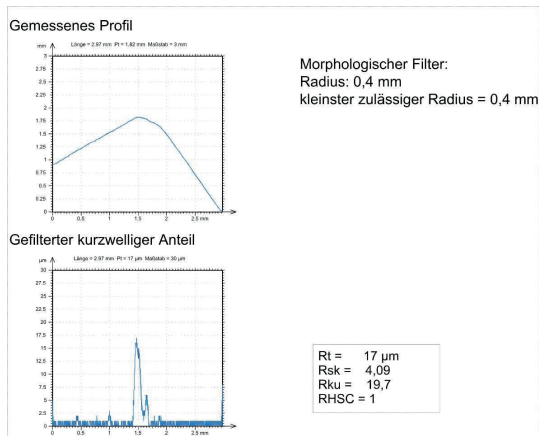


Abbildung 8: Kanten geometrie mit zu geringem Radius

Bei diesen Beispielen wurde von einem Nennradius mit 0,4 mm ausgegangen. Entsprechend des Nennradius ist auch der morphologische Filter zu wählen, da es sonst zu Fehlinterpretationen führen kann. Bild 9a und 9b zeigen diesen Sachverhalt. In Bild 9a ist eine nicht abgerundete Kanten geometrie mit einem morphologischen Filterradius von 1 mm ausgewertet wurden. Deutlich sind an den Kanten die zwei Spitzen innerhalb des kurzwelligen Profils zu sehen. Im Bild 9b wurde der Filterparameter Radius auf 0,2 mm reduziert, was eventuell im Praxisfall durchaus ein zulässiger Wert sein könnte. Im unteren Teil des Diagramms ist zu erkennen, dass abgesehen von einem geringen Rauschen, kein signifikantes Signal für eine Abweichung auftritt.

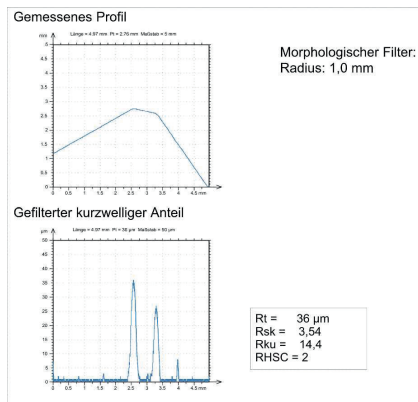


Abbildung 9a: Kanten geometrie mit geringer Rundung

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

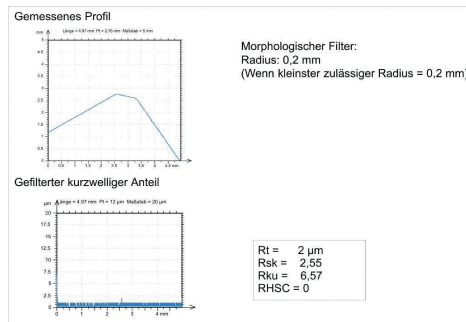


Abbildung 9b: Kantengeometrie mit geringer Rundung

Bei der automatisierten Messung und insbesondere automatisierten Auswertung der Kantengeometrien kommt es darauf an, die im Bild 7 bis 9 dargestellten Beispiele entsprechend zu quantifizieren und mit Parametern in Form von Zahlenwerten zu untersetzen. Anhand des kurzwelligen Profils können nun Rauheitsparameter zur Anwendung kommen, die die entsprechenden signifikanten Signale charakterisieren und quantifizieren. Im Bild 7 bis 9 kommen hierbei insbesondere R_t , der einen maximalen Spitzenwert charakterisiert und RHSC, der die Anzahl der Spitzen in einem bestimmten Niveau ermittelt, zur Anwendung. In einer Vielzahl von Fällen sind diese Werte, insbesondere R_t vollkommen ausreichend um eine Bewertung hinsichtlich der Einhaltung von Toleranzen vornehmen zu können. An diesen wenigen Beispielen ist bereits zu erkennen, dass über eine gewisse Anzahl von verschiedenen Rauheitsparametern bei der Auswertung des kurzwelligen Anteils nach der morphologischen Filterung durchaus die Möglichkeit besteht, funktionsbezogen Charakterisierung der Kantengeometrie durchzuführen.

4. VORTEILE DER RAUHEITSBEZOGENEN AUSWERTUNG

Bei der Messung und Auswertung nach dem rauheitsbezogenen Ansatz ergeben sich eine ganze Reihe von Vorteilen, besonders bei der Anwendung innerhalb der automatisierten Messung und Auswertung von Kantengeometrien:

- 1 Unabhängig von der Nenngeometrie (u.a. Anzahl der Radian) ist eine Erkennung von kerbwirkungsrelevanten kurzwelligen Gestaltsanteilen möglich.
- 2 Über R_t ist u.a. eine Parametrisierung der Abweichung und Toleranz möglich. Dies ist die Voraussetzung für eine automatisierte Messung und Auswertung.
- 3 Die Auswertung bzw. die Ermittlung der Parameter erfolgt ohne subjektive Einflüsse des Bedieners.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

- 4 Der kleinste zulässige Radius ist gleichzeitig Filterparameter für die angewendete morphologische Filterung.
- 5 Die Auswertung ist unabhängig von der Größe des Scans.
- 6 Es wird kein Solldatenfile (CAD-Datei) benötigt.
- 7 Die Auswertung erfolgt unabhängig von der Lage des Scans.

5. NORMENGERECHTE ZEICHNUNGSEINTRAGUNG NACH DEM RAUHEITSBEZOGENEN ANSATZ

Soll nach dem rauheitsbezogenen Ansatz die Kanten geometrie gemessen und ausgewertet werden, so ergibt sich die Notwendigkeit, innerhalb der Spezifikation bereits zielgerichtete Zeichnungseintragungen durchzuführen. Da bei dem rauheitsbezogenen Ansatz nicht die Geometrie bzw. Form der Kante für die Funktion von Bedeutung ist, sondern im Wesentlichen überprüft wird, ob der kurzweilige Anteil innerhalb seiner Toleranzgrenzen liegt, hat die Zeichnungseintragung über die Rauheitsspezifizierung zu erfolgen. In der neueren Normung ist dies über die DIN ISO 1302 im Zusammenhang mit der ISO/TS 16610-41 optimal zu lösen. Bild 10 zeigt ein Beispiel, wie dies in den vorangegangenen Bildern zur Anwendung kommen könnte.

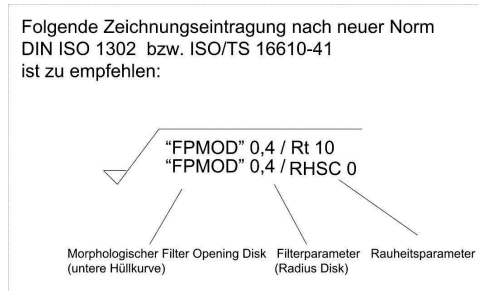


Abbildung 10: Zeichnungseintragung für Tolerierung der Kanten geometrie

Selbstverständlich ergeben sich gemäß den funktionellen Erfordernissen eine ganze Fülle von Tolerierungsmöglichkeiten, die die verschiedensten Rauheitsparameter in diesem Zusammenhang mit zur Anwendung bringen können. Um diesen Weg beschreiten zu können, ist ohne Zweifel ein geringes Umdenken innerhalb der Konstruktion bei der Zeichnungserstellung und Tolerierung der Merkmale notwendig. Allerdings handelt es sich hierbei nicht um völlig neue Dinge, sondern hier wurden lediglich bereits genormte Verfahren, Kenngrößen und Zeichnungseintragungsmethoden entsprechend kombiniert und sinnvoll zur Anwendung gebracht. Dies ist Handwerkszeug für den Konstrukteur, für die Fertigung als auch für die Qualitätssicherung und bedarf keiner neuen Denkstrukturen.

Messung von Radius und Kantenbruch mit Multisensor-Koordinatenmesstechnik

Ralf Christoph, Ingomar Schmidt

Werth Messtechnik GmbH,
Siemensstraße 19, 35394 Gießen
mail@werth.de

Abstrakt: Verschiedene optische und taktile Sensoren für Multisensor-Koordinatenmessgeräte sind für die Messung von Kleinradien, wie Schneidkantenradien, sowie von Kantenbrüchen an Fertigungsteilen geeignet. Optische Verfahren hierfür sind konfokale Mikroskopie, Fokusvariationen und Laserabstandssensoren. Durch den Werth 3D-Fasertaster sind auch taktile Messungen mit kleinsten Antastkräften und höchster Auflösung möglich. Im Vortrag werden die Grundprinzipien der verschiedenen Sensoren sowie Messergebnisse zum Vergleich der metrologischen Leistungsfähigkeit der verschiedenen Sensoren aufgezeigt. Gleichfalls wird ein Auswerte-Verfahren zur automatischen Bestimmung von Radian und Kantenbrüchen an Praxisbeispielen vorgestellt.



1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



Inspector® - 1987

Multisensor-Koordinatenmessgerät mit Bildverarbeitung und Laser

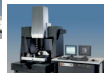
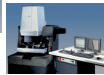


VT-A-6-4-0244_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



Gerätespektrum



Optisch → taktil → taktil-optisch → tomografisch

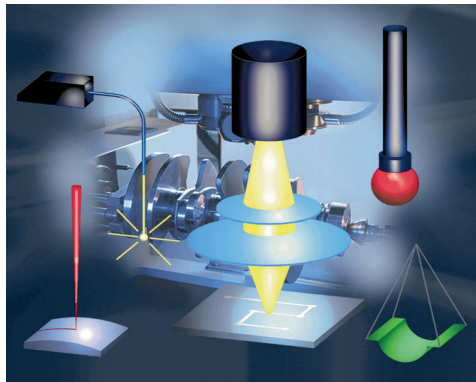
MPE E von 5 µm bis 0,15 µm

Messbereiche von 50 x 50 mm bis 3500 x 1500 x 800 mm

VT-A-6-12-0331_D

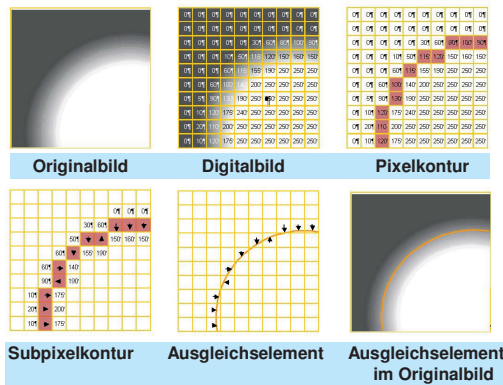
Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



VT-A-7-6-0416_E

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



VT-A-6-2-0081_D

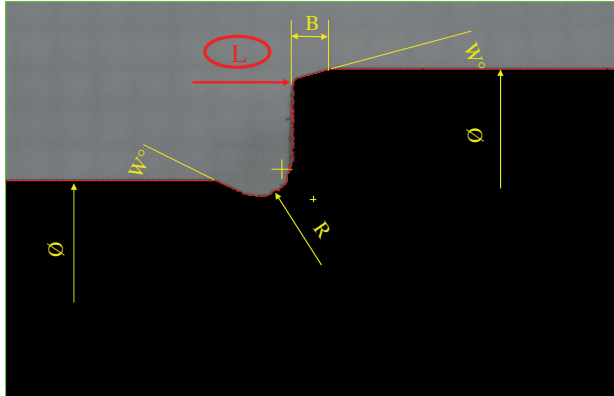
Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



Kantenbruchmessung an Wellen

Einstich an Welle, gemessen mit Bildverarbeitung



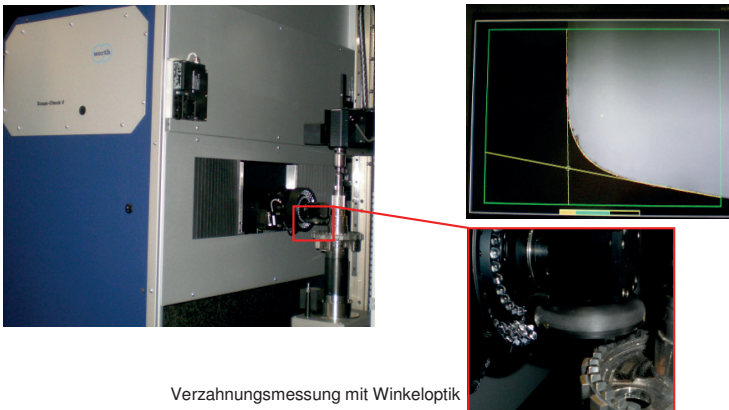
VT-A-6-3-0202_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



Kantenbruchmessung an Wellen

Innenradius, gemessen mit Bildverarbeitung



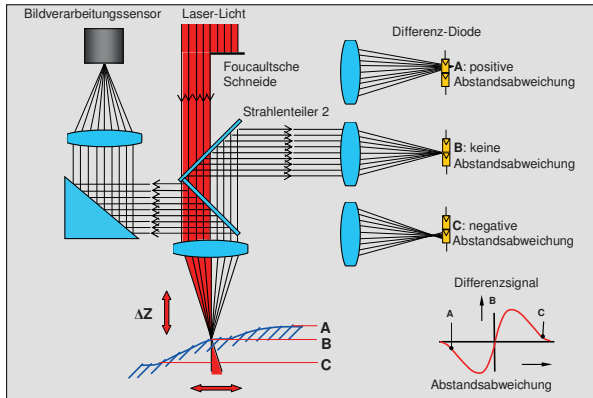
Verzahnungsmessung mit Winkeloptik

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian



Laserabstandssensor - WLP

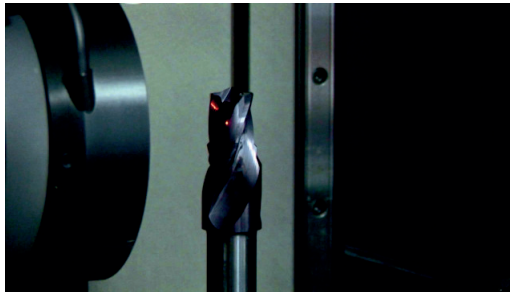


VT-A-5-2-0097_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



Radianmessung an Werkzeugen mit WLP



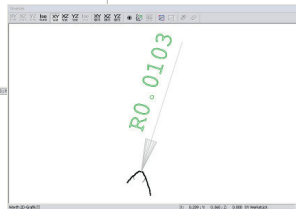
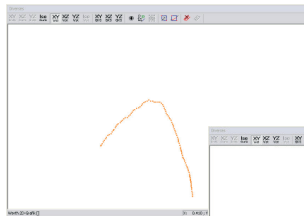
Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



Schneidkantenradius 2-Schneiden - Bohrer

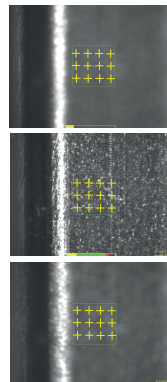
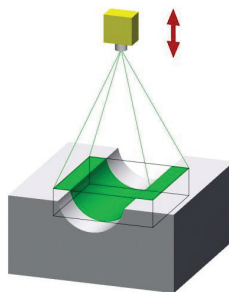
Scanning Schneidradius mit WLP



Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



Fokusvariation - 3D-Patch



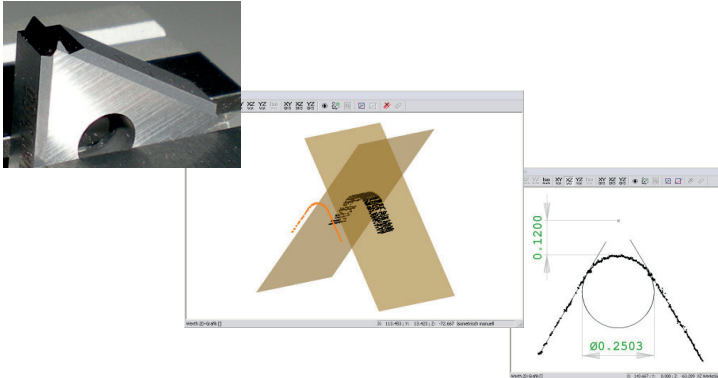
VT-A-11-09-0639_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

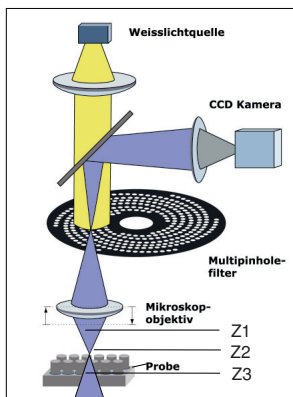
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

**Kantenradiusmessung Wendeschneidplatte**

Flächenhafte Messung mit 3D-Patch



Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

**Konfokaler Sensor - Nano Focus Probe**

	nicht konfokal	konfokal		
		Scheibenposition 1	Scheibenposition 2	Scheibenposition 3
unscharf Z1				
scharf Z2				
unscharf Z3				

VT-A-8-6-00454_D

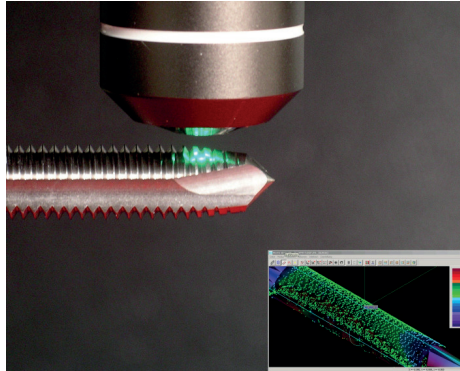
Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



Kopfradius Gewindebohrer

Messung mit NFP

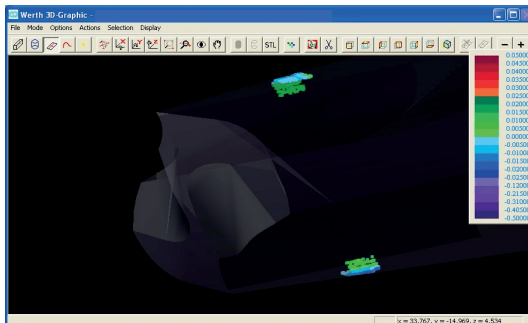


Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



Schneidkantenradius Werkzeug

Messung mit NFP

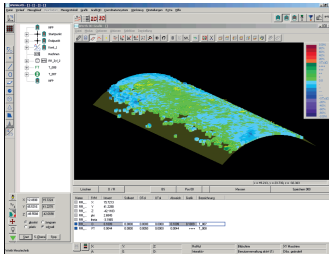


Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

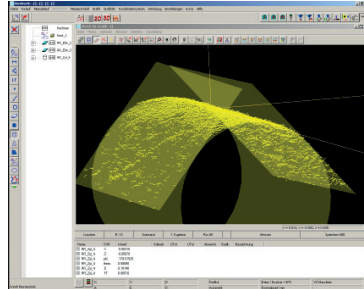
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

**Schneidkantenmessung Werkzeug**

Form- und Geometriemessung mit Nano Focus Probe



Farbkodierte Abweichungsdarstellung

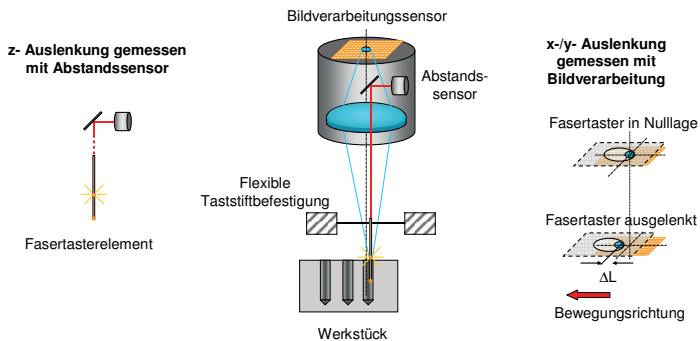


Bestimmung von Maßen an der Schneidkante

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

**Werth 3D-Fasertaster WFP**

Funktionsprinzip



Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



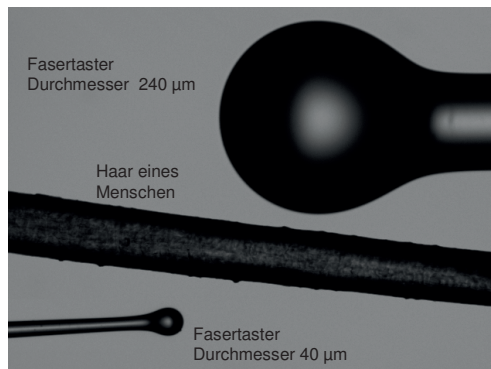
Werth 3D-Fasertaster WFP



Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



Werth Fasertaster WFP Dimensionsvergleich



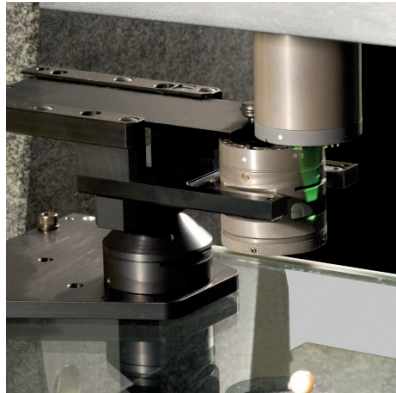
VT-A-11-11-0088_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

**Werth 3D Fasertaster WFP**

Taststiftwechsler

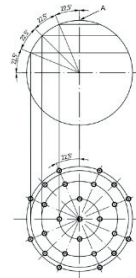
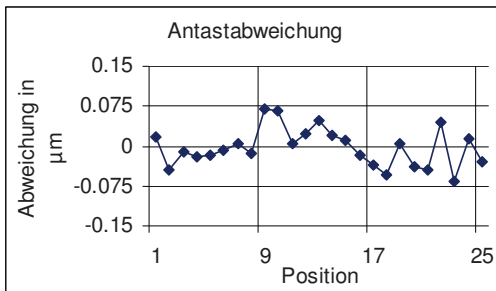


VT-A-11-11-0658_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

**Werth 3D-Fasertaster**

Antastabweichung



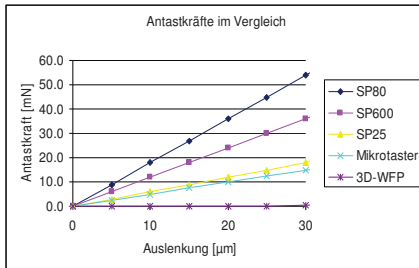
Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



Werth 3D Fasertaster WFP

Antastkraft



Taster	Antastkraft bei 30 µm Auslenkung, in mN
Renishaw SP80 *	54
Renishaw SP600 *	36
Renishaw SP25*	18
typischer Mikrotaster nach taktil-elektrischem Prinzip	15
3D-Fasertaster	0,21

Faktor 70

*Renishaw product brochure H-1000-5053-19-A

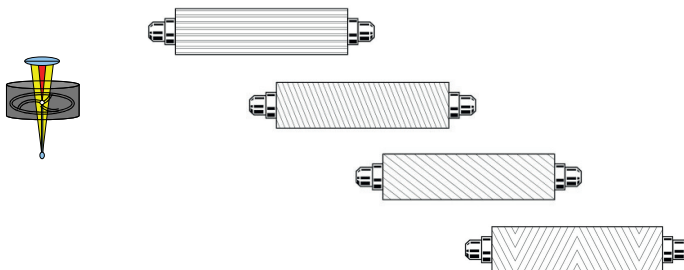
VT-A-11-11-0659_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



Werth 3D Fasertaster WFP

Anwendung Nutprofilmessung an Walzen



Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian



Werth 3D Fasertaster WFP

Anwendung Nutprofilmessung an Walzen

Messobjekt: Nutprofil einer Walze

3D-WFP-Parameter:

Nuttiefe: 140 μm

Nutbreite: 80 μm

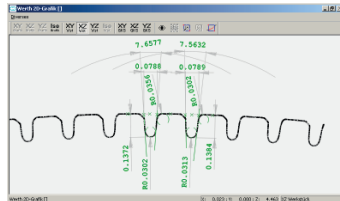
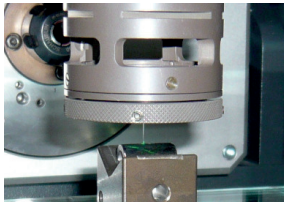
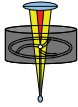
Radius in der Kehle: $30\text{ }\mu\text{m}$

Geregeltes Scanning XZ

Tastkugeldurchmesser: 40 μm

Sollauslenkung: 10 μm

-> Antastkräfte: ca. 0,1 mN



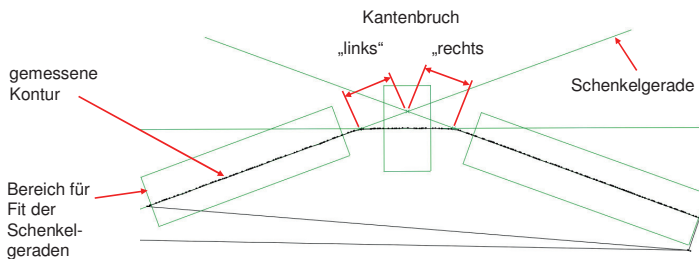
VT-A-11-09-0651_D

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



Kantenbruchmessung mit Werth Multisensorik

Definition und Auswertestrategie Kantenbruch



- Definition Kantenbruch: nach Vorgabe eines großen deutschen Automobilzulieferers
- Auswertung:
 - Verfolgung Konturverlauf/Konturrichtung
 - automatische Festlegung des Bereiches für Schenkelgeraden-Fit

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

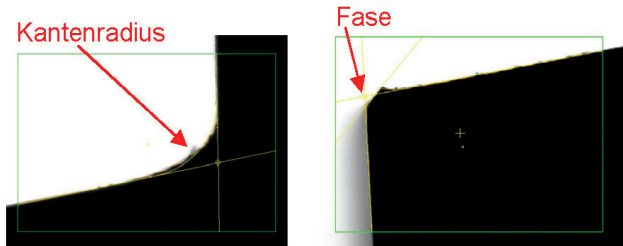
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian



Kantenbruchmessung mit Werth Multisensorik

Beispiel: Bildverarbeitung

Geometrie und Größe des Kantenbruchs im Messfenster werden automatisch erkannt und gemessen



Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

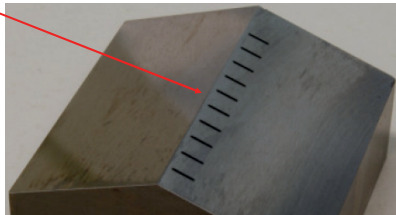


Kantenbruchmessung mit Werth Multisensorik

Vergleich der Sensoren an Normalen

Bosch – Kantenbruchnormal^{*)} mit nahezu idealem Kantenbruch

- Kantenbruch (links/rechts): von 0 bis ca. 200 µm entlang der „schrägen Dachkante“ ansteigend



^{*)} mit freundlicher Genehmigung der Robert Bosch GmbH

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

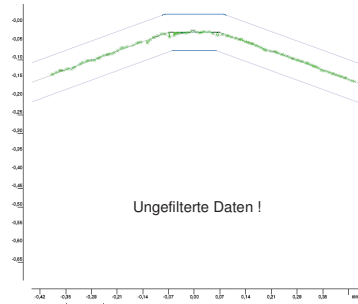
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian



Kantenbruchmessung mit Werth Multisensorik

Kalibrierung mit Werth Fasertaster

- Kantenbruch (links/rechts): ca. 76 / 74 μm
- Vergleich gegen CAD:
Toleranzband +/- 5 μm
- Überhöhung 10fach

[illegible]

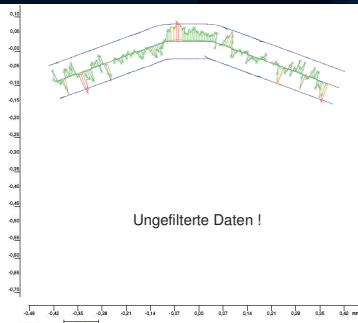
Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



Kantenbruchmessung mit Werth Multisensorik

Messung mit Werth 3D-Patch

- Kantenbruch (links/rechts): ca. 60 / 68 μm
- Vergleich gegen CAD:
Toleranzband $\pm 5 \mu\text{m}$
- Überhöhung 10fach

[illegible]

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

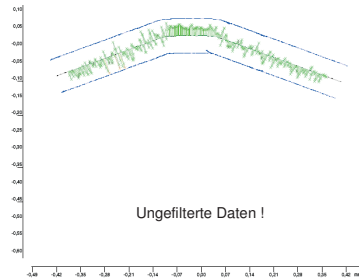
1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



Kantenbruchmessung mit Werth Multisensorik

Messung mit Werth NFP (Nano Focus Probe)

- Kantenbruch (links/rechts): ca. 66 / 68 μm
- Vergleich gegen CAD:
Toleranzband +/- 5 μm
- Überhöhung 10fach

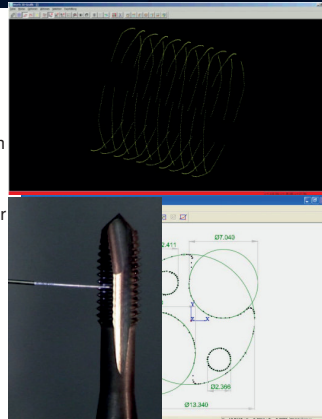
[illegible]

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de



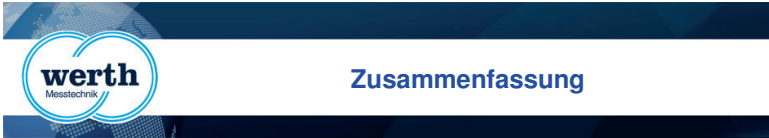
Kantenbruchmessung mit Werth Multisensor-Koordinatenmessgeäten

- Reproduzierbare Messpositionen in Werkstückkoordinaten und damit reproduzierbare Messergebnisse
- Ergebnisse an unterschiedlichen Messstellen in einem CNC-Lauf
- Ergebnisse der verschiedenen Sensoren kombinierbar
- Kalibrierung optischer Sensoren durch Werth Fasertaster
- Messung weiterer Geometrie-Merkmale im gleichen Koordinatensystem



Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien



Multisensor-Koordinatenmessgeräte mit taktilen und optischen Sensoren sind für die Radien- und Kantenbruchmessung, auch an Mikrogeometrien sehr gut geeignet:

- **Bildverarbeitungssensoren:**
 - schnelle Profil-Messung im Durchlicht und Auflicht
- **Fokusvariation - Werth 3D-Patch:**
 - Flächenhafte Messung schnell und kostengünstige
- **Konfokales Verfahren - Nano Focus Probe:**
 - hochgenaue Messungen auch an kleinsten Geometrien
- **Werth Fasertaster:**
 - präzise taktile 3D - Messungen
 - Kalibrierung optischer Verfahren

Multisensorkoordinatenmessgeräte ermöglichen häufig die optimale Lösung

Werth Messtechnik GmbH Siemensstr. 19 35394 Giessen Germany Tel. +49 (0)641 79380 Fax +49 (0)641 7938-719 www.werth.de

XIII. Internationales Oberflächenkolloquium Scannen und Auswerten mit KMT zur Reibtiefenmessung und Aufzeigen weiterer praktikabler Lösungen für Kanten- und Radienmessungen

Wanner, Josef

Carl Zeiss IMT GmbH, Oberkochen

E-Mail: j.wanner@zeiss.de

Abstrakt: Kanten- und Radienmessung ist ein bisher in der Normung nicht umfassend abgehandeltes Gebiet. In der Praxis der Koordinatenmesstechnik (KMT) sowie in der Konturmesstechnik haben sich Erfassungs- und Zuordnungsverfahren etabliert zur Verifizierung von Kanten und von Übergängen an Bauteilen. Dieser Beitrag stellt ein neues Verfahren zur Ermittlung der Reibtiefe in Bohrungen vor sowie einige weitere praktikable und etablierte Lösungen für die Kanten- und Radienmessung. Durch den teilweise fehlenden normativen Hintergrund besteht allerdings Interpretationsspielraum hinsichtlich bestehender Zeichnungseinträge, der sich negativ auf die Vergleichbarkeit der Messergebnisse auswirken kann.

1. ERFASSUNGSSTRATEGIEN FÜR GEOMETRIERANDBEREICHE

Eine in der KMT übliche Erfassungsstrategie ist die Verteilung der Antastpunkte über die größtmögliche Ausdehnung der Geometrieelemente. Dabei werden jedoch die Randbereiche üblicherweise ausgespart um Fehlantastungen zu vermeiden wegen möglicher Fertigungsfehler [Roi 2005]. Für einen automatisierten Messbetrieb muss sichergestellt sein, dass die Antastpunkte immer auf dem Material zu liegen kommen unter der Berücksichtigung der üblichen Fertigungsstreuung für Maß und für Lage. Weiterhin sind Randbereiche problematisch wegen einer möglichen Gratbildung und durch Formfehler verursacht durch die Einleitung der Bearbeitungskräfte. Die Größe dieser von der Datenerfassung ausgesparten Randbereiche ist von der Bauteilgröße abhängig, vom Fertigungsverfahren und bei taktiler Antastung auch vom verwendeten Tasterradius. Diese Erfassungsstrategie ist aus den genannten Gründen sinnvoll, sie lässt jedoch bei fehlender Definition der Randbereiche in der Zeichnung oder in der Prüfanweisung Raum für Interpretation und führt damit wiederum zu nicht reproduzierbaren Messergebnissen. Allein die Wiederholgenauigkeit von Bezugselementen wirkt sich auf eine Vielzahl von Prüfmerkmalen aus. Insbesondere wenn der

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Kantenbereich funktionale Bedeutung hat, ist eine Spezifikation in der Zeichnung unerlässlich.

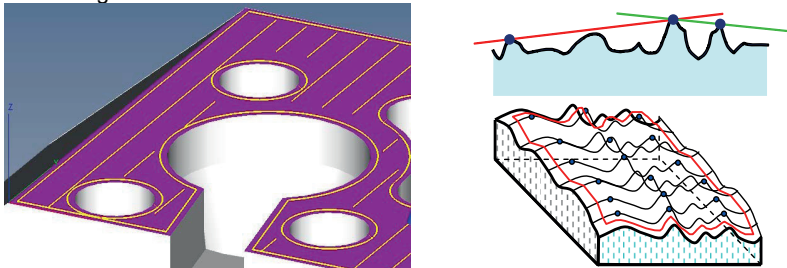


Abbildung 1: Erfassungsstrategie bei nicht tolerierter Kanten geometrie und deren Auswirkung auf zugeordnete Geometrieelemente.

2. ANWENDUNGSBEISPIELE FÜR PORTAL KMG MIT TAKTILEM SCANNINGSENSOR

Antastparameter der taktilen Scanningsensoren müssen mit den fertigungstechnischen Belangen abgestimmt sein um die Datenqualität auch für den automatisierten Betrieb sicherzustellen. Für die Erfassung kleiner Geometrien ist dies durch die Überlagerung von Maß-, Form- und Lagefehlern eine Herausforderung.

2.1 Reibtiefenmessung von Bohrungen

Die Messung von Reibtiefen wurde bislang nur in Ausnahmefällen mit dem Koordinatenmessgerät (KMG) durchgeführt. Dies war damit begründet, dass zur Erfassung der in der Regel nur kleinen Stufen von ca. 0,1 mm bis zu 2 mm nicht flexibel einsetzbare Zylindertaster mit planer Stirnfläche verwendet werden mussten. Es waren auch Vorkehrungen notwendig, um unter Beachtung der Fertigungsstreuung für Durchmesser und Lage der Bohrungen eine Antastung auf der kleinen Stufe sicherzustellen.

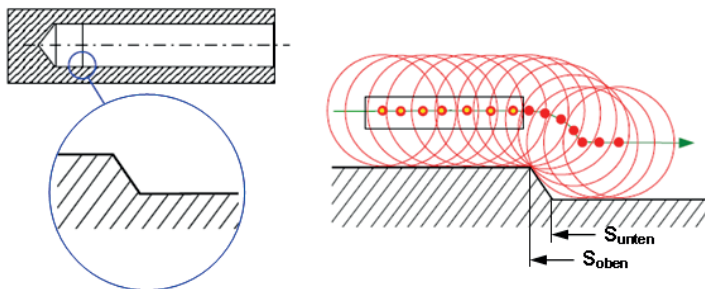


Abbildung 2: Stufenpunktermittlung am Beispiel einer Reibtiefenmessung.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Ein neuer Algorithmus ermöglicht nun durch die Verwendung der flexibler einsetzbaren Tastkugeln eine weitere Komplettierung des Prüfumfangs mit KMG. Allerdings kann durch oft große Eintauchtiefen der Tasterradius nicht beliebig klein gewählt werden, sodass der gesuchte Stufenpunkt zwar nicht direkt angetastet werden kann, aber durch Scannen einer Mantellinie über die Stufe hinweg berechnet werden kann. Für ein möglichst exaktes Ergebnis der Reibtiefenbestimmung wird folgende Vorgehensweise empfohlen [Zeiss 2011]:

- Taster mit möglichst kleinem Durchmesser wählen
- Möglichst hohe Punktedichte verwenden
- Genügend Auslauf am Anfang und am Ende der Bahn
- Scanningrichtung von der höheren zur tieferen Stufe

Die Berechnung der Ergebnisse für den oberen und für den unteren Stufenpunkt erfolgt aufgrund der Vorgabe des Stufenwinkels, der durch die Bearbeitung feststeht.

Dieses neue Verfahren ermöglicht das wirtschaftliche Messen von Reibtiefen bei ausreichender Genauigkeit. Der automatisierte Prüfumfang ohne Einbindung eines zweiten Messgeräts wird erweitert und somit der Gesamtaufwand reduziert bei gleichzeitiger Steigerung der Prozesssicherheit.

2.2 Auswertung und Visualisierung der Kantengeometrie

Die Kantenbeschaffenheit hat für Zusammenbau und Funktion von Bauteilen teilweise entscheidende Bedeutung. Für diese Fälle kann bei der Formprüfung die Messdatenerfassung über Kanten bzw. Unterbrechungen hinweg erfolgen, um die Kantengeometrie mit in die Auswertung einbeziehen zu können und um bei Bedarf eine Visualisierung der Kantengeometrie zu ermöglichen.

Durch Sollbahnschanning werden die Kantenpunkte Bestandteil der erfassten Oberfläche und sind somit in die Formauswertung integrierbar. Treten bei der Auswertung Über- oder Unterschreitungen von Grenzwerten auf, wird eine Visualisierung ausgelöst. Zur Ursachenforschung sind grafische Darstellungen der Messpunkte sehr nützlich, numerische Auswertungen alleine sind zur Analyse oftmals unzureichend. Anwendung findet dieses so genannte Fly-Scan [Wie 2010] über Lücken hinweg beispielsweise bei Messungen von Segmentwellen, Werkzeugschneiden oder von Flanschflächen.

Neben dem Gewinn an Kanteninformation reduziert Fly-Scan sowohl die Messzeit als auch die Programmierzeit.

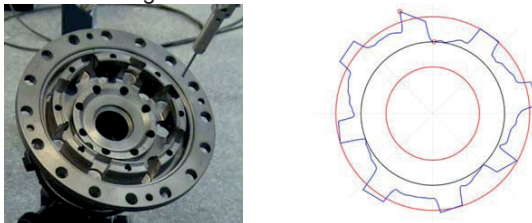


Abbildung 3: Scannen über Unterbrechungen zur Auswertung und zur Visualisierung der Kantengeometrie.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

2.3 Krümmungsanalyse an Turbinenschaufeln

Durch eine Analyse der Krümmung sind Kurvenübergänge auch im CNC automatisch ermittelbar und auswertbar. Diese Methode wird im Bereich von Kurven- und Konturmessungen häufig angewandt. Ein Anwendungsbeispiel dafür ist die automatische Übergangserkennung von der Über- bzw. Unterdruckseite zur Leading Edge und zum Trailing Edge bei Turbinenschaufeln. Anspruchsvoll wird diese Anwendung durch die Forderung nach kurzen Messzeiten. Wegen der hohen Schaufelzahl pro Laufrad und der hohen Anzahl von Schnitten pro Schaufel beträgt die Messzeit eines Laufrads mehrere Stunden. Eine Laufradmessung stellt bezüglich der Erfassungsstrategie im Scanningverfahren besondere Anforderungen durch die starken Krümmungsunterschiede an der Schaufel und durch verhältnismäßig große Positionsabweichungen der Schaufeln.

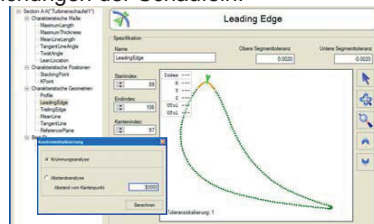


Abbildung 4: Krümmungsanalyse am Beispiel einer Turbinenschaufelmessung.

3. ANWENDUNGSBEISPIELE FÜR KMG ZUR MESSUNG VON MIKROGEOMETRIEN

KMG zur Messung von Mikrogeometrien sind üblicherweise mit taktilen und mit optischen Sensoren ausgestattet. Die extrem kleinen Geometrien der häufig dreidimensionalen Bauteile und deren Empfindsamkeit gegen Messkräfte stellen höchste Anforderungen hinsichtlich der Integration der Sensoren in das Gesamtsystem bestehend aus Gerät, Sensorik, Steuerung und Software [Por 2005, Wie 2011].

3.1 Anwendungsbeispiel Konturmessung

Bedingt durch die kleinen und teilweise komplexen Geometrien sind Kanten und Übergänge häufig als Linienprofil toleriert. Dies hat den Vorteil, dass die ohnehin kleinen Geometrieelemente zur Datenerfassung nicht noch weiter eingeschränkt werden müssen um eventuellen Fertigungsstreuungen vorzuhalten. Der Nachteil dieser Tolerierung liegt darin, dass als Messergebnis nur die Abweichungen aller Einzelpunkte zur Sollkontur vorliegen und keine fertigungstechnisch oder evtl. auch funktional relevante Zusatzinformationen über einzelne Konturbereiche wie z. B. Radien und deren Zentren.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

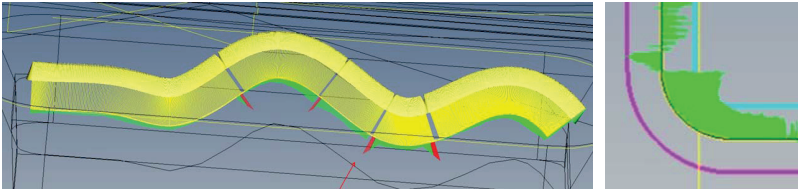


Abbildung 5: Beispiel für Konturmessung an Mikrogeometrien.

3.2 Anwendungsbeispiel Knickerkennung

Sind Zusatzinformationen wie Radien und deren Zentren für einzelne Konturbereiche gefordert, eignet sich die automatische Knickerkennung zu deren Ermittlung. Mittels dieser Softwarefunktion ist die Erfassung eines gesamten Linienzuges möglich bei anschließender automatischer Trennung in einzelne Geometriebereiche. Trotz Fertigungsstreuungen steht somit der maximal mögliche Bereich der einzelnen Kontursegmente für die Auswertung zur Verfügung. Ein klassisches Anwendungsbeispiel für die automatische Zuordnung der Punkte eines Linienzuges zu einzelnen Geometrieelementen ist die Prüfung der Position und der Tiefe von Ventilsitzen. Wie auch bei vielen Anwendungsfällen von Mikrobauteilen sind die einzelnen Kegelstufen sehr kurz bei vergleichsweise groben Orts- und Maßtoleranzen. Eine separate Datenerfassung und Zuordnung für die einzelnen Sitze könnte somit nicht über die maximal mögliche Ausdehnung erfolgen und würde die wegen den ungünstigen Geometrieverhältnissen ohnehin schon große merkmalspezifische Messunsicherheit weiter erhöhen.

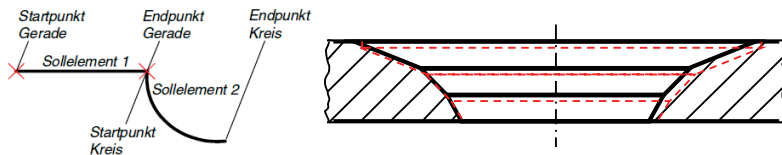


Abbildung 6: Automatische Punktezuordnung aus Linienzügen zu Geometrieelementen durch Knickerkennung und Darstellung von Fertigungsfehlern an einem Ventilsitz.

3.3 Anwendungsbeispiel Flächenprofiltolerierung

Eine weitere Variante der Tolerierung bei ungünstigen Geometrieverhältnissen sind Flächenprofiltoleranzen mit oder ohne Bezüge und der Angabe von theoretisch exakten Maßen. Wie oben bei der Linienprofiltoleranz beschrieben liegt deren Hauptvorteil in der Vermeidung großer Messunsicherheiten bei der Berechnung von geometrischen Elementen basierend auf kleinen Segmenten oder anderen ungünstigen Geometrieverhältnissen. Anwendung findet diese Methode beispielsweise bei der Tolerierung kurzer Kegel bzw. Fasen. Anhand

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

der Bezugsvorgabe wird die Freiheitsgradeinschränkung für die Einpassung der Einzelpunkte zur Sollgeometrie gesteuert. Dies führt von der Berechnung der reinen Formabweichung bis zur Überlagerung von Maß-, Form- und Lageabweichungen.

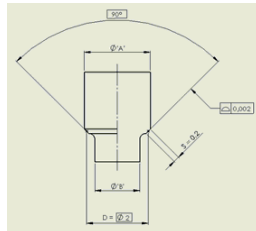


Abbildung 7: Flächenprofiltolerierung für ein kurzes Kegelstück.

4. ANWENDUNGSBEISPIELE FÜR KANTENMESSUNG MITTELS COMPUTERTOMOGRAFIE

Die Computertomografie besitzt eine Vielzahl interessanter Eigenschaften. Sie erlaubt einen Einblick in das Innere von Bauteilen im montierten Zustand, sie ermöglicht eine Defektkontrolle des Werkstoffs, einen schnellen Soll-Ist-Vergleich der Oberflächenpunkte mit dem CAD-Modell und eine dimensionelle Prüfung außen- wie innenliegender Maße mit einer hohen Punktedichte über die gesamte Bauteiloberfläche hinweg. Damit ist diese Technologie auch für die Messung von Kanten und Radien anwendbar [Let 2005].

4.1 Zuordnungskriterium 3D-Einpassung

Die mittels Computertomografie erfassten Oberflächenpunkte können durch 3D-Einpassung zu einem Soll-Ist-Vergleich mit dem CAD-Modell verwendet werden. Anhand einer Farbskala wird ein Überblick über etwaige Problemzonen gegeben, die anschließend noch maßlich auswertbar sind. Dies schließt insbesondere auch Kanten und Konturübergänge ein, die ansonsten wegen dem Messaufwand gerne nicht erfasst werden.

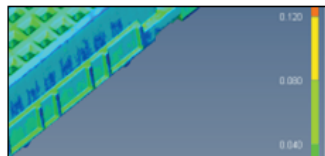
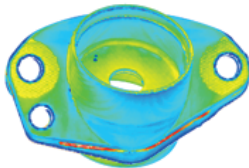


Abbildung 8: Kennzeichnung der Abweichungen zur Sollgeometrie mittels Farbskala.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

4.2 Zuordnungskriterium Kontureinpassung

Bei Spezifikation einer Profillinientoleranz werden die auf dem Profil liegenden Oberflächenpunkte für die Auswertung ausgewählt und zur Sollkontur eingepasst unter der Vorgabe von Freiheitsgraden in Abhängigkeit von der Bezugsangabe. Somit ist die reine Formabweichung auswertbar oder die überlagerte Form- und Lageabweichung. Die Ergebnisdarstellung kann numerisch oder grafisch erfolgen. Die Toleranzzonenbreite kann entlang der Kontur variieren.

4.3 Zuordnungskriterium Richtungsübereinstimmung

Da bei der Computertomografie Oberflächenpunkte mit hoher Dichte über die gesamte Bauteiloberfläche vorliegen, werden automatische Zuordnungskriterien für die Punktauswahl zu einzelnen Geometrieelementen benötigt. Ein gängiges Verfahren dafür ist die Prüfung der Einzelpunkte auf Übereinstimmung der Richtungsvektoren in einem einstellbaren Bereich.

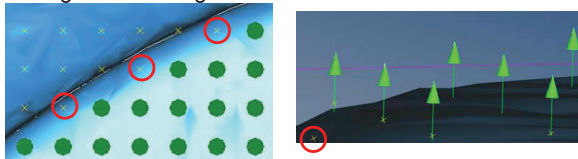


Abbildung 9: Punktzuordnung anhand der Richtungsübereinstimmung.

5. KANTENMESSUNG MIT EINEM KONTURMESSGERÄT

Spezielle Konturmessgeräte haben ihr vorrangiges Einsatzspektrum zur Kanten geometriemessung und zur Kantenanalyse in den Bereichen, in denen Kontur- oder Oberflächenmessaufgaben vorrangig vorliegen oder wenn die universelleren KMG an ihre Grenzen stoßen hinsichtlich der Genauigkeit oder hinsichtlich kleiner Tasterradien. Durch Tasterradien bis zu 2 µm bei kombinierten Kontur- und Oberflächenmessgeräten ist deren Anwendungsbereich deutlich größer im Vergleich zu den kleinsten möglichen Tasterradien an KMG, die im Bereich zwischen 0,05 mm und 0,15 mm liegen je nach verwendetem Sensor. Handhabung und Ergebnisdarstellung sind zugeschnitten auf die Anforderungen der 2D-Konturprüfung.

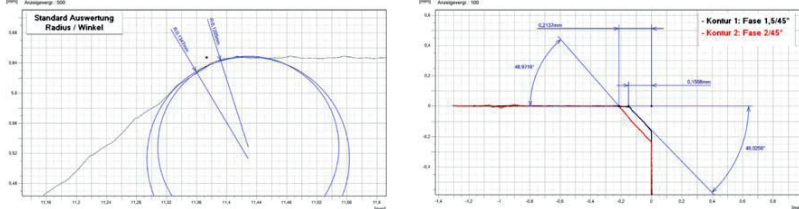


Abbildung 10: Beispiele für Radien- und Fasenmessung am Konturmessgerät.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Es existieren verschiedene in der Praxis eingeführte und bewährte Verfahren zur Kanten- und Radianmessung, die aus langjähriger Zusammenarbeit zwischen Anwender und Hersteller entstanden sind. Beispiele dafür sind Richtungsübereinstimmung, Krümmungsanalyse, automatische Knickererkennung, Patchzuordnung am CAD Modell und Kantenanalyse mit Visualisierung sowie die neu vorgestellte Reibtiefenmessung. Teilweise müssen Erfassungs- und Zuordnungsverfahren sehr spezifisch auf Messgerät und Sensorik zugeschnitten sein. Deshalb kann die Normung keine umfassenden Regeln dafür festlegen. Trotzdem ist die Definition von Regeln und Symbolik wichtig zur eindeutigen Punktezuordnung an Kanten und Übergängen, um dadurch die Interpretationsunsicherheit und die merkmalspezifische Messunsicherheit zu reduzieren.

7. QUELLEN

- [Por 2005] Porath, M.; Seitz, K.: "Koordinatenmesstechnik für mikromechanische Bauteile: Herausforderungen und Lösungen"; In: VDI-Tagungsband 1914, Koordinatenmesstechnik, Innovative Entwicklungen im Fokus des Anwenders; Tagung Braunschweig 15.-16.11.2005; VDI Verlag Düsseldorf 2005
- [Roi 2005] Roithmeier, R. (Hrsg.): „Messstrategien in der taktilen Koordinatenmesstechnik“, Carl Zeiss 3D Akademie, Carl Zeiss 3D Metrology Services GmbH, Opferkuch GmbH, Verlag, Aalen 2005, 2. Auflage ISBN 978-3000184390
- [Wie 2010] Wiedmann, W. K.; Bernhardt, R.; Jenisch, W.: „Messleistung signifikant gesteigert“; In: Innovation Messtechnik Spezial Nr. 12, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen 2010. (Internet: www.zeiss.de/imt)
- [Wie 2011] Wiedmann, W. K.; Imkamp, D.; Bader, F.: „Mikroteilemessgerät F25, Einsatzbereiche und Anwendungserfahrungen“; In: VDI-Bericht 2133, 4. Fachtagung mit Fachausstellung Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2011, Messprinzipien – Messgeräte – Anwendungen, Tagung Erlangen 25.-26.10.2011, VDI Verlag Düsseldorf 2011
- [Let 2005] Lettenbauer, H.; Imkamp, D.: "Einsatz der 3D-Computertomographie in der dimensionellen Messtechnik"; In: VDI-Tagungsband 1914, Koordinatenmesstechnik; Innovative Entwicklungen im Fokus des Anwenders; Tagung Braunschweig 15.-16.11.2005; VDI Verlag Düsseldorf 2005
- [Zeiss 2011] CALYPSO: Bedienungsanleitung Revisionsstand 5.2 Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH Ausgabedatum: 03/11 (Suche nach „Stufenpunkt“)

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Auswirkung verschiedener Auswertestrategien auf die Radiusmessung von Schneidkanten

Felgner A¹, Grabner M², Helmlí F², Krüger-Sehm R¹, Küng A³, Meli F³

1) Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Deutschland;

rolf.krueger-sehm@ptb.de

2) Alicona Imaging, Österreich

3) Bundesamt für Metrologie, METAS Schweiz

Abstract: Am Beispiel eines Prototypen für ein Schneidkantennormal wird gezeigt, dass verschiedene Auswertestrategien unterschiedliche Ergebnisse für den nominellen Kantenradius von ca. 19 µm liefern. Die verschiedenen Auswertestrategien haben die gleiche Funktionalität des Normals zum Ziel, d.h. die Weitergabe einer charakterisierenden Größe für die Schneidkante idealisiert durch den Wert eines Kantenradius R. Die benutzten Algorithmen unterscheiden sich in unterschiedlicher Auswahl, Mittelung und besonders der Gewichtung der Daten in den verschiedenen Bereichen des zusammengesetzten Formelelementes „Zylinder und zwei Ebenen“ bzw. „Kreishbogen und zwei Tangenten“. Es wurden verschiedene Auswertestrategien angewendet, um reale und synthetische Topographien auszuwerten. Es soll in diesem Beitrag verdeutlicht werden, dass jede der Auswertestrategien zu einer Lösung führt. Vor- und Nachteile der verschiedenen Algorithmen werden diskutiert. Will man sich miteinander vergleichen, ist ein anerkannter standardisierter Algorithmus anzustreben.

1. EINLEITUNG

Der Kenntnis der genauen Schneidkantengeometrie, insbesondere der Verrundung der Schneidkanten, kommt eine wichtige Bedeutung zu, weil diese deutlichen Einfluss auf das Zerspan-Ergebnis, den Verschleiß und die Standzeit der Werkzeugmaschine haben [Cortes 2009]. Durch unterschiedliche Präparationsverfahren ist es möglich, verschiedenste Kantengeometrien zu erzeugen, die von einfachen Verrundungen, über scharfe Kanten bis hin zu speziellen Verrundungen reicht, die eher elliptischen Verlauf besitzen und einem Wasserfall oder einer Trompetenform gleichkommen.

Für die Messung der Schneidkantenverrundung gibt es unterschiedliche Messverfahren, unter anderem traditionelle taktilen Verfahren, optische Verfahren die auf Streifenlichtprojektion beruhen [Hainich 2009] oder Verfahren basierend auf Fokusvariation [Prantl 2009]:

An der Kante einer Wendschneidplatte, die als Schneidkantennormal eingesetzt werden soll, traten beim Vergleich von Messungen mit verschiedenen Messverfahren Unterschiede auf, die größer als erwartet waren. Die Schneid-

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

kante mit einem Nennwert von ca. $19\text{ }\mu\text{m}$ wurde von METAS taktil, von Alicona mit dem Fokus-Variationsverfahren und von der PTB konfokal gemessen.

Institution A	Institution B	Institution C
R= $18,8\text{ }\mu\text{m}$	R= $15,8 - 16,4\text{ }\mu\text{m}$	R= $15,0 - 16,6\text{ }\mu\text{m}$

Tabelle1: Messergebnisse der beteiligten Institutionen

Ursachen für die Unterschiede können grundsätzlich sein:

- Abweichungen in der Messwertaufnahme der Geräte
- Unvollkommenheiten des Normals, auf die die Messverfahren unterschiedlich reagieren
- Unterschiede in den Auswerte-Algorithmen

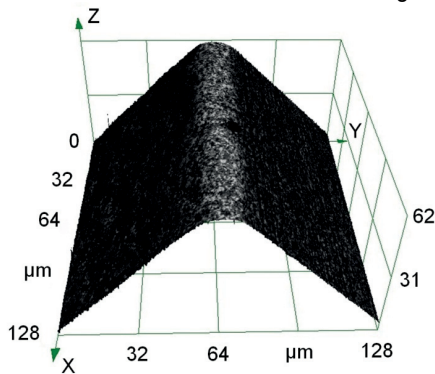


Abbildung 1: Topographie der Schneidkante, aufgenommen mit Konfokalmikroskop (50x-Objektiv, 2x Zoom) zur Verdeutlichung der Aufgabenstellung

Die Evaluierung des Einflusses von mathematischen Auswertealgorithmen ist auch bei anderen Mikro-Geometrien Gegenstand von Untersuchungen. In [Danzl 2008] wurden beispielsweise die Algorithmen zum Einpassen von Kugeln in 3D Datensätze untersucht, und dabei die mathematischen Methoden von zwei Einrichtungen (PTB, Alicona) auf unterschiedliche reale und synthetische Datensätze angewendet. Die Resultate auf Kugeln mit nominellem Radius von ca. $400\text{ }\mu\text{m}$ zeigten sehr gute Übereinstimmungen des Kugelradius mit Unterschieden im Sub-nm Bereich zwischen den beiden Methoden. Zudem zeigten sich bei den synthetischen Datensätzen nahezu gleiche systematische Abweichungen vom berechneten Radius im Vergleich zum Soll-Radius für den Testfall, dass Messpunkte verrauscht wurden und nur in einem sehr kleinen Winkelbereich der Kugel vorhanden waren. Eine Klassifizierung von optischen Abstandssensoren für koordinatenmess-technische Aufgaben ist auch in [VDI 2617 Blatt 6.2 2005] aufgeführt.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Ziel dieses Beitrages ist es, die Auswirkung der Auswertelgorithmen zu beschreiben und daraus die Notwendigkeit abzuleiten, dass in normativen Dokumenten anerkannte standardisierte Methoden festgelegt werden sollten. Er liefert also noch keine Lösung, aber Beiträge um die Ausbreitung der Unsicherheit bei der Messung von Mikrokonturen zu verstehen.

2. VERGLEICH DER AUSWERTUNG GEMESSENER STRUKTUREN

Bei der Auswertung der Rohdaten des selben Messdatensatzes traten zwischen den Auswerteergebnissen der beteiligten Institutionen ebenfalls Unterschiede auf. Die in der Tabelle 2 gezeigten Wertebereiche ergaben sich bei der Variation der Auswerte-Verfahren und -Bedingungen. Hier macht sich bemerkbar, wie empfindlich die Verfahren auf die Unvollkommenheiten reagieren, die bei der in Abbildung 1 gezeigten Probe erkennbar sind.

Institution A	Institution B	Institution C
R=15,7 - 18,8 μm	R= 15,3 – 15,7 μm	R= 15,2 – 15,7 μm

Tabelle 2: Auswertung eines Messdatensatzes durch die beteiligten Institutionen

Das ideale Modell der auszuwertenden Topographie besteht aus zwei Ebenen, verbunden durch ein Zylindersegment. Im nächsten Abschnitt wird beschrieben, wie die verschiedenen Auswerteverfahren der beteiligten Institutionen dieses Modell räumlich bzw. als Profilschnitt berücksichtigen.

3. BESCHREIBUNG DER AUSWERTESTRATEGIEN

3.1 Metrologischer Hintergrund bei der Auswertung

Bei den hier betrachteten taktilen Messverfahren nach dem Tastschnittverfahren und den optischen Messverfahren liegt ein äquidistantes Abtastraster zugrunde [ISO/TS 25178-6 2010]. Auf der auszuwertenden wahren mechanischen Oberfläche bzw. der wahren elektromagnetischen Oberfläche [EN ISO 14406: 2010] variiert aber der Abstand der Abtastpunkte, und dies unterschiedlich je nach Messverfahren [Kedziora 2008]. Es wird hier vorausgesetzt, dass die Unterschiede zwischen mechanischer und elektromagnetischer Oberfläche vernachlässigbar sind. Bei der taktilen Antastung verändert die nach [ISO/FDIS 25178-2:2010] anzuwendende Erosion das äquidistante Abtastraster des abgetasteten Profils. Dies ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

Danach sind die Messpunkte den Formelementen so zuzuordnen, dass die Summe der Abweichungsquadrate minimiert wird. Diese Zuordnung geschieht in dem darunter skizzierten nicht äquidistanten Abtastraster. Je nach Folgeoperation muss danach auf ein äquidistantes Raster interpoliert werden.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

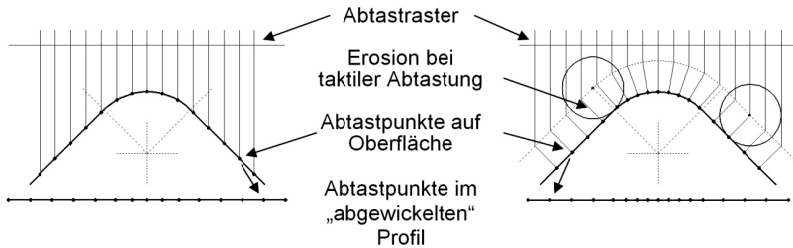


Abbildung 2: Vom Abtastraster zum Messpunktabstand auf der assoziierten Oberfläche; links optische Messung, rechts taktile Messung

3.2 Verfahren „einzelne Profilauswertung“ (METAS)

Die Messungen am METAS wurden auf einem Bezugsflächentastschnittgerät vom Typ FTS 120 L von Rank Taylor Hobson durchgeführt. Für die Rückführung ist der Durchmesser (Nennwert 300 μm) und die Formabweichung der Tastkugel entscheidend. Beides wird auf einem Mikrokoordinatengerät mit Laserinterferometern kalibriert [Küng 2007]. Die Kalibrierung wird durch Messungen an zwei Normalen validiert, die extreme Radien von einerseits 5 nm und andererseits von 125 μm haben. Für deren Rückführung wird zusätzlich auch ein Metrologie-AFM eingesetzt [Meli 2011]. Bei jedem aufgenommenen Profil wird durch Erosion (s. Abbildung 2) der Einfluss vom Tasterradius korrigiert und ein konstanter Punktabstand entlang der Oberfläche erzeugt. Die senkrecht zur Kante aufgenommenen Profilschnitte werden einzeln ausgewertet und anschließend werden aus den Fitparametern der einzelnen Schnitte der mittlere Radius und die Standardabweichung ermittelt.

Das Modell ist das Profil einer verrundeten Kante, definiert als Kreissegment mit zwei anschließenden Tangentenstücken, also ein Schnitt durch das räumliche Modell in Abschnitt 2. Dieses Modell wird mit der LS-Methode (total least squares) in die Profil-Messwerte eingepasst. Dabei sind Kreiszentrum, Radius, beide Winkel und die zwei Übergangspunkte variabel. Die Abweichungen werden senkrecht zur Oberfläche entlang der Profilline angegeben. Die verwendete Auswertelänge entlang einer Flanke ist $2\pi R$ wobei für R der nominale Radius eingesetzt wird (Abbildung 3).

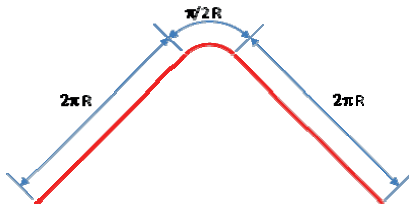


Abbildung 3: Kantenmodell und Auswertebereiche wie sie am METAS verwendet werden.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Die Anfangs- und Endpunkte des Radiussegments werden durch die Tangentenbedingung für die Flanken automatisch vorgegeben. Dadurch ist das Resultat recht robust bezüglich Formabweichungen. Die Auswertelänge wurde absichtlich großzügig gewählt damit eine Kantenabnutzung innerhalb des gleichen Ausschnitts verfolgen kann. Der Auswertebereich muss dabei nicht iterativ angepasst werden da immer der nominelle Radius verwendet wird um den Auswertebereich festzulegen. Da die Profile einzeln ausgewertet werden, eignet sich die Methode für gerade wie für gekrümmte Kanten gleichermaßen.

3.3 Verfahren „Auswertung gemittelter Profile“ (Alicona)

Die Höhenmesswerte, die mit dem Fokus-Variationsverfahren [Leach 2001] gemessen wurden, sind einem in x- und y-Richtung äquidistanten Abtastraster zugeordnet. Das verwendete Messgerät ist in horizontaler und vertikaler Richtung durch Kalibrierung entsprechend [VDI 2655-1.1 2008] rückgeführt.

Aus dem gemessenen 3D- Datensatz wird eine Vielzahl an Profilen normal zur Schneidrichtung extrahiert. Anschließend werden abschnittsweise Profile zu einem mittleren Profil fusioniert. Dabei können zwei Methoden verwendet werden: Falls die Kante gerade ist, wird die Mittelung aller Profile direkt im selben Koordinatensystem wie bei der Extraktion durchgeführt. Wenn die Form der Schneidkante mitberücksichtigt werden muss, werden die Profile in den ausgewählten Abschnitten jeweils zueinander ausgerichtet und gemittelt. Der mittlere Schneidkantenradius ist dann der Mittelwert aus den abschnittswisen Berechnungen.

Im nächsten Schritt wird in das gemittelte Profil in das Kantenmodell bestehend aus Tangente-Kreisbogen-Tangente eingepasst. Dabei ist es nicht notwendig, den Bereich der Verrundung explizit auszuwählen. Liegt keine Formabweichung vor, lässt sich mit dieser Methode eine gute Wiederholbarkeit und Robustheit der Auswertung realisieren (additives Rauschen hat keinen großen Einfluss). Weicht jedoch die Form der Kante von der idealen Form Tangente-Kreisbogen-Tangente ab, wird das Messergebnis durch die Parameter des Einpass-Verfahrens beeinflusst (z.B. durch die Länge der Tangenten). Es wird daher versucht, die Einpassung so durchzuführen, dass sie unter in der Praxis auftretenden Formabweichungen trotzdem möglichst gute Ergebnisse liefert. Dazu haben sich die folgenden Maßnahmen bewährt:

- Die Punkte die am Kreisbogen liegen werden stärker gewichtet als die Punkte an den Tangenten.
- Die Länge der Tangenten wird nicht zu lang gewählt.

Prinzipiell ist es auch möglich, nicht nur den Radius des gemittelten Profils zu berechnen, sondern auch den Mittelwert des Radius der einzelnen Profile.

3.4 Verfahren „Zylinderauswertung“ (PTB)

Die Höhenmesswerte sind einem in x- und y-Richtung äquidistanten Abtastraster zugeordnet. Daraus wird eine xyz-Punktwolke erzeugt. Die Punktwolke wird mit dem Programm „Gom Inspect“ in ein facettenbasiertes Volumenmodell überführt, wobei die Einzelpunkte über ein Polygonnetz (kleine Dreiecke) mitei-

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

einander verbunden werden. Die Feinheit der Polygonisierung ist einstellbar. (Abbildung 4/01).

In die beiden Flanken des 3D Datensatzes werden Ebenen eingefittet, welche 97% aller Punkte der jeweiligen Ebene berücksichtigen (3 sigma – Korridor) (Abbildung 4/02). Dazu werden auf den Seitenflächen die jeweiligen Mittelungsareale manuell ausgewählt, die nicht Teil des Kreisabschnittes sein sollen. Um diese Ebene wird ein Abstand definiert, innerhalb dessen die Punkte der Ebene zugeordnet werden sollen. Damit werden definierte Abweichungen, z.B. durch Rauheit und Formabweichungen zugelassen und in die Selektion einbezogen. Alle in diesem Korridor befindlichen Punkte werden anschließend entfernt.

Die übrigen Datenpunkte befinden sich also entweder auf dem Kreisabschnitt, oder außerhalb des Zulassungskorridors (Abbildung 4/03). Letztere werden als Ausreißer betrachtet und manuell ebenfalls gelöscht.

Mit dem Best-Fit-Algorithmus werden 97% der verbleibenden Punkte der Zylinderoberfläche zugeordnet (Abbildung 4/04) und Radius und Zylinderachse im Maschinen-Koordinatensystem berechnet (Abbildung 4/05 und 4/06).

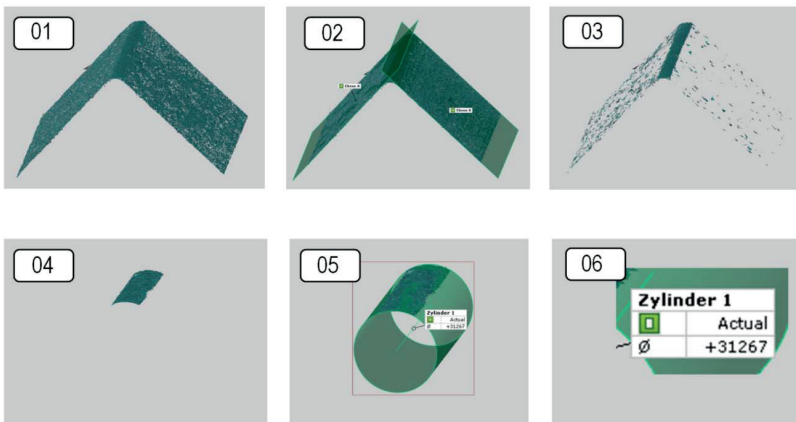


Abbildung 4: Schritte der Zylinderauswertung

Die Auswahlbereiche der Flanken wurden am gleichen Messdatensatz mehrfach leicht variiert. So kann durch diese willkürliche Auswahl eine Unsicherheitskomponente des Auswerteverfahrens abgeschätzt werden.

Bei dieser Auswertemethode wird also nur der selektierte Teil der Topographie der Schneidkante zur 3D-Berechnung des Zylinders benutzt. Die den Ebenen zugeordneten Teile der Topographie gehen nicht in die Zylinderberechnung ein, sondern sind nur ein Hilfsmittel zur Selektion der dem Zylinder zugeordneten Punkte. Lokale Abweichungen der Schneidkante von der idealen Form wie

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

in Abbildung 1 erkennbar gehen in das Residuum ein und vergrößern damit die Messunsicherheit des Zylinder- Radiuswertes.

Das verwendete konfokale Mikroskop ist in den horizontalen Achsen durch kalibrierte Maßstäbe und in der vertikalen Achse durch kalibrierte Tiefeneinstellnormale entsprechend [VDI 2655-1.2 2009] rückgeführt.

3.5 Kurzfassung der Mess- und Auswerteschritte

Institution	METAS	Alicona	PTB
Messverfahren	Bezugsflächen-Tastschnittgerät, Taster mit Saphirkugel $\varnothing 0.3 \text{ mm}$	Fokus Variation	Laser Scan-Konfokal-Mikroskop
Geometrierfassung	Mehrere Profile senkrecht zur Kante, Abtastabstand $0.25 \text{ }\mu\text{m}$, vertikale Auflösung 3 nm	20x-100x Objektiv Abtastabstand $0.09\text{--}0.44 \text{ }\mu\text{m}$ Vertikale Auflösung 100 nm	50x Objektiv, Abtastabstand $0,125 \text{ }\mu\text{m}$, vertikale Auflösung 6 nm
Modell	Kreissegment mit zwei Tangenten	Kreissegment mit zwei Tangenten	Zylinder und zwei Ebenen
Fit	Tasterradiuskorrektur, Punktdichtekorrektur, ungewichteter Fit auf einer Profillänge von $4.5 \pi \cdot r$	Einpassung der Modelle mit niedrigeren Gewichten an den Tangenten	Minimale Abweichung des isolierten 3D-Netzes vom Zylinder
Mittelung	Mittelwert der einzeln ausgewerteten Profilaradien	Auswertung eines gemittelten Profils oder Mittelwert der einzeln ausgewerteten Profile	3D-Datensatz ergibt Zylinder-Radius und -Achsenlage

Tabelle 3: Übersicht

4. VERGLEICH DER AUSWERTUNGEN SYNTHETISCHER TOPOGRAPHIEN

Das ideale Modell der Topographie wurde mit einem Kantenradius von $20 \text{ }\mu\text{m}$ synthetisch erzeugt und Rauheit und Welligkeit in unterschiedlichen Kombinationen überlagert, deren Amplituden und Wellenlängen in einem realistischen Bereich variiert wurden.

Es stellte sich heraus, dass alle Auswerteverfahren bei idealen und nur mit Gaußschem Rauschen überlagerten synthetischen Topographien die Radien mit sehr geringen Abweichungen zum Nennwert bestimmen.

Dagegen ruft die Welligkeit in Richtung des Profilschnittes, beispielhaft in Abbildung 5 gezeigt, insbesondere in Abhängigkeit von ihrer Phasenlage erhebliche Abweichungen hervor. In Tabelle 4 sind einige Beispiele aufgeführt.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

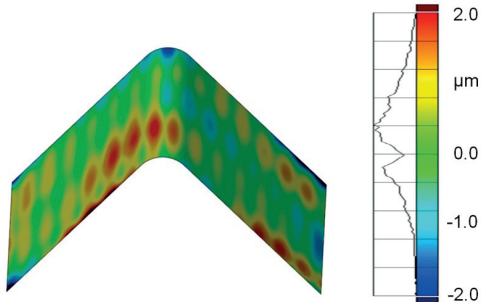


Abbildung 5 : Beispiel für eine synthetische Topographie mit Rauheit und Welligkeit

Welligkeit (sin)		Rauschen	Kantenradius / μm		
$P_t / \mu\text{m}$	$\lambda / \mu\text{m}$		Institution A	Institution B	Institution C
-	-	10	20,07	19,97-20,07	19,80-20
0,5	20	-	19,86	19,91-19,96	19,64-20,55
0,5	20	10	19,94	19,93-19,98	19,89-25,46
1,5	100	10	21,76	20,36-21,71	20,49-26,9
1 (cos)	20	0,2	20,04	10,81	15,8- 18,0

Tabelle 4: Beispiele für Abweichungen bei der Auswertung synthetischer Topographien mit Rauheit und Welligkeit

Jedes der Ergebnisse stellt für sich trotz der Unterschiede eine plausible Lösung der Messaufgabe dar, Ursache sind unterschiedliche Voraussetzungen und Randbedingungen in den Auswerteprogrammen.

Einen sehr großen Einfluss haben Formabweichungen beim Übergang vom Radiusbereich in den Flankenbereich. Dieser Bereich ist auch bei der Herstellung heikel. Hier können kleine Abweichungen zu großen Unterschieden bei den ermittelten Radien führen da die verschiedenen Auswerteverfahren diese Zone unterschiedlich gewichten.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die erheblichen Unterschiede in den Ergebnissen zeigen, dass die Funktionalitäten, die mit der Messaufgabe verbunden sind (z.B. Nennwert des Radius, kleinster Radius, Tangentenwinkel am Radiusübergang, Verhältnis von Tangenten- zu Kreisabschnitt), bei der Festlegung der Auswertebedingungen zu berücksichtigen sind. Diese Einflussgrößen sollten in regelsetzenden Werken wie in der entstehenden VDI- Richtlinie [VDI 2655-1.1 2008] zur Verbesserung der Vergleichbarkeit von Messergebnissen aufgeführt werden. Im Arbeitskreis

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

3.24/3.25 der VDI/GMA (Rauheits- und Konturmessung) ist diese Thematik als Arbeitspaket aufgenommen.

6. Quellen

- [Cortes 2009]** C. J. Cortes und F. Tikal: Schneidkantenpräparation - Ziele, in F. Tikal (Eds.), Schneidkantenpräparation, Ziele Verfahren und Methoden, Kassel University Press, Kassel, ISBN 978-3-89958-494-3, Seiten 3-11, 2009
- [Hainich 2009]** R. Hainich: „Optische Messtechnik von Schneidkanten“, in F. Tikal (Eds.), Schneidkantenpräparation, Ziele Verfahren und Methoden, Kassel University Press, Kassel, ISBN 978-3-89958-494-3, Seiten 146-162, 2009
- [Prantl 2009]** M. Prantl, R. Danzl und F. Helml: „Optische 3D Messung der Schneidkantenverrundung“, in F. Tikal (Eds.), Schneidkantenpräparation, Ziele Verfahren und Methoden, Kassel University Press, Kassel, ISBN 978-3-89958-494-3, Seiten 163-179, 2009
- [Danzl 2008]** R. Danzl, F. Helml, M. Krystek, M. Neugebauer: “Sphere Fitting Algorithms with Uncertainty Estimation”, Proc. International Conference on Precision Measurement, Ilmenau, (2008)
- [VDI 2617 Blatt 6.2 2005]** VDI 2617 Blatt 6.2, Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Abstandssensoren, 2005
- [ISO/TS 25178-6 2010]** ISO/TS 25178-6:2010, Geometrical product specifications (GPS) -- Surface texture: Areal -- Part 6: Classification of methods for measuring surface texture.
- [EN ISO 14406: 2010]** EN ISO 14406:2010 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Erfassung, Kap. 3.2
- [Kedziora 2008]** H.J. Kedziora: Correct roughness evaluation on non flat surfaces in Proceedings of the XIIth International Colloquium on Surfaces 2008, p. 35 – 42, Shaker-Verlag Aachen, ISBN 978-3-8322-6912-8
- [ISO/FDIS 25178-2:2010]** ISO/FDIS 25178-2:2010: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters
- [Küng 2007]** A. Küng, F. Meli and R. Thalmann: Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe, Measurement Science and Technology, **18** (2007) p. 319–327.
- [Meli 2011]** F. Meli and A. Küng: Realization of a large sample 3D metrology AFM with differential Jamin interferometers, Proceedings of the 11th Int. Conf. of the European Soc. for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN) May 2011, Lake Como, Italy, Vol. 1, p.203-206.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

- [Leach 2001]** R. K. Leach: "Optical Measurement of Surface Topography", Springer Berlin Heidelberg, 2001, 340 pages
- [VDI 2655-1.1 2008]** VDI 2655-1.1 Optische Messtechnik an Mikrotopographien- Kalibrieren von Interferenzmikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung, Beuth-Verlag, März 2008
- [VDI 2655-1.2 2009]** VDI 2655-1.2 Optische Messtechnik an Mikrotopographien- Kalibrieren von konfokalen Mikroskopen und Tiefeneinstellnormalen Beuth-Verlag, 2009
- [VDI 2629-2 2008]** VDI 2629-2 (Entwurf 2008): Genauigkeit von Konturenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung; Ermittlung der Unsicherheit von spezifischen Konturenmessungen mit Normalen/ kalibrierten Werkstücken

Konfokales Messsystem zur Geometrie- und Rauheitsmessung an Klingen und Schneidkanten

Georg Wiora, Marcus Grigat, Jürgen Valentin
NanoFocus AG, Lindnerstr. 98, D-46149 Oberhausen
wiora@nanofocus.de

Zusammenfassung: Die Konfokalmikroskopie erlaubt die hochgenaue Vermessung der Geometrie von Schneidkanten und Klingen mit sehr kleinen Radian. Es wird ein Messsystem, bestehend aus zwei gegenläufig angeordneten konfokalen Weißlichtmikroskopen, vorgestellt, das die Vermessung von Klingen mit sehr kleinen Kantenradien erlaubt. Es wird gezeigt, dass neben der Bestimmung der Schneidkanten geometrie auch die präzise Vermessung der Rauheit auf der Schneide möglich ist, und dass nur so eine zuverlässige und reproduzierbare Aussage über die Schneidleistung von Klingen getroffen werden kann.

1. MESSAUFGABE

Die Auswirkungen einer mehr oder weniger gelungenen Schneidkantengestaltung kennen viele Menschen aus der täglichen Erfahrung: Ob man eine scharfe Rasur mit heiler Haut übersteht, wird durch Form und Rauheit der letzten Mikrometern einer Rasierklinge entschieden. Für die Hersteller der Klingen ist es daher essentiell, über Messtechnik zu verfügen, mit der sie Herstellungsverfahren für Rasierklingen entwickeln und optimieren sowie die Produktion überwachen können. Bei NanoFocus wurde zu diesem Zweck das konfokale Messsystem *µsurf twin* als Branchenlösung entwickelt, das diese Aufgabe erfüllt.

Die entscheidende Schwierigkeit bei der Vermessung der Schneidkante einer Rasierklinge (s. Abbildung 2a) ist ihr extrem kleiner Radius. Bei einer guten Schneide kann man genau genommen nicht von einem Radius sprechen. Blickt man mit dem Mikroskop direkt auf die Schneide, in Abbildung 1 wäre das von rechts, so ist nur wenig zu sehen, da die Klinge nach beiden Seiten sehr steil, mit Winkeln größer 70° , abfällt und schon nach wenigen zehn Mikrometern in die Senkrechte übergeht.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

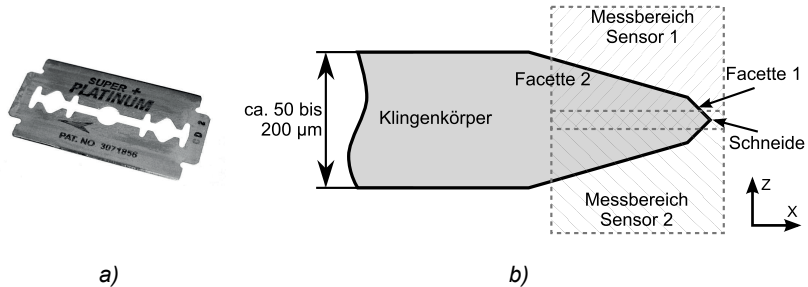


Abbildung 1: a) Foto einer typischen Rasierklinge mit zwei Schneiden [Hafenbar 2008]. b) Exemplarischer Querschnitt einer Klinge mit zweiseitigem Doppelfacettenschliff. Die Messbereiche der beiden Konfokalsensoren sind überlappend. Sensor 1 misst in dieser Darstellung von oben, Sensor 2 von unten.

2. SYSTEMBESCHREIBUNG

Auf das zugrundeliegende konfokale Messprinzip nach [Minsky 1957] und [Wilson 1990] mit Multipinholefilter [Nipkow 1885] [Weber 2007] soll hier nicht im Detail eingegangen werden, da es bereits ausführlich an andere Stelle beschrieben wurde, beispielsweise [Wiora, et al. 2011]. Lediglich die grundlegende Eigenschaft der *Tiefendiskriminierung* sei herausgestellt.

Ein konfokales Messsystem bildet nur Objektteile ab, die sich in der Fokusebene des Systems befinden. Objektteile außerhalb der Fokusebene, die in einem normalen Lichtmikroskop unscharf erscheinen würden, werden ausgeblendet. Die entsprechenden Bildbereiche erscheinen daher dunkel. Fährt man die Fokusebene entlang der optischen Achse durch das Objekt hindurch, erhält man einen Bildstapel, der nur an den Schnittpunkten mit der Objektoberfläche ein Signal größer null aufweist. Dieses kann leicht extrahiert werden und man gewinnt eine nanometergenaue Topographie der Oberfläche.

2.1 Systemaufbau

Das *µsurf twin*, das in Abbildung 2 dargestellt ist, besteht aus zwei gegenüberliegenden Konfokalmikroskopen, die einen überlappenden Arbeitsbereich der Fokussieroptik aufweisen. Ein dazwischen platziertes dünnes Messobjekt, beispielsweise eine feine Klinge, kann somit von beiden Seiten erfasst werden. Das ist die Grundvoraussetzung für die Dickenmessung.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

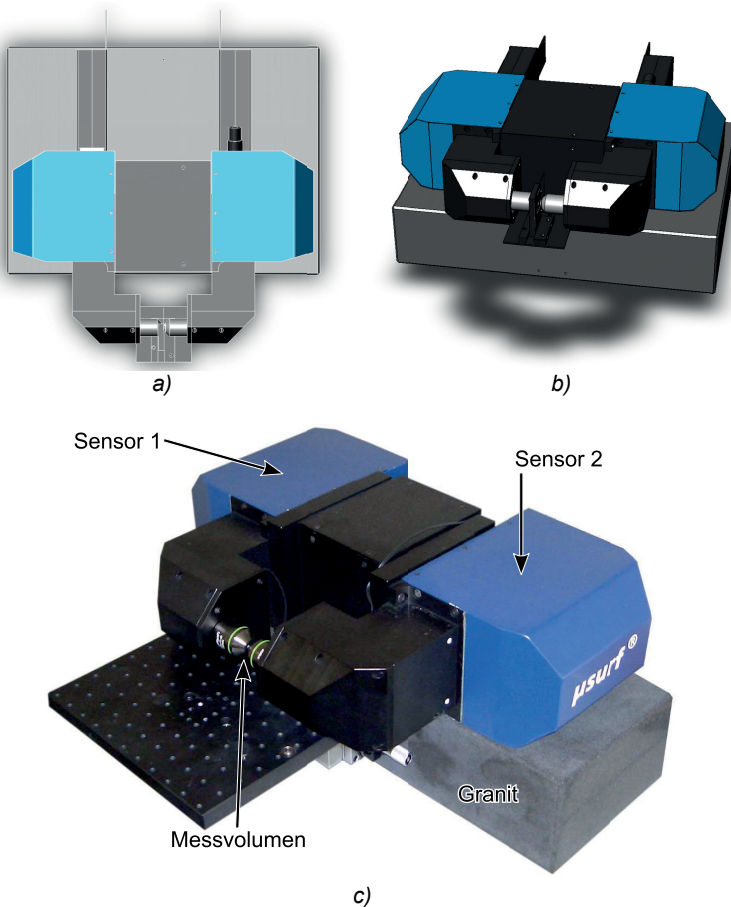


Abbildung 2: a) Aufsicht und b) perspektivische Ansicht des μsurf twin im CAD-Model, c) kundenspezifische Realisierung.

Das System besitzt zwei piezogetriebene Feinpositionierachsen. Eine bewegt, wie bei einem Standard μsurf Mikroskop, den Objektivfokus des einen Messkopfs und dient der Abstimmung der Koordinatensysteme der beiden Messköpfe. Der zweite Messkopf besitzt eine feste ObjektivEinstellung. Zur räumlichen Erfassung der Probe wird stattdessen der Probenhalter in Fokusrichtung bewegt. Das ist die eigentliche Messachse des Systems. Eine dritte motorisierte Achse dient dem Ein- und Ausfahren der Probe in das Messvolumen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

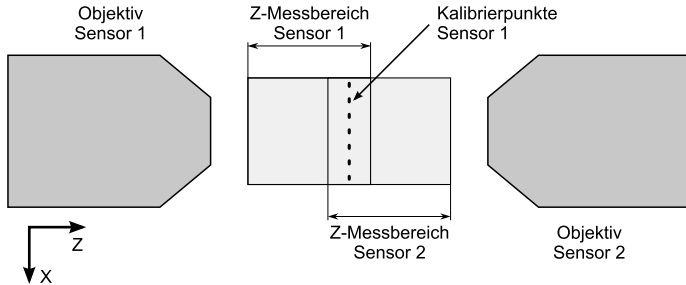


Abbildung 3: Anordnung der Objektive und der überlappenden Messbereiche. Die Kalibrierpunkte werden von Sensor 1 projiziert und von Sensor 2 erfasst und ermöglichen somit eine Verknüpfung der Koordinatensysteme.

2.2 Kalibrierung der Einzelmessköpfe

Die Kalibrierung der beiden Einzelmessköpfe hinsichtlich Lateral- und Tiefenmaßstab erfolgt mit den üblichen Normalen nach [DIN EN ISO 5436-1], sowie den dort definierten Raunormalen. Hinzu kommt die Kalibrierung nach [VDI/VE 2655 Blatt 1.2].

2.3 Abgleich der Koordinatensysteme

Für eine präzise Dickenmessung ist es notwendig, die beiden gegenüberliegenden Messköpfe in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen. Nach der Kalibrierung der Einzelmessköpfe messen beide Köpfe in ihrem jeweils eigenen Koordinatensystem $\mathbb{K}$ bzw. $\mathbb{L}$. Definiert man $\mathbb{K}$ als Referenzkoordinatensystem, so ist die Koordinatentransformation gesucht, die eine in $\mathbb{L}$ gemessene Koordinate nach $\mathbb{K}$ überführt.

Durch die Kalibrierung der Einzelmessköpfe ist die Maßstabsgleichheit beider Systeme sicher gestellt. Ebenso besitzen beide Koordinatensysteme orthogonale Koordinaten. Es verbleiben also noch sechs Freiheitsgrade für die Transformation, die bestimmt werden müssen: Das sind die drei Winkel der Rotationsmatrix $\mathcal{R}(\omega, \phi, \kappa)$ und die drei Komponenten des Verschiebungsvektors $\vec{T}$:

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{T} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

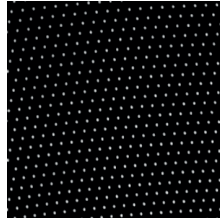


Abbildung 4: Abbildung der stehenden Nipkowscheibe von Sensor 1 in die Fokusebene von Sensor 2. Hiermit wird der Bezug der beiden Sensorkoordinatensysteme zueinander hergestellt.

Die Konfokaltechnik bietet als aktive Technologie eine elegante Möglichkeit, $\vec{T}$ ohne Kalibrierkörper zu bestimmen: Wie in Abbildung 3 gezeigt, kann Messkopf 2 das Beleuchtungsmuster vom gegenüberliegenden Messkopf 1 räumlich vermessen. Dazu wird die Nipkowscheibe des ersten Sensors gehalten. Es entsteht in der Fokusebene f_1 ein Muster aus Leuchtpunkten wie in Abbildung 4 gezeigt. Fokussiert man Sensor 2 mit dem integrierten Piezofeinsteller auf dieses Muster, erhält man seine Position z_2 im Sensorkoordinatensystem $\mathbb{L}$. Da die Lage z_1 der Fokusebene auch in $\mathbb{K}$ bekannt ist, ergibt sich t_z aus der Differenz der beiden Koordinaten:

$$t_z = z_2 - z_1 \quad (3)$$

Die Verschiebung von $\mathbb{L}$ gegenüber $\mathbb{K}$ parallel zur Fokusebene wird durch Justage soweit wie möglich minimiert, die Restklaffung wird durch die Elemente t_x und t_y ausgeglichen. Zur Bestimmung der Rotationskomponente wird in $\mathbb{L}$ eine Ausgleichsebene durch die Fokusebene von Sensor 1 gelegt. Mathematisch kann die Orientierung einer Ebene in $\mathbb{R}^3$ sowohl durch zwei Vektoren als auch durch die zwei Rotationswinkel ω und ϕ dargestellt werden kann. Ein dritter Winkel κ beschreibt die Drehung in der Bildebene. Somit sind alle Parameter bekannt, um die Koordinatensysteme beider Sensoren miteinander zu verknüpfen. Ein Punkt $\vec{P}$ in $\mathbb{L}$ kann in einen Punkt $\vec{P}'$ in $\mathbb{K}$ mit folgendem Ausdruck überführt werden:

$$\vec{P}' = \mathcal{R} \cdot \vec{P} + \vec{T} \quad (4)$$

Damit können beide Sensoren exakt im gleichen Koordinatensystem messen. Das ist eine elementare Voraussetzung, um präzise Dickenmessungen durchzuführen.

3. ANWENDUNGEN UND ERGEBNISSE

Das *μsurf twin* wird in zahlreichen Anwendungen eingesetzt, um die Schneidengeometrien, beispielsweise von Rasierklingen oder Mikrotomklingen, zu

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

vermessen. Neben der reinen Messtechnik wurden anwendungsspezifische Auswertungen und Prozesskenngrößen entwickelt, die von den Herstellern der Klingen zur Produktionssteuerung und Qualitätssicherung benutzt werden.

3.1 Dickenverlauf

Der Dickenverlauf der Klinge ist das direkte Ergebnis der Messung. In Abbildung 5a ist der Dickenverlauf einer Rasierklinge in direkter Umgebung der Schneide dargestellt. Für die Schneidengeometrie wird ein Mittelprofil aus der flächenhaften Messung gebildet. Prozessbedingt ist der Winkelverlauf der Schneide besser kontrollierbar als der Dickenverlauf, da der Schliffwinkel auf den Produktionsmaschinen mit wenig Aufwand deutlich besser als $0,1^\circ$ kontrollierbar ist, während die Positionsgenauigkeit der Schleifscheibe nicht im Mikrometerbereich liegt. Auch sind im Profil die einzelnen Facetten des Schliffs schwer zu erkennen, sie unterscheiden sich im Schliffwinkel nur um wenige Grad. Aus dem Profil wird daher der Oberflächenwinkelverlauf beider Seiten der Klinge abgeleitet. Der Winkelverlauf ist in Abbildung 5b dargestellt. Bis $100\text{ }\mu\text{m}$ Abstand zur Schneide nimmt der Winkel etwa linear ab, was einer gekrümmten Schneide entspricht. Ab $100\text{ }\mu\text{m}$ bleibt der Neigungswinkel konstant. Das entspricht der zweiten Facette des Schliffs. So sind die Facettenbreiten und die Verteilung der Facettenbreiten entlang der Schneide neben ihrer Symmetrie leicht messbar.

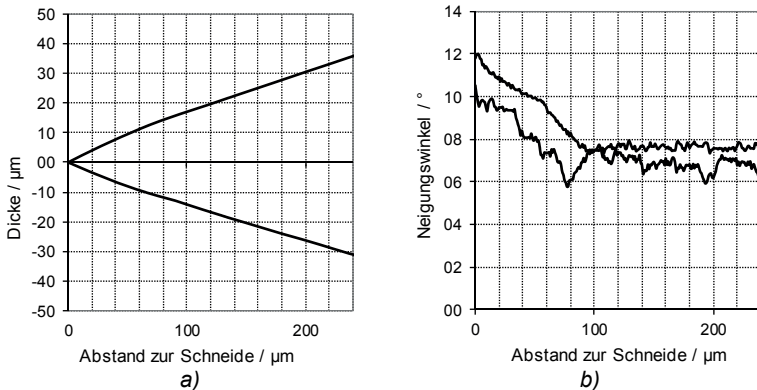


Abbildung 5: a) Profil und Dickenverlauf einer Rasierklinge. b) Neigungswinkelverlauf der Klinge: deutlich sind die gekrümmte erste Facette ($x < 100\text{ }\mu\text{m}$) und die gerade zweite Facette ($x > 100\text{ }\mu\text{m}$) zu unterscheiden.

3.1 Rauheitsmessung auf der Klinge

Entscheidend für die Schneidleistung einer Klinge sind nicht nur der Profilverlauf und die Feinheit der Schneidkante, sondern auch die Rauheit der Klinge in der unmittelbaren, nur wenige Mikrometer breiten Umgebung der Schneidkante. Darum wird parallel zur Schneidkante die Rauheit der Oberfläche ermittelt.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

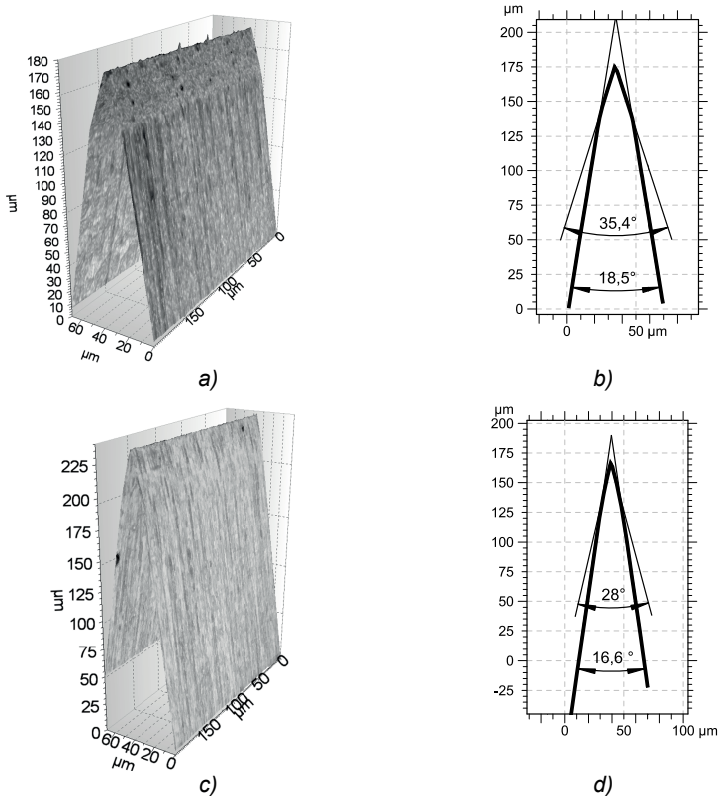


Abbildung 6: a) 3D-Messung einer Rasierklingenschneide und b) Profil mit Winkelangaben. c) 3D-Messung einer Mikrotomklinge und d) Profil.

Abbildung 7 verdeutlicht, wie sich die Oberflächenqualität mit dem Abstand zur Schneide verändert. Quantitativ werden dafür Linienrauhheitskenngrößen wie oder verwendet. Diese Parameter helfen schließlich, um den Produktionsprozess präzise einzustellen und eine gute Schneidleistung bei den produzierten Klingen zu garantieren.

4. RESÜMEE

Es wurde eine Technologie präsentiert, die es erlaubt schnell und berührungslos die 3D-Topografie von Schneidkanten auf Rasierklingen und Mikrotomen mit einer Auflösung im Nanometerbereich zu vermessen.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

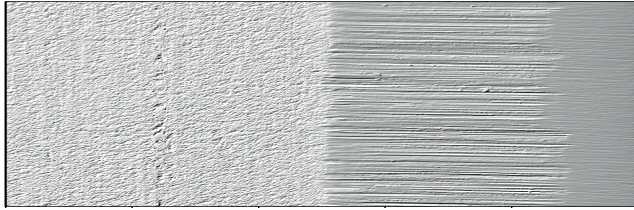


Abbildung 7: Oberseite einer Klinge in Reliefdarstellung (ca. $0,5 \times 0,3 \text{ mm}^2$). Die Schneidkante befindet sich am rechten Bildrand. Die unterschiedlichen Oberflächenqualitäten sind in dieser Darstellung deutlich zu unterscheiden.

Das *μsurf twin* erlaubt die prozesssichere Produktion von Klingen im industriellen Maßstab. Der volle Nutzen für den Anwender erschließt sich nicht aus der Messtechnik allein, sondern entsteht erst durch die Entwicklung und Definition von anwendungsspezifischen Kenngrößen.

5. QUELLEN

- [VDI/VDE 2655 Blatt 1.2]** VDI/VDE 2655 Blatt 1.2:2010-10: „Optische Messtechnik an Mikrotopografien - Kalibrieren von konfokalen Mikroskopen und Tiefeneinstellnormalen für die Rauheitsmessung“.
- [DIN EN ISO 5436-1]** DIN EN ISO 5436-1:2000-11: „Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale - Teil 1: Maßverkörperungen“.
- [Hafenbar 2008]** Hafenbar, W. „Rasierklinge_cropped.jpg“. [commons.wikimedia.org](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rasierklinge_cropped.jpg), 2008. Url: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rasierklinge_cropped.jpg>. Zugriffsdatum: 21. Januar 2011.
- [Minsky 1957]** Minsky, M.: „Microscopy Apparatus“; Patent Nr. US 3013467; 7. Nov. 1957.
- [Nipkow 1885]** Nipkow, P.: „Elektrisches Teleskop“; Patent Nr. DE 30105; 6. Jan. 1885.
- [Valentin et al. 2006]** Valentin, J.; Schmidt, H.: „Konfokal messen - 3D Oberflächenmessung per Mikroskop“; *Praxis Profilne – Berührungslose Messtechnik : die besten Produkte und Anwendungen*, Würzburg, Nov. 2006; S. 36-37.
- [Weber 2007]** Weber, M.: „Verfahren zur Generierung eines universellen Pinholomusters zur Anwendung in Konfokalmikroskopen“; Patent Nr. WO 2007/121706; 12. Apr. 2007.
- [Wilson 1990]** Wilson, T.: „Confocal Microscopy“; Academic Press, New York.
- [Wiora et al. 2011]** Wiora, G.; Weber, M. A.; Valentin, J.: „Anwendungsgebiete und Grenzen der Konfokaltechnik“; in *Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2011*. Erlangen: VDI.

Richtige Beurteilung von Radien und Kanten mittels MSA oder Prüfprozesseignung?

Dipl. Ing. (FH) Rolf Ofen

*MQS-Consulting, Ingenieurbüro für Messtechnik, Qualitätstechnik, Seminare
rolf.ofen@kabelmail.de*

Abstrakt: Bisher wurden die Messgeräte für den Fertigungseinsatz mittels Fähigkeitsanalyse gemäß MSA beurteilt. Diese Vorgehensweise hat sich unter bestimmten Voraussetzungen bewährt. In einigen Fällen jedoch stößt man auf die Grenzen dieser Methode. Wenn es z.B. wichtig ist, die Richtigkeit des Messwertes über ein rückgeführtes Normal zu bestätigen, so liefert die MSA keine Hilfestellung. Weitere wichtige Fragestellungen wie z. B. welchen Einfluss hat die Herstellqualität des auszuwählenden Normal oder die zulässigen Formabweichungen der hergestellten Produkte auf die Messwertabweichungen, so können diese auch nicht mit der MSA beantwortet werden. Hier sind bessere Beurteilungsverfahren wie z.B. die Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM oder die Prüfprozesseignung nach VDA Band 5- 2010 erforderlich. Die neuen Möglichkeiten werden anhand von Werkzeugschneiden erläutert und noch offene Punkte für zukünftige Projekte aufgezeigt.

1. EINLEITUNG

An einem Zerspanwerkzeug muss die Schneidkante eine definierte Geometrie und Härte aufweisen, um eine geplante Zerspanung an einem Werkstück auszuführen. Da die gesamte Prozessenergie beim Zerspanen an der Schneidkante umgesetzt wird, hat deren Gestaltung und Ausführung eine wesentliche Bedeutung auf die Oberflächenqualität und Standzeiten.

2. ANFORDERUNGEN, BEDEUTUNG

Da die Anforderungen an Produkte ständig höher werden sind auch Innovationen bei den Schneidwerkzeugen erforderlich. Ein Beispiel ist die Optimierung im Bereich der Gestaltung und Formgebung der Schneidkanten, um eine gute Oberflächengüte sowie einen niedrigen Werkzeugverschleiß der Zerspan Werkzeuge zu erzielen. In den letzten Jahren wurden Verbesserungen von Schneidkanten durch deren Präparation wie beispielsweise durch Bürsten, Strahlsanieren, Schleppscheiben, magnetisch-mechanische Verfahren und Laserverfahren erreicht. Diese Entwicklungen und Fortschritte der Fertigungstechnik konnten und können nur dann zu einem Optimum gebracht werden

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

wenn eine entsprechend genaue und zuverlässige Messtechnik zur Verfügung steht. Das ist eine Grundvoraussetzung um z.B. Fehlentscheidungen auf Basis von Messergebnissen aus Versuchsmessreihen zu vermeiden.

Richtige Beurteilung von Radien und Kanten 10_MQS

Anforderungen, Bedeutung, Notwendigkeit, Trends

Spanende Werkzeuge und Schneidkanten

- Qualitätsanforderungen**
 - Maßgenauigkeiten
 - Formgenauigkeiten
 - Oberflächen-, Rautiefekennwerte
- Technische Anforderungen**
 - Härte, Steifigkeit, Verschleißfestigkeit
 - Schneideigenschaften
 - Neue Materialien, Beschichtungen
 - Kantenpräparation
 - Komplexere Geometrien
 - Miniaturisierung
 - Hart-, Trockenbearbeitung
 - Ultrapräzisionsbearbeitung
- Kosten**

© MQS-Consulting Dipl.-Ing./FH Rolf Otter 2011. Alle Rechte vorbehalten, auch bzgl. jeder Vervielfältigung, Vernetzung, Reproduktion, Bearbeitung. Weitergabe sowie für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen.
28.01.2012

Anforderungen der spanenden Werkzeuge und Schneidkanten

Die herausragende wirtschaftliche Bedeutung der Werkzeugschneiden in der spanenden Industrie hat das Thema einer genaueren Radien Messung stark beflügelt. Neben den Verbesserungen der sog. Kantenpräparation wuchs auch die Notwendigkeit die Fortschritte mit entsprechend genauer Messtechnik analysieren und dokumentieren zu können

Richtige Beurteilung von Radien und Kanten 10_MQS

Wirtschaftliche Bedeutung

Beispiel Standzeiterhöhung von Werkzeugschneidkanten

Schneiden von Kunststoff-Folien

Standzeitverlängerungen
von bis zu **1500%**
gegenüber Hartmetall-
klingen durch **Diamant**
beschichtete Klingen.

Verbesserung der Schnittqualität durch:

- Schärfe der Schneidkante (Verrundungsradius)
- Oberflächenrauheit an der Schneidkante.

Quelle: GFD Gesellschaft für Diamantprodukte mbH

Fazit: Treiber sind die **Einsparungspotenziale** durch **Verbesserungen** von **Standzeit und Oberflächenqualität** (bis **7-stelligen € -Beträge** möglich!)

© MQS-Consulting Dipl.-Ing./FH Rolf Otter 2011. Alle Rechte vorbehalten, auch bzgl. jeder Vervielfältigung, Vernetzung, Reproduktion, Bearbeitung. Weitergabe sowie für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen.
28.01.2012

Wirtschaftliche Bedeutung der Radien-Präparation und -Messung

3. MESSTECHNIK TAKTIL UND OPTISCH

3.1 Zusammenhang Fertigungs- und Messtechnik

In der Vergangenheit lag das Hauptaugenmerk bei der Zerspanungs-Messtechnik auf die Kraftmessung. Seit einigen Jahren ist man in der Lage aufgrund neuer Messtechniken die geometrischen Merkmale der Schneidkante fertigungsnah zu analysieren. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen z.B. den Schneidkantenradius und die Schartigkeit der Schneide schnell und genau zu erfassen. Somit konnten über effiziente Versuche enorme Verbesserungen wie z.B. die Kantenpräparation mit gezielten Verrundungsradien bzw. Verrundungsformen hergestellt, getestet und optimiert werden. Dieses Erfolgsduo von hervorragender Fertigungstechnik geht einher mit entsprechend zugehöriger, genauer Messtechnik. Nur wenn beide „Partner“ richtig aufeinander abgestimmt sind, lässt sich bestmögliche Qualität bei niedrigen Kosten herstellen. Diese Erkenntnis ist zwar nicht neu, wird aber immer noch nicht in der Industrie durchgängig umgesetzt.

3.2 Forderungen an die Messtechnik

So kommt es auch nicht von ungefähr, dass z.B. bei Audits nach den (inter-) nationalen Standards und Normen das Thema „Fähigkeitsnachweis und Bestimmung der Messunsicherheit von qualitätsrelevanten Prüfmitteln“ eine zentrale Rolle einnimmt. Dabei gilt es auch den Nachweis der Richtigkeit der Messergebnisse durch rückgeführte Normale über akkreditierten Stellen zu berücksichtigen. Dies ist immer dann ein Problem wenn ein neues Prüfmerkmal bzw. eine neue Ausprägung dessen am industriellen Horizont erscheint und deshalb auch noch keine Normale und Kalibriermöglichkeiten hierfür vorhanden sind. Eine gewisse Vorreiterrolle bei den Schneidkanten-Radien Normalen hat sich die Fa. GFMesstechnik GmbH, Teltow-Berlin erworben. Unter deren Regie wurden die ersten Radien Normale mit unterschiedlichen Radien hergestellt und von einem nationalen metrologischen Institut kalibriert.

Somit war die erste Voraussetzung gegeben, nämlich mit rückgeführten Radien Normalen den Nachweis der Fähigkeit nach Verfahren 1 (cg/cgk) zu führen. Beim sog. Verfahren 2 bzw. 3 werden mit einer bestimmten Anzahl von realen Prüfbjekten unter tatsächlichen Arbeitsbedingungen entweder von 3 Prüfern bzw. von einer automatisierten Messeinrichtung je zwei Messreihen durchgeführt und ausgewertet (GRR).

3.3 Beobachtungen und Probleme bei der Radien Messung

Führt man z.B. mit einem taktilen Oberflächenmessgerät die Fähigkeitsanalysen nach Verfahren 1 durch, so stellt man möglicherweise fest, dass abhängig von der spezifizierten Toleranz die cg-Werte i.O. sind. Aber die cgk-Werte durchaus bei wiederholter Ausführung stärkeren Schwankungen unterliegen und auch n.i.O. sein können.

Bei dem Fähigkeitsverfahren 2 mit 3 Bedienern und je 2 Wiederholungsmessungen an 10 unterschiedlichen Werkzeugschneiden erkennt man, dass die Messwertstreuungen deutlich größer sind als bei Verfahren 1.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

Tendenziell besser schneidet das Verfahren 3 ab, bei dem kein sog. Bedienereinfluss vorliegt.

Häufige Reaktionen bei derartigen n.i.O.-Ergebnissen sind das benutzte Messgerät zu sperren bzw. zu verwerfen und auf ein noch genaueres Messgerät (soweit vorhanden) zu wechseln. Das Ergebnis kann durchaus ernüchternd sein, denn man hat jetzt mehr Geld ausgegeben und stellt nach einer erneut durchgeführten Fähigkeitsanalyse fest, dass trotz genauerem und teurem Messgerät auch ähnlich schlechte Ergebnisse produziert werden. Die allgemeine Erwartung ist aber, dass mit einem genaueren Messgerät bessere bzw. fähigere Ergebnisse erzielt werden.

3.4 Anwendungsbereich und Grenzen der Fähigkeitsanalyse

Die Frage die sich nun stellt, was kann denn überhaupt die Methode der Fähigkeitsanalyse für einen Beitrag zur richtigen und umfassenden Beurteilung von Messsystemen bzw. von gesamten Messprozessen leisten?

Eine erste Antwort gibt die gewonnene Erfahrung und Analyse des Verfahrens. Die Fähigkeitsanalysen sind gut geeignet um Abnahmen von Messgeräten durchzuführen, wenn es sich dabei um sog. Standardfälle (also keine kleinen Toleranzen, keine zerstörenden Prüfungen) mit wiederholbar messbaren Normalen und Prüfobjekten handelt. Weiterhin setzt man stillschweigend voraus, dass die Herstellqualität der Normale und die Kalibrierunsicherheit keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis darstellen, was bei normalen Toleranzen meist auch gegeben ist.

Damit bei der Abnahme das Ergebnis nicht durch die unterschiedlichen Formabweichungen der Prüfobjekte beeinflusst wird, prüft man diese immer an der gleichen Stelle.

Somit kann man mit diesem Verfahren z.B. keine Aussagen machen in welchem Bereich Messwerte auftreten werden wenn z.B. der Kunde an einer beliebigen Stelle am Prüfobjekt seine eigenen Messungen durchführt (Konformitätsprüfung).

Man muss sich auch darüber im Klaren sein, dass die Abnahme mittels einer Fähigkeitsanalyse voraussetzt, dass die elementaren Messversuche und Grundsatzanalysen zur Bestätigung des Messverfahrens mit zugehörigen Einstellparametern im Vorfeld ermittelt wurden und das Messgerät bereits die Serientauglichkeit erbracht hat.

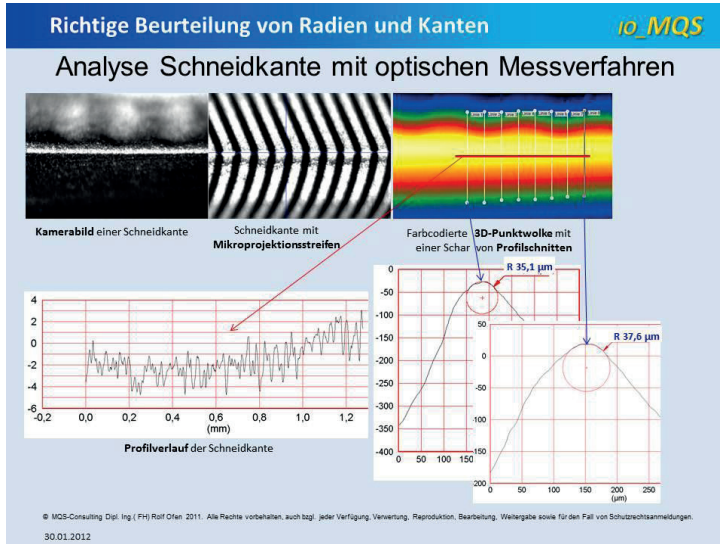
3.5 Neue Ansätze der Messtechnik

Was also tun, wenn die Fähigkeitsverfahren keinen Aufschluss über mögliche Unzulänglichkeiten bei der Abnahme geben. Hier helfen nur eine systematische und tiefgreifende Analyse der gesamten Messkette zusammen mit einem aussagekräftigeren Bewertungsverfahren wie z.B. nach VDA 5 Ausgabe 2010 Prüfprozesseignung.

Sehr hilfreich können auch Vergleichsmessungen mit dreidimensionalen Messverfahren sein. Insbesondere die optischen Messverfahren haben sich in den letzten Jahren erfreulich für solche Aufgabenstellungen gut entwickelt. So

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

stehen mittlerweile auch einige optische Messgeräte auch für die Radien Messung zur Verfügung.



Analyse einer Schneidkante mit optischen Streifenprojektionsverfahren

Schon eine erste dreidimensionale Messung mit einem optischen Messgeräte zeigt, dass die Ursache für die Probleme bei der Fähigkeitsanalyse nicht die Genauigkeit des Messgerätes ist, sondern die relativ inhomogene Oberfläche der Prüflinge. Bei „normalen“ Anwendungen mit nahezu idealen Normalen ist man eine relativ kleine Formabweichungen gewohnt. Im vorliegenden Fall zeigt sich auch aufgrund des komplizierten Herstellungsprozesses an der Radien Spitze eine Abweichung von einigen Mikrometern. Damit ist klar, dass bei einer Wiederholungsmessung nur dann ein guter Wert zustande kommen kann, wenn genau die gleiche Messstelle wieder getroffen werden kann. Weiterhin wird bei 3-d Messungen mit realen Werkzeugschneiden klar, dass diese nicht nur einen einzigen Radius Wert besitzt sondern über den Schneiden Verlauf verteilt eben unterschiedliche Radien aufweisen. Somit liegt es nahe eine geänderte Auswertestrategie zu wählen, und zwar weg von nur einer nicht repräsentativen einzelnen Messstelle zu deutlich mehr Messlinien entlang der Schneide. Weitere Optimierungen wurden z.B. bei den Auswertealgorithmen zur Bestimmung des Radiuswertes einer nicht idealen Radien Form erreicht, sowie eine rechnerische Ausrichtung der Schneidkante um Messfehler zu vermeiden.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Richtige Beurteilung von Radien und Kanten **10_MQS**

Gegenüberstellung der Messverfahren: taktil-optisch

- Bei der **taktilen** Messung wird die Werkzeugkante mit der Schneide (Kugel) des Messgerätes abgetastet.
- Die taktile Messung ist **zweidimensional**.
- Da die Kontaktpunkte variieren, müssen die Messwerte rechnerisch **korrigiert** werden.
Dazu ist eine exakte Messung der Schneidenform bzw. Kugelform zur Kalibrierung erforderlich.
- Die Tastnadel (-kugel) unterliegt stetigem **Verschleiß**.
- Die **Auflösung** ist durch den Schneidenradius (typisch: > 20 µm), Kugelradius (150 µm) und Formabweichung begrenzt.

1 Tastelement
2 Prüfobjekt
3 aufgezzeichnetes Profil

- Bei der **optischen** Messung wird zu jedem Kamerapixel ein Höhenwert erfasst.
- Die optische Messung ist **dreidimensional**.
- Die Messung erfolgt **berührungslos**.
- Es gibt keine **Verschleißteile**.
- Die **Auflösung** ist durch die **Lichtwellenlänge** (0,3 – 0,8 µm) und **Punktdichte** (je nach Messfeld von 0,4 – 3 µm) begrenzt.

© MQS-Consulting Dipl.-Ing. I. FH Rost-Offen 2011. Alle Rechte vorbehalten, auch bzgl. jeder Vervielfältigung, Verbreitung, Reproduktion, Bearbeitung. Weitergabe sowie für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen.
31.01.2012

Vergleich der Radien Messverfahren: taktil-optisch

3.6 Neue Ansätze der Beurteilungsverfahren

Nachdem sich bei der Radien Messung gezeigt hat, dass die bisher angewandten Fähigkeitsanalysen die Probleme nicht oder nur ungenügend aufzeigen, besteht daher die Notwendigkeit ein aussagekräftigeres Beurteilungsverfahren einzusetzen. Eine Möglichkeit hierzu ist die Berücksichtigung aller Einflusskomponenten nach GUM. Da der GUM sehr allgemein gehalten ist, bietet sich die praxisorientierte Methode nach der neuesten Ausgabe des VDA 5 Prüfprozesseignung an. Hier besteht die Möglichkeit alle Einflussgrößen zu berücksichtigen wie z.B. die Qualität der Einstellnormale und deren Kalibrierunsicherheit zu berücksichtigen. Außerdem können die möglichen Messwertschwankungen aufgrund der Formabweichung bereits im Vorfeld beurteilt werden.

Aktiv	Einflussgr.	Symbol	Typ	—	—	u	Rang	Messsystem
☒	Auflösung 0,1µm	u _{RE}	B			0,028868	4*	TOL = 10,0
☒	Kalibrierunsicherheit U=0,7µm	u _{CAL}	B			0,35000	2	%RE = 1,00%
☒	Wiederholbarkeit am Normal	u _{EV}	A			0,10693	3	u _{MS} = 1,21131
☐	Linearität	u _{LIN}	B					U _{MS} = 2,42262
☐	Bias	u _{BI}	A					Q _{MS_max} = 15,00%
☒	Formabweichung R-Normal +/-2µm	u _{RES}	B			1,15470	1	Q _{MS} = 48,45%
	Messsystem	u _{MS}				1,21131		TOL _{MIN/UMS} = 32,3016
								Gesamtbeurteilung

Messsystemeignung, Methode: 1-Linienmessung am Radien Normal

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

All diese Optionen eröffnen die Möglichkeit die einzelnen kritischen Einflussgrößen über die berechnete Rangfolge zu erkennen und neue und bessere Verfahren zu erarbeiten und umzusetzen. Im vorliegenden Beispiel wurde anstelle der (taktilen) 1-Linienmessung am Normal auf ein optisches Messgerät nach dem Streifenprojektionsverfahren umgestellt. Anstelle von nur einer Messlinie an dem nicht idealen Radien Normal mit einer Formabweichung von $\pm 2 \mu\text{m}$, können nahezu beliebig viele Messlinien über das Radien Normal gelegt werden. Als weitere Verbesserung wurde ein Fadenkreuz auf dem Normal angebracht, das von dem Messgerät als Nullpunkt erkannt wird. Damit kann zusätzlich genauer sprich wiederholbarer gemessen werden.

Aktiv	Einflussgr.	Symbol	Typ	—	—	u	Rang	Messsystem
☒	Auflösung 0,1µm	URE	B			0,028868	4*	TOL = 10,0
☒	Kalibriersicherheit U=0,7µm	UCAL	B			0,35000	1	%RE = 1,00%
☒	Wiederholbarkeit am Normal	UEVR	A			0,10693	3	U _{MS} = 0,38375
☐	Linearität	ULIN	B					U _{MS} = 0,76751
☐	Bias	UBI	A					Q _{MS_max} = 20,00%
☒	Formabw.R-Normal $\pm 0,2 \mu\text{m}$; 3-d	UREST	B			0,11547	2	Q _{MS} = 15,35%
	Messsystem	UMS				0,38375		TOL _{MIN-UMS} = 7,67507
								Gesamtbeurteilung

Messsystemeignung, Methode: 100-Linienmessung am Radien Normal

Bei der Beurteilung des gesamten Messprozesses müssen die weiteren Einflussgrößen berücksichtigt werden. Insbesondere die Formabweichungen der Radien von realen Schneidkanten sind wie die Analyse zeigt die Hauptunsicherheitskomponente. Im Beispiel wurden nur $\pm 3 \mu\text{m}$ angesetzt, diese Werte können in der Praxis auch deutlich höher sein.

Aktiv	Einflussgr.	Symbol	Typ	—	—	u	Rang	Messprozess
☒	Vergleichbarkeit Prüfer	U _{AV}	A					U _{MP} = 1,79177
☒	Wiederholbarkeit am Prüfobjekt	UEVO	A			0,23805	3	U _{MP} = 3,58354
☐	Vergleichbarkeit Vorrichtungen	UGV	A					Q _{MP_max} = 30,00%
☐	Stabilität	USTAB	A					Q _{MP} = 71,67%
☒	Wechselwirkungen	UIAI	A			[pooling]		TOL _{MIN-UMP} = 23,8903
☒	Objekteinfluss $\pm 3 \mu\text{m}$	U _{OBJ}	B			1,73205	1	Gesamtbeurteilung
☐	Temperatur	UT	B					
☐	Rest Messprozess	UREST	B					
	Messprozess	UMP				1,79177		

Messprozesseignung, Methode: 1-Linienmessung mit realen Schneiden

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Auch hier ist die Lösung dieses Problems eine andere Wahl der Erfassung und Auswertung der rel. unregelmäßigen Schnitten.

☒	Vergleichbarkeit Prüfer	U_{AV}	A				
☒	Wiederholbarkeit am Prüfobjekt	U_{EVO}	A			0,23805	2
☐	Vergleichbarkeit Vorrichtungen	U_{GV}	A				
☐	Stabilität	U_{STAB}	A				
☒	Wechselwirkungen	U_{IAI}	A			[pooling]	
☒	Objekteinfluss +/-0,3µm 3-d	U_{OBJ}	B			0,17321	3
☐	Temperatur	U_T	B				
☐	Rest Messprozess	U_{REST}	B				
	Messprozess	U_{MP}				0,47170	

Messprozess	
U_{MP}	= 0,49035
U_{MP}	= 0,98070
Q_{MP_max}	= 30,00%
Q_{MP}	= 19,61%
$TOL_{MIN-UMP}$	= 6,53798
Gesamtbeurteilung	

Messprozesseignung, Methode: 100-Linienmessung mit realen Schnitten

4. FAZIT, AUSBLICK

Nicht immer führt eine Steigerung der sog. Messgerätegenauigkeit zum gewünschten Ziel. Insbesondere bei Prüfobjekten mit relativ kleinen Toleranzen spielt oft die Kalibrierunsicherheit und die Formabweichung der Prüfobjekte eine entscheidende Rolle. Gerade diese Haupteinflussgrößen bleiben bei der Fähigkeitsanalyse unberücksichtigt. Daher bietet es sich an, mit neuen Ansätzen der Messtechnik (berührungslosen, flächenhaften Messverfahren, Ausrichtestrategien,) und aussagekräftigen Beurteilungswerkzeugen wie der VDA 5 -2010 eine deutlich bessere Lösung für solche Fälle zu erreichen. Für die Zukunft bleiben noch einige Aufgaben offen. Eine möchte ich ansprechen, nämlich die flächenhafte Kalibrierung der Normale.

5. QUELLEN

[ISO/TS 16949 2009] Qualitätsmanagementsystem für die Automobilindustrie, Technische Spezifikation

[VDA 5 - 2010] Prüfprozesseignung, Eignung von Messsystemen, Eignung von Mess- und Prüfprozessen, Erweiterte Messunsicherheit, Konformitätsbewertung

[DIN V ENV 13005 1999] Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)

Anwendung von Filtern nach ISO 16610 an unterbrochenen Oberflächenprofilen

Jörg Seewig

*Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik
Gottlieb Daimler Straße, 67663 Kaiserslautern
seewig@mv.uni-kl.de*

Abstrakt: ISO 16610 bietet eine Vielzahl neuer und auch bekannter Filter zur Auswertung von Profilen und zunehmend auch flächenhaft erfasster Oberflächenmessdaten an. Eine besondere Bedeutung haben dabei lineare Filter, da sie sehr häufig im Bereich der Gestaltmesstechnik eingesetzt werden. Zu dieser Klasse gehört das Gaußfilter nach ISO 16610-21 und das Splinefilter nach ISO 16610-22. Eine Eigenschaft des Splinefilters ist, dass die auswertbare Messstrecke durch die Filterung nicht verkürzt wird. Durch eine entsprechende Anpassung nach ISO 16610-28 gilt dies auch für das Gaußfilter. Die Filter eignen sich daher zur Auswertung sehr kurzer aber auch unterbrochener Messstrecken. Nach einem kurzen Rückblick auf die Theorie der Profilfilterung wird in diesem Beitrag das Verhalten der Filter im Randbereich diskutiert.

1. EINLEITUNG

Das Profil einer Oberfläche setzt sich aus der Überlagerung einer Vielzahl unterschiedlich lateral und vertikal ausgeprägter geometrischer Strukturen zusammen. Die Trennung „kleinskaliger“ von „großskaligen“ Strukturen erfolgt durch Anwendung eines Profilfilters. In Abhängigkeit des Herstellungsprozesses entstehen sehr unterschiedliche Oberflächen, für die die ISO eine Toolbox geschaffen hat, um eine bestmögliche Auswertung der Messdaten hinsichtlich Funktion und Fertigung zu gewährleisten. Vier unterschiedliche Filtertypen sind derzeit verfügbar:

- Lineare Filter zur „klassischen Auswertung“ von Messdaten.
- Robuste Filter zur Auswertung von Oberflächen mit einer ausgeprägten Kernrauheit (z. B. plateauartig).
- Wavelets, mit denen das Oberflächenprofil durch Filterbänke in verschiedene Skalenbereiche zerlegt und gegebenenfalls zusammengesetzt werden kann.
- Morphologische Filter, bei denen die Oberfläche von der materialfreien oder materialerfüllten Seite durch strukturierende Elemente (wie z. B. kreisförmige) angetastet wird. Der Verlauf des Mittelpunktes des strukturierenden Elementes bildet die Filterlinie.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

Im Bereich der Rauheitsmesstechnik werden überwiegend lineare Profilfilter eingesetzt. Zu diesem Filtertyp gehört das bekannte Gaußfilter nach ISO 16610-21 [ISO16610-21] und das Splinefilter nach ISO 16610-22 [ISO16610-22]. Lineare Profilfilter zeichnen sich dadurch aus, dass die Filterlinie für ein sinusförmiges Profil ebenfalls wieder sinusförmig ist. Allerdings wird die Amplitude des sinusförmigen Profils wellenlängenabhängig beeinflusst. Lineare Profilfilter für die Gestaltmesstechnik sind phasenkorrekt, d. h. es tritt kein Versatz zwischen dem sinusförmigen Profil und der sinusförmigen Filterlinie auf. Die Filter werden z. B. für die Auswertung von Rauheit (offene Profile) aber auch von Rundheit (geschlossene Profile) eingesetzt. Eine Besonderheit z. B. des Splinefilters ist, dass die Länge der resultierenden Filterlinie gleich dem Eingangsprofil ist. Auch das Gaußfilter liefert durch eine Anpassung nach ISO 16610-28 [ISO16610-28] eine unverkürzte Filterlinie. Diese Möglichkeit der Filterung ist besonders bei sehr kurzen Messstrecken von Vorteil. Aber auch offene oder geschlossene Profile, die beispielsweise durch Nuten unterbrochen sind, lassen sich hiermit gut auswerten. Im Folgenden wird dargestellt, wie sich die Filter im Randbereich verhalten und welche Möglichkeiten bestehen, die Filterwirkung an unterbrochenen Profilen noch weiter zu verbessern. Es werden ausschließlich die Filtergleichungen für offene Profile diskutiert.

2. LINEARE PROFILFILTER

Die lineare Profilfilterung lässt sich durch Anwendung des Faltungsintegrals ausführen:

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

mit $z(x)$ als Profil vor der Filterung, $w(x)$ der Filterlinie und $s(x)$ als Gewichtsfunktion, die maßgeblich die Eigenschaften des Filters vorgibt. Anschaulich lässt sich das Faltungsintegral nach Gleichung (1) wie folgt interpretieren: betrachte die Gewichtsfunktion an einer beliebigen Stelle x des Profils und spiegele (falte) an dieser Stelle die Werte der Gewichtsfunktion. Multipliziere (gewichte) die Profilkpunkte mit der gespiegelten Gewichtsfunktion $s(x-\xi)$. Die Fläche des Produktes $s(x-\xi) \cdot z(\xi)$ liefert die Filterlinie $w(x)$ an der Stelle x . Die Gewichtsfunktion erfüllt dabei die Bedingung

$$\int_{-\infty}^{\infty} s(\xi) \cdot d\xi = 1 \quad (2)$$

um sicher zu stellen, dass ein Profil mit konstanten Werten $z(x) = \text{const}$ nicht verstärkt wird. Das Faltungsintegral beschreibt eine gleitende Mittelwertbildung des Profils mit einer vorgegebenen Gewichtsfunktion. Die Filterwirkung wird per Definition an einem sinusförmigen Profil mit der Wellenlänge λ und der wellenlängenabhängigen Amplitude $A(\lambda)$ erklärt. Um die Rechnung zu vereinfachen,

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

verwendet man als Eingangsprofil die komplexwertige Exponentialfunktion $z(x) = A(\lambda) \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot \pi / \lambda \cdot x)$. Einsetzen in Gleichung (1) liefert nämlich

$$w(x) = A(\lambda) \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot \pi / \lambda \cdot x) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} s(\xi) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi / \lambda \cdot \xi) \cdot d\xi. \quad (3)$$

Das Filter antwortet mit dem Eingangsprofil $z(x)$ und der wellenlängenabhängigen Filterübertragungsfunktion

$$H(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\xi) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi / \lambda \cdot \xi) \cdot d\xi. \quad (4)$$

Die Breite der Gewichtsfunktion ist entscheidend für die Ausmittelung der Profildordinaten. Als Grenzwellenlänge $\lambda = \lambda_c$ definiert man eine Amplitudenübertragung von 50%, d.h. $H(\lambda_c) = 0,5$. In Abbildung 1 ist die Gauß'sche Gewichtsfunktion für zwei unterschiedliche Grenzwellenlängen dargestellt. Je kleiner die Grenzwellenlänge ist, desto schmaler ist die Gewichtsfunktion und umgekehrt. Die unterschiedliche Höhe der Gewichtsfunktion folgt aus der Flächenbedingung gemäß Gleichung (2). Die langwelligen Profianteile („großskalig“) werden durch die Filterlinie $w(x)$ beschrieben während die kurzwelligen Werte („kleinskalig“) durch die Differenz zwischen Profil und Filterlinie $r(x) = z(x) - w(x)$, dem Rauheitsprofil, dargestellt werden.

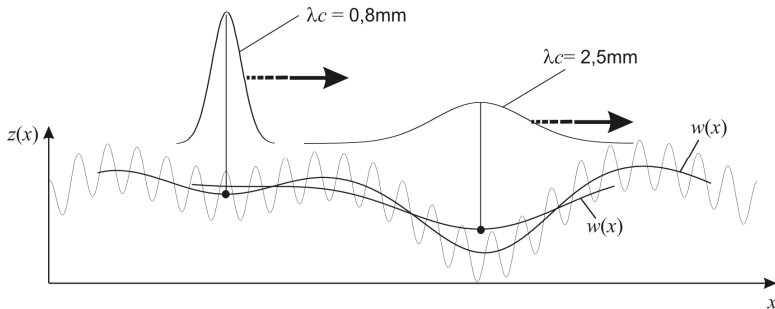


Abbildung 1: Gewichts- und resultierende Filterlinie für zwei unterschiedliche Grenzwellenlängen λ_c .

Bisher wurde eine ortskontinuierliche Darstellung der Profilfilterung betrachtet. Die digitale Implementierung ortskontinuierlicher Filter im Rechner erfolgt in der Regel durch äquidistante Abtastung des Profils und der Gewichtsfunktion mit der Schrittweite Δx . Berücksichtigt man eine endliche Anzahl N an Abtastwerten, so folgt aus Gleichung (1)

$$w(n \cdot \Delta x) = \sum_{k=0}^{N-1} s(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x) \cdot z(k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x, \quad n = N_V, \dots, N-1-N_N \quad (5)$$

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

mit der äquivalenten Normierungsbedingung

$$\sum_{k=0}^{N-1} s(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x = 1, \quad n = N_V, \dots, N-1 - N_N. \quad (6)$$

Die Verkürzung der Filterlinie um N_V und N_N ist notwendig, damit die Gewichtsfunktion vollständig über dem Profil liegt, also ortsinvariant ist, und somit die Normierungsbedingung nach Gleichung (6) erfüllt. Hieraus folgt auch unmittelbar, dass die Gewichtsfunktion einen sogenannten kompakten Träger besitzen muss, d.h. außerhalb des Intervalls $n - k = [-N_N, \dots, N_V]$ muss die Gewichtsfunktion identisch null sein. Man bezeichnet diese Bereiche auch als Vor- und Nachlauf des Filters. Weiterhin ist entscheidend, dass die Schrittweite Δx klein genug ist, um die wellenlängenabhängigen Eigenschaften der Gewichtsfunktion nicht zu verändern. Gemäß Gleichung (4) sowie der Abtastung ortskontinuierlicher Profile gilt für die ortsdiskrete Filterübertragungsfunktion

$$H_{\Delta}(\lambda) = \sum_{k=-N_N}^{N_V} s(k \cdot \Delta x) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi / \lambda \cdot k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x. \quad (7)$$

Der Zusammenhang zwischen ortsdiskreter und ortskontinuierlicher Filterübertragungsfunktion ergibt sich aus der bekannten Signaltheorie [Oppenheim 2010] zu

$$H_{\Delta}(\lambda) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} H\left(\frac{\lambda \cdot \Delta x}{\Delta x - k \cdot \lambda}\right). \quad (8)$$

2.1 Das Gaußfilter nach ISO 16610-21 mit Korrektur nach ISO 16610-28

Nach ISO 16610-21 ist die Gewichtsfunktion des Gaußfilters wie folgt definiert

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda c} \cdot \exp\left(-\pi \cdot \left(\frac{x}{\alpha \cdot \lambda c}\right)^2\right), \quad \alpha = \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} = 0,4697\dots \quad (9)$$

Hieraus ergibt sich für die Filterübertragungsfunktion nach Gleichung (4)

$$H(\lambda) = \exp\left(-\pi \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \lambda_c}{\lambda}\right)^2\right) = \left(\frac{1}{2}\right)^{\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2}. \quad (10)$$

Der Verlauf der Gewichtsfunktion und der Filterübertragungsfunktion ist Abbildung 2 zu entnehmen. Da die Gauß'sche Gewichtsfunktion keinen kompakten Träger hat, muss sie horizontal begrenzt werden. Nach Krystek [Krystek 2006] kann die Gewichtsfunktion bei vernachlässigbaren Fehler außerhalb des Bereiches $\pm \lambda c$ auf null gesetzt werden. Für das diskrete Filter ergibt sich entsprechend $\pm \lambda c / \Delta x$ als Vor- und Nachlaufbereiche, wobei $\lambda c / \Delta x \geq 50$ betragen sollte. Um dennoch im Vor- und Nachlaufbereich filtern zu können, bietet ISO 16610-28 verschiedene Möglichkeiten an. Hier soll das Momenten-Kriterium zur Anwendung kommen. Im einfachsten Fall ist gewährleistet („retainment of the

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

0th moment“), dass die Fläche unter der Gewichtsfunktion immer gleich eins ist und somit konstante Profile von der Filterlinie exakt approximiert werden [See 2005]. Gleichung (5) muss hierzu nur wie folgt umgeformt werden:

$$w(n \cdot \Delta x) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} s(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x) \cdot z(k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x}{\sum_{k=0}^{N-1} s(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x}, \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (11)$$

D.h., die Gewichtsfunktion wird ortsabhängig skaliert, so dass die Gesamtfläche immer gleich eins ist. Diese Korrektur wirkt sich natürlich nur im Vor- und Nachlaufbereich der Filterung aus. Als äquivalente Gewichtsfunktion erhält man daher

$$s_n(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x) = \frac{s(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x)}{\sum_{k=0}^{N-1} s(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x}, \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (12)$$

Die Übertragungseigenschaften für sinusförmige Profile sind im Vor- und Nachlaufbereich ortsabhängig. Als Filterübertragungsfunktion erhält man für die drei möglichen Bereiche der Filterung (Vorlauf, Mitte, Nachlauf)

$$H_{\Delta}(\lambda) = \begin{cases} \sum_{k=-N_N-N_V+n}^n s_n(k \cdot \Delta x) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi / \lambda \cdot k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x & 0 \leq n < N_V \\ \sum_{k=-N_N}^{N_V} s_n(k \cdot \Delta x) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi / \lambda \cdot k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x & N_V \leq n < N - N_N \\ \sum_{k=n-N+1}^{n-N+1+N_N+N_V} s_n(k \cdot \Delta x) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi / \lambda \cdot k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x & N - N_N \leq n < N \end{cases} \quad (13)$$

2.2 Das Splinefilter nach ISO 16610-22

Das Splinefilter ist ein diskretes Filter. Aufgrund der besonderen Definition liefert das Splinefilter ortsdiskrete Gewichtsfunktionen die Gleichung (11) erfüllen und somit keine Vor- und Nachlaufbereiche aufweisen. Das Rauheitsprofil nach der Splinefilterung ist immer mittelwertfrei. Das Splinefilter ist auch invariant bzgl. einer Verkippung der zu messenden Oberfläche. Das Gaußfilter mit der zuvor dargestellten Korrektur besitzt diese letzte Eigenschaft nur im Intervall $[N_V, \dots, N-1-N_N]$.

Nach ISO 16610-22 lässt sich die Filtergleichung des Splinefilters als Matrixmultiplikation darstellen

$$\mathbf{w} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{z} \cdot \Delta x, \quad \mathbf{S} = \frac{(\mathbf{I} + \alpha^4 \cdot \mathbf{Q})^{-1}}{\Delta x}, \quad \alpha = \frac{1}{2 \cdot \sin(\pi \cdot \Delta x / \lambda c)} \quad (14)$$

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

wobei $\mathbf{z}$ ein Spaltenvektor mit den Profilordinaten ist und $\mathbf{w}$ ein Spaltenvektor mit den Werten der Filterlinie darstellt. Betrachtet wird hier das kubische Splinefilter. Für die Matrix $\mathbf{Q}$ gilt nach ISO 16610-22

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & & & & \\ -2 & 5 & -4 & 1 & & & \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ & & & 1 & -4 & 5 & -2 \\ & & & & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Jede Zeile der $N \times N$ Matrix $\mathbf{S}$ liefert die ortsdiskrete Gewichtsfunktion $s_n(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x)$. Das Übertragungsverhalten für das Splinefilter nach Gleichung (7) lässt sich zumindest für den Bereich einer ortsunveränderlichen Gewichtsfunktion leicht berechnen. Da bekannt ist, dass das Splinefilter bei einem sinusförmigen Profil $z(k \cdot \Delta x) = A(\lambda) \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot \pi / \lambda \cdot k \cdot \Delta x)$ mit der Filterlinie $w(k \cdot \Delta x) = H_\Delta(\lambda) \cdot z(k \cdot \Delta x)$ antwortet, so gilt durch Einsetzen in Gleichung (14) und unter Berücksichtigung von $\exp(i \cdot \varphi) + \exp(-i \cdot \varphi) = 2 \cdot \cos(\varphi)$

$$(\alpha^4 \cdot 2 \cdot \cos(2 \cdot \pi / \lambda \cdot 2 \cdot \Delta x) - \alpha^4 \cdot 8 \cdot \cos(2 \cdot \pi / \lambda \cdot \Delta x) + 1 + \alpha^4 \cdot 6) \cdot H_\Delta(\lambda) = 1. \quad (16)$$

Durch Anwendung trigonometrischer Additionstheoreme und nach Auflösen nach der gesuchten Filterübertragungsfunktion (siehe auch ISO 16610-22) gilt

$$H_\Delta(\lambda) = \left(1 + 16 \cdot \alpha^4 \cdot \sin(2 \cdot \pi / \lambda \cdot 2 \cdot \Delta x)^4\right)^{-1}. \quad (17)$$

2.3 Verhalten der Filter im Randbereich von Profilen

Bei unterbrochenen Profilen erfolgt die Filterung immer an einem Teilstück des gesamten Oberflächenprofils. Beim Gaußfilter tritt ohne Korrektur nach ISO 16610-28 dann ein erheblicher Verlust an auswertbaren Profilpunkten auf. Demgegenüber wird beim Splinefilter die Filterlinie automatisch bis in den Randbereich berechnet. Es soll nun untersucht werden, welche Übertragungseigenschaften das Gaußfilter mit Korrektur nach Kapitel 2.1 und das Splinefilter im Randbereich der Profile aufweisen. In Abbildung 2 ist zunächst der Fall dargestellt, bei dem sowohl das Splinefilter (grau strichlierte Kurve) als auch das Gaußfilter (schwarze Kurve) eine ortsinvariante Gewichtsfunktion aufweisen. Es wurde ein Verhältnis von $\lambda c / \Delta x = 1000$ gewählt. Links sind beide Gewichtsfunktionen entsprechend normiert dargestellt, rechts sind die Filterübertragungsfunktionen in Abhängigkeit des Quotienten $\lambda c / \lambda$ aufgetragen. Die Gewichtsfunktionen unterscheiden sich im Wesentlichen dadurch, dass beim Splinefilter auch negative Gewichte auftreten. Die Filterübertragungsfunktion beim Splinefilter fällt im Übergangsbereich im Gegensatz zum Gaußfilter etwas steiler ab.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

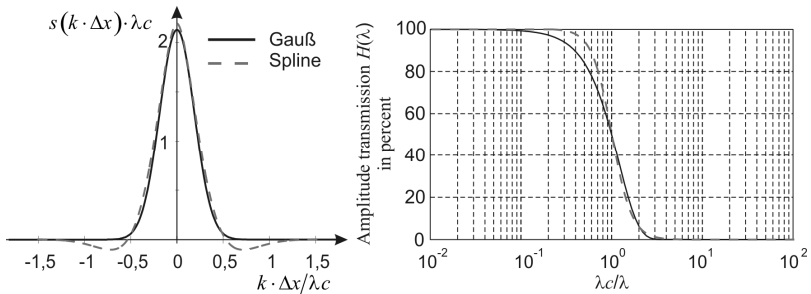


Abbildung 2: Gewichtsfunction (links) und Filterübertragungsfunktion (rechts) des Gauß- und Splinefilters.

Die negativen Werte der Gewichtsfunction bei der Splinefunktion wirken sich aus, wenn man unstetig verlaufende Profile filtert, wie z. B. eine Stufe (Abbildung 3). Hier schwingt die Filterlinie an der Unstetigkeitsstelle etwas über. Eingestellt wurde eine Grenzwellenlänge von $\lambda c = 0,8 \text{ mm}$.

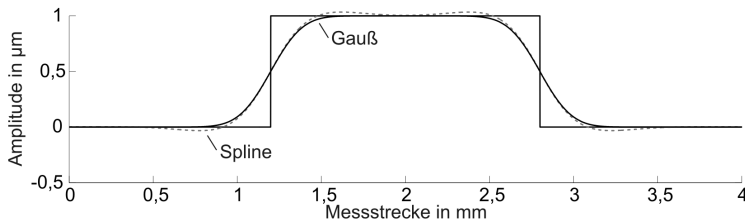


Abbildung 3: Verhalten des Gauß- und Splinefilters bei einer Unstetigkeitsstelle.

Um das Übertragungsverhalten der Filter im Randbereich darzustellen, wurde ein sinusförmiges Profil verwendet, dessen Wellenlänge gleich der Grenzwellenlänge des Filters ist. In Abbildung 4 sind vier Diagramme dargestellt. Oben ist die ortsabhängige Gewichtsfunction des Gaußfilters mit der Korrektur nach Kapitel 2.1 eingezeichnet. Es ist gut zu erkennen, dass die Gauß'sche Gewichtsfunction im Randbereich asymmetrisch abgeschnitten wird und dass eine Korrektur der Fläche erfolgt. Demgegenüber verändert die Gewichtsfunction beim Splinefilter im Randbereich ihre Gestalt. Wie sich die unterschiedlichen Gewichtsfunctionen auf den Betrag und die Phase der ortsvarianten Filterübertragungsfunktion auswirken ist in den unteren Diagrammen zu erkennen. Beim Splinefilter wirkt sich die veränderte Gestalt der Gewichtsfunction früher auf die Amplitudenübertragung aus als beim Gaußfilter. Gleiches gilt für den Phasenverlauf. Während am Rand des Profils die Amplitudenübertragung des Splinefilters von dem Sollwert stärker abweicht als es beim Gaußfilter der Fall ist, liegt das Splinefilter bei der Phase in diesem Bereich etwas besser.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

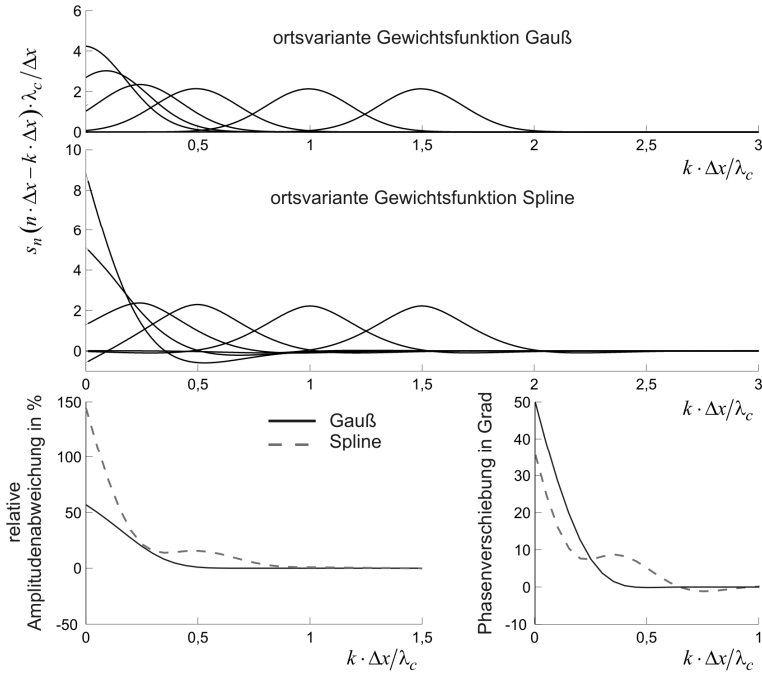


Abbildung 4: Verhalten des Gaußfilters mit Korrektur nach ISO 16610-28 und des Splinefilters im Randbereich. Es wurde ein sinusförmiges Profil mit einer Wellenlänge verwendet, die gleich der Grenzwellenlänge des Filters ist.

3. ALTERNATIVE AUSWERTUNG BEI UNTERBROCHENEN PROFILEN

Beim Gaußfilter kann das Filterverhalten im Randbereich verbessert werden, in dem das unterbrochene Profil nicht durch Einzelprofile dargestellt wird, sondern die Unterbrechung bei der Filterung ausgeblendet wird. Hierzu wird in Gleichung (11) eine zusätzliche Gewichtungsfunktion $\delta(k \cdot \Delta x)$ eingeführt, die den Wert 1 bei gültigen Profilordinaten und den Wert 0 im Bereich der Unterbrechung hat. Damit folgt für die Filterung am unterbrochenen Profil $z(k \cdot \Delta x)$:

$$w(n \cdot \Delta x) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} s(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x) \cdot \delta(k \cdot \Delta x) \cdot z(k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x}{\sum_{k=0}^{N-1} s(n \cdot \Delta x - k \cdot \Delta x) \cdot \delta(k \cdot \Delta x) \cdot \Delta x}, \quad n \in \{n | \delta(n \cdot \Delta x) \neq 0\}. \quad (18)$$

Die Wirkung dieser Art der Filterung ist in Abbildung 5 dargestellt.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radian

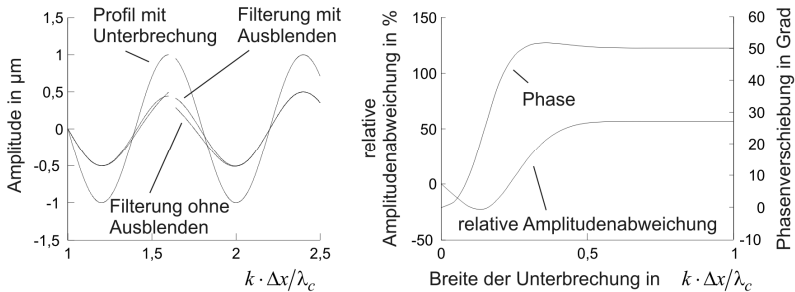


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Gaußfilterung für offene Profile und Korrektur nach ISO 16610-28 sowie für das Ausblenden der unterbrochenen Profilmomente.

Links ist ein Profil mit der Wellenlänge 0,8mm dargestellt. Gefiltert wurde mit einer Grenzwellenlänge von $\lambda_c = 0,8\text{mm}$. Rechts ist genau am Rand der Verlauf der Filterübertragungsfunktion in Abhängigkeit der Breite der Unterbrechung dargestellt. Je größer die Profilunterbrechung wird, desto mehr nähert sich der Wert für die relative Amplitudenabweichung und der Wert für die Phase dem Verhalten für offene Profile an (siehe Abbildung 4 an der Position 0).

Auch beim Splinefilter kann durch eine zusätzliche Gewichtsfunktion die Profilunterbrechung ausgeblendet werden. Hierdurch verbessert sich, wie beim Gaußfilter, das Filterübertragungsverhalten gegenüber der Filterung eines offenen Profils.

4. ZUSAMMENFASSUNG

ISO 16610 bietet mit dem Gaußfilter und Splinefilter eine Möglichkeit auch unterbrochene Profile auszuwerten – und zwar ohne Verlust an Profilmomenten. Die unterschiedlichen Abschnitte werden als eigenständige offene Profile behandelt und entsprechend gefiltert. Grundsätzlich verändert sich bei beiden Filtern die Gewichtsfunktion im Randbereich ortsabhängig. Hierdurch ändern sich natürlich auch die Übertragungseigenschaften und beide Filter arbeiten nicht mehr phasenkorrekt. Insbesondere bei realen Oberflächen spielen die veränderten Übertragungseigenschaften oftmals nur eine untergeordnete Rolle. Jedoch sollte stets geprüft werden, ob die unterbrochenen Profile tatsächlich sinnvoll mit dieser Art der Filterung auswertbar sind.

Eine Verbesserung lässt sich erreichen, wenn die unterbrochenen Profilmomente durch eine zusätzliche Gewichtsfunktion ausgeblendet werden. Allerdings ist diese Vorgehensweise in der ISO 16610 bisher nicht berücksichtigt. Die Implementierung als digitales Filter ist aber ohne Probleme möglich.

5. QUELLEN

- [Krystek 2004]** Krystek, M.: Die digitale Implementierung des Profilfilters nach DIN EN ISO 11562, Beuth ISBN 978-3-410-15861
- [Oppenheim 2010]** Oppenheim, A.V.; Schafer, R.W.: Discrete-time signal processing, ISBN 0-13-206709-9
- [See 2005]** Seewig, J.: Linear and robust Gaussian regression filters"; In: *Journal of Physics - Conference Series*, pp. 254-257, Huddersfield 2005, Volume 13, Issue 1
- [ISO16610-21]** Geometrical product specifications (GPS) - Filtration - Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters; Ausgabedatum: 2011-06
- [ISO16610-22]** Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 22: Lineare Profilfilter: Splinefilter; Ausgabedatum: 2006-11
- [ISO16610-28]** Geometrical product specifications (GPS) - Filtration - Part 28: Profile filters: End effects; Ausgabedatum: 2010-08

Anwendung einer Methode zur objektiven Bestimmung von Radian aus gemessenen Profilen

J. Frühauf¹, S. Jeß²

¹SiMETRICS GmbH Limbach-Oberfrohna, fruehauf@simetrics.de

²TU Chemnitz, Institut für Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung

Abstract: The nominal value of the radius of a stylus tip often differs from the real radius. For its determination a profil can be used which is measured over a sharp edge (raser blade). The evaluation of this profile needs the definition of the section of the profile relevant for the stylus tip. This definition is mostly influenced subjectively. The authors have developed an iterative method for an objective investigation of the relevant section including the straight parts of the profile belonging to the stylus cone or the facettes of the edge. The determination of the radius is based on a Gauss approximation. The poster contribution shows the application of this method to the determination of radii from profiles measured on different objects with dimensions from nm up to mm. AFM, different stylus profilers or an optical profiler were the used instruments for the measurement of profiles.

1. EINFÜHRUNG

Für die Bestimmung des Nadelradius eines Tastschnittgerätes nutzt man ein Profil, das beim Abtasten einer Kante entsteht, deren Radius wesentlich kleiner ist, als der Tastspitzenradius z. B. das Profil über die Schneide einer Rasierklinge [ISO 5436-1:2000]. Vorausgesetzt, dass die Messpunktdichte ausreichend groß ist, um aus dem Profilabschnitt der Kante einen Radius bestimmen zu können, bleibt eine subjektive Entscheidung notwendig, wo dieser Profilabschnitt beginnt und wo er endet [Ofen 2007]. Der näherungsweise kreisförmige Abschnitt geht nämlich auf beiden Seiten in Profilabschnitte über, die vom Konus der Tastnadel herrühren und die ebenfalls nur näherungsweise geradlinig sind.

Das Ziel der entwickelten Methode war es, den Einfluss der subjektiven Wahl der Grenzen des Kreisbogens auf das Ergebnis zu vermeiden [Frühauf 2010], [Vorburger 2011].

Der hier vorliegende Beitrag zeigt, dass diese Methode ganz allgemein die Bestimmung eines Radius in einem Profilabschnitt gestattet, der zwischen tangentialen geraden Bereichen liegt, ohne dass Beginn und Ende des kreisförmigen Bereiches markiert werden muss. Damit werden die besonders beim Vorliegen von Formabweichungen auftretenden subjektiven Einflüsse vermieden.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

2. BESCHREIBUNG DER METHODE ZUR RADIENTESTIMMUNG

Wir gehen hier im Unterschied zu [Frühauf 2010] davon aus, dass das vorliegende Profil $z(x)$ tatsächlich der Form des Objekts entspricht und nicht vom benutzten taktilen oder optischen Sensor beeinflusst ist.

Ein idealisierter Profilabschnitt, bei dem eine Gerade tangential in einen Kreisbogen und danach wieder in eine Gerade übergeht, ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Breite w der Kreisbogensehne markiert die Übergänge und die Geraden haben die Anstiegswinkel $\pm \alpha$.

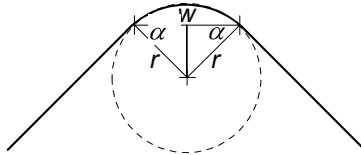


Abbildung 1: Profil eines Kreisbogens zwischen tangentialen Geraden

Der Radius wird durch folgende iterativ wiederholte Schritte ermittelt:

- Auffinden der Grenzen des Kreisbogens und
- Bestimmung des Radius aus den Messpunkten zwischen den Grenzen.

Start:

Als Ausgangswert wird der Nominalradius r_0 genutzt.

Für die Berechnung der Grenzen der x-Werte des Kreisbogens benötigt man den x-Wert des Kreismittelpunktes x_{M0} , als den man zunächst den x-Wert des Maximums $z_{\max}$ im Profil annimmt (sinngemäß $z_{\min}$ für konkave Profile): x_{M0} . Aus der Breite w_0 des Kreisbogenabschnitts, die man unter Benutzung eines Winkels α_0 (Nominalwinkel) der benachbarten geraden Profilabschnitte erhält:

$$w_0/2 = r_0 \cdot \cos \alpha_0 \quad (1)$$

ergeben sich die Grenzen dann zu

$$x_{0\text{vor}} = x_{M0} - w_0/2 \quad \text{und} \quad x_{0\text{nach}} = x_{M0} + w_0/2 \quad (2a,b)$$

Iterationen

Innerhalb dieser Grenzen kann nun ein Kreis mit der Methode der kleinsten Quadrate an die Messpunkte angepasst werden. Man erhält einen neuen Radius $r_{N=1}$ und einen neuen Kreismittelpunkt $x_{MN=1}$, $z_{MN=1}$.

Außerdem kann außerhalb dieser Grenzen der Winkel α aus den Punktmengen vor und nach dem Kreisbogen ermittelt werden, indem man den Anstiegswinkel $\alpha_{N=1}^*$ der Geraden nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und setzt:

$$\alpha_{N=1} = 90 - \alpha_{N=1}^* .$$

Damit lassen sich nun die Breite des Kreisbogens und seine Grenzen aus den Messwerten bestimmen. Da die Anstiegswinkel vor und nach dem Kreisbereich unterschiedlich sein können (asymmetrischer Bewertungswinkel φ , wenn die Probe nicht genau symmetrisch senkrecht zur Abtastrichtung ausgerichtet

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

ist), muss man die Gesamtbreite des Kreisbereichs aus unterschiedlichen Teilbreiten zusammensetzen: $w_{N=1} = w_{\text{vor } N=1} + w_{\text{nach } N=1}$

und es gilt: $w_{\text{vor } N=1} = r_{N=1} \cdot \cos \alpha_{\text{vor } N=1}$ (3a)

$$w_{\text{nach } N=1} = r_{N=1} \cdot \cos \alpha_{\text{nach } N=1} \quad (3b)$$

Man erhält als neue Grenzen des Kreisbogens:

$$x_{\text{vor } N=1} = x_{M \ N=1} - w_{\text{vor } N=1} \quad (4a)$$

$$\text{und} \quad x_{\text{nach } N=1} = x_{M \ N=1} + w_{\text{nach } N=1} \quad (4b)$$

Mit diesen Grenzen kann eine weitere Iteration vorgenommen werden.

Abbruch

Als Abbruchkriterium eignet sich der Vergleich der Breiten w_N und w_{N-1} . Ist Ihre Differenz kleiner als der Punktabstand Δx des Profils

$$|w_N - w_{N-1}| \leq \Delta x, \quad (5)$$

so ändert sich die für die Kreisapproximation benutzte Punktmenge nicht mehr, und r_N stellt den Radius des Kreisabschnittes dar. Eine weitere, abschließende Iteration bestätigt diesen Sachverhalt (dabei kann es auch zum „Schwingen“ um einen Messpunkt mehr oder weniger kommen).

Bei dieser Vorgehensweise muss sicher gestellt werden, dass eventuell von der Abtastmechanik systematisch hervorgerufene Verzerrungen des Profils korrigiert wurden (z. B. Bogenkorrektur [Frühauf 1998]).

3. SOFTWAREUNTERSTÜTZUNG DER RADIENTESTIMUNG

Zur schnellen und objektiven Bestimmung von Kantenradien mit Hilfe der beschriebenen Methode wurde die Software „**KantenRadius**“ entwickelt. Damit lassen sich Profile in den exportierbaren Formaten vieler Geräte laden. Sie werden in einem Profilenster als Diagramm angezeigt. Mit zwei Cursors kann der interessierende Bereich des Kreisbogens mit den Geraden in seiner Umgebung markiert werden. Die Eingabe der Nominal- bzw. Startwerte des Radius r_0 und des Winkels α_0 erfolgt in dafür vorgesehenen Fenstern. Nach dem schnellen Ablauf der Berechnung (meistens 3 bis 10 Iterationen) werden die ermittelten Ergebniswerte r_N und α_N zusammen mit der Formabweichung vom Gausskreis (Summe der Beträge des größten positiven und negativen Abstands vom Gausskreis) angezeigt. Außerdem werden in einem Fenster der ausgewählte Profilabschnitt mit den Übergängen Kreis – Geraden und in einem weiteren Fenster der Gausskreis mit den zugehörigen Messpunkten dargestellt. Beispiele dieser Diagramme sind in Abschnitt 4 eingebunden.

4. BEISPIELE FÜR DIE BESTIMMUNG VON RADIENTEN IN PROFILFENSTERN VERSCHIEDENER OBJEKTE

Die Beispiele sollen zeigen, dass die Methode anwendbar ist für Profile, die mit sehr unterschiedlichen Geräten (AFM, taktile und optische Geräte) und an Objekten mit sehr unterschiedlichen Größen (nm- bis mm-Bereich) gemessen

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

wurden. Dabei wird hier nicht mehr auf die in [Frühauf 2010] beschriebene Bestimmung des Tastnadelradius eingegangen, für die die Methode ursprünglich entwickelt wurde.

Neben den Abbildungen der Objekte werden nachfolgend die gemessenen Profile gezeigt, zusammen mit den für die Auswertung herangezogenen Abschnitten und den für die Radiusbestimmung iterativ ermittelten Grenzen zwischen dem Kreis und den Geraden und dem Gauss-Kreis mit den Messpunkten. Darunter werden die ermittelten Werte für die Winkel α , den Radius r und dessen Formabweichung angegeben.

4.1 Radien im nm-Bereich

Bei Strukturen der Mikrotechnik können Kanten und Spitzen mit Radien im nm-Bereich auftreten. Entsprechende Profile können aus AFM-Messungen extrahiert werden. Abbildungen 2a, b zeigen als Beispiel den Profilausschnitt eines Silizium-Rillengitters, bei dem die Dreiecksform des Rillenquerschnitts durch geeignete Ätzprozesse erzeugt wurde.

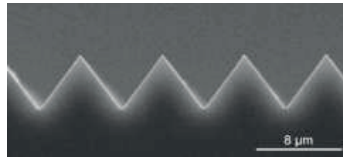


Abbildung 2a: Silizium-Rillengitter mit Dreiecksprofil (REM-Aufnahme)

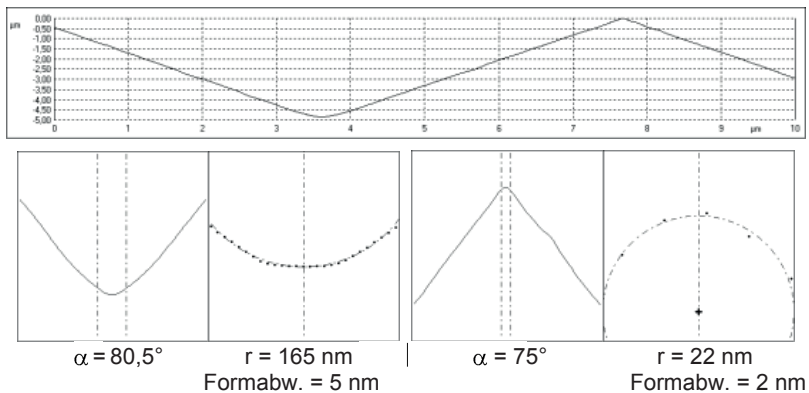


Abbildung 2b: Oben: Gemessenes Profil der Dreiecksrillen,
Unten: Profilausschnitte mit den Grenzen Kreis-Geraden sowie Gauss-Kreis
mit Messpunkten, darunter die ermittelten Winkel, Radien und Formabweichungen. Links: für das Minimum, rechts: für das Maximum.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

Der konvexe Radius rechts wird vom Tip-Radius des AFM dominiert, da der Radius der Kante der Si-Struktur durch TEM-Abbildung des abgedünnten Querschnitts zu etwa 5 nm bestimmt wurde. Der konkave Radius links wird vom Ätzprozess dominiert. Besonders im Falle des Minimums links erkennt man den allmählichen Übergang der Geraden in den Kreisbereich.

4.2 Radien im μm -Bereich

Ein anderes Silizium-Rillengitter besitzt verrundete Rillen mit Radien im μm -Bereich. Es wurde durch eine analoge Ionenätztechnik hergestellt. Abbildung 3a zeigt die Ansicht dieses Siliziumchips, und ein Profilausschnitt wird in Abbildung 3b wiedergegeben. Auch an diesem Beispiel wird deutlich, dass der Beginn des Kreisbereiches nur ungenau erkennbar ist.



Abbildung 3a: Silizium-Rillengitter mit verrundetem Profil

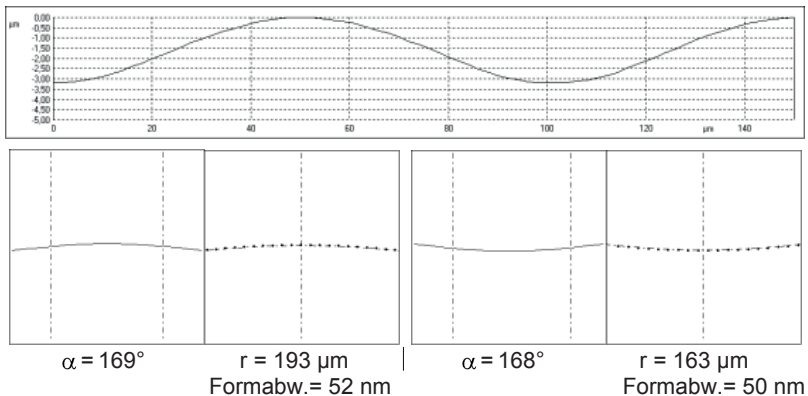


Abbildung 3b: Oben: Gemessenes Profil (Ausschnitt),
 Unten: Profilausschnitte mit den Grenzen Kreis-Geraden sowie Gauss-Kreis
 mit Messpunkten, darunter die ermittelten Winkel, Radien und Formabweichungen. Links: für das Maximum, rechts: für das Minimum.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

4.3 Radien im mm-Bereich an spanend geformten Teilen

Bei Werkstücken, die mit konventionellen Formgebungsverfahren hergestellt werden, wird häufig die Realisierung definierter Radien angestrebt. Die Überprüfung der Fertigungstoleranzen erfordert eine objektive Radienbestimmung. Bei spanender Bearbeitung kann der Radius relativ genau eingestellt werden.

Die Abbildungen 4a, b betreffen zwei rotationssymmetrische Teile mit jeweils zwei Bereichen unterschiedlichen Durchmessers. Der Übergang vom großen zum kleinen Durchmesser erfolgt mit einem Absatz und einem Radius.



Abbildung 4a: Rotationssymmetrische Stahlteile mit Verrundungen am Übergang von großem zu kleinem Durchmesser

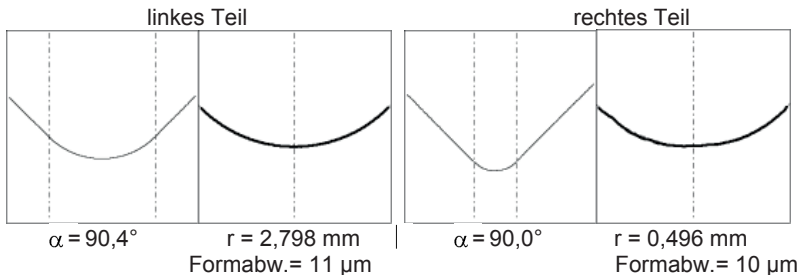
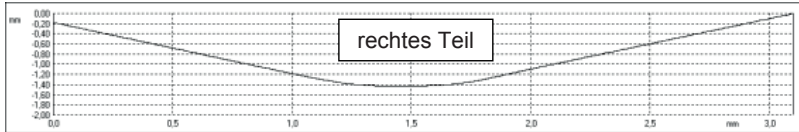
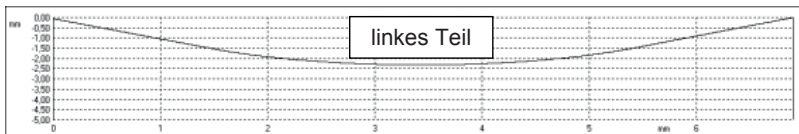


Abbildung 4b: Oben und Mitte: gemessene Profile in der Kehle des linken und rechten Teils von Abbildung 4a (die Teile wurden dafür um ca. 45° gekippt).

Unten: die Profilabschnitte mit den Grenzen Kreis-Geraden sowie Gauss-Kreis mit Messpunkten und ermitteltem Winkel, Radius und Formabweichung.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

4.4 Radien im mm-Bereich an Blechbiegeteilen

Beim freien Biegen von Blechband entstehen Außen- und Innenradien, die von der Blechdicke abhängen und wenig beeinflussbar sind und insbesondere Abweichungen von der Kreisform und ungenaue Übergänge zum geraden Bereich besitzen. Trotzdem sollte ein charakteristischer Radius bestimmbar sein. Abbildung 5a zeigt einen gebogenen Blechwinkel. In Abbildung 5b ist die Bestimmung der Radien außen und innen illustriert.



Abbildung 5a: Blechwinkel mit großem Außen- und kleinerem Innenradius

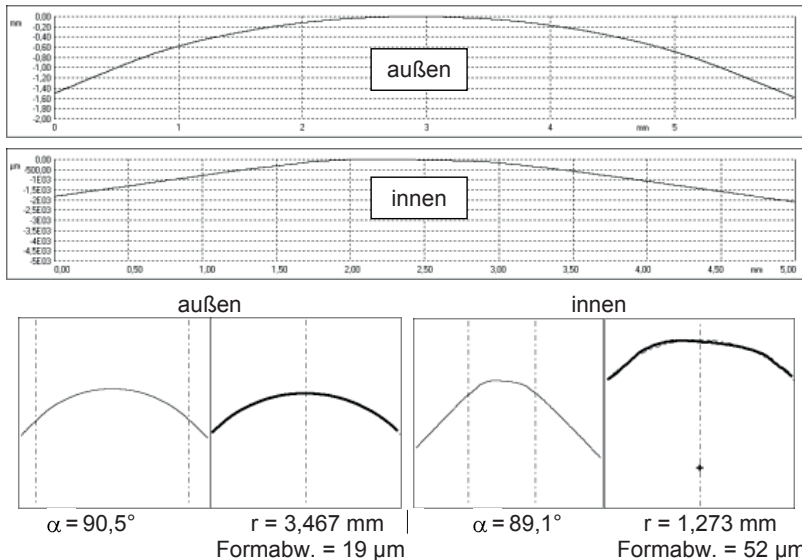


Abbildung 5b: Oben und Mitte: gemessenes äußeres und inneres Profil.
Unten: die Profilabschnitte mit den Grenzen Kreis-Geraden sowie Gauss-Kreis mit Messpunkten und ermitteltem Winkel, Radius und Formabweichung, links für das äußere und rechts für das innere Profil.

1. IMSAS-Treffen: Kanten und Radien

5. DISKUSSION

Die Ungenauigkeit der ermittelten Radien hängt von der Größe des Abstands und der Streuung der Messpunkte ab.

Während das Verfahren die Grenzen der Geraden am Kreisbogen automatisch bestimmt, werden deren äußere Grenzen willkürlich gewählt (Auswertebereich). Weichen die Messpunkte an den äußeren Grenzen stark von den Regressionsgeraden ab, entsteht ein meist geringer Einfluss des ermittelten Radius vom gewählten Auswertebereich.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Die vorgestellte Methode gestattet die objektive Bestimmung von Radien in gemessenen Profil- oder Konturabschnitten, bei denen ein kreisförmiger Bogen zwischen tangentialen Geraden liegt.
- Weil dabei die Grenzen des Kreisbogens automatisch bestimmt werden, besteht kein Einfluss einer subjektiven Wahl dieser Grenzen.
- Die Methode erweist sich als besonders vorteilhaft bei Formabweichungen im Übergangsbereich, da hier die Grenzen schwer erkennbar sind.
- Das Verfahren wurde für Profile und Konturen von Körpern unabhängig von deren Abmessungen (Nano- bis Millimeterbereich) erfolgreich getestet.

Danksagung: Die Autoren danken Herrn T. Dziomba (AFM, PTB Braunschweig) und Frau E. Schubert (TU Chemnitz) für das Überlassen gemessener Profile.

7. QUELLEN

[ISO 5436-1:2000] DIN EN ISO 5436-1: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale Teil 1: Maßverkörperungen (ISO 5436-1:2000)

[Ofen 2007] Ofen, R: 3-D-Erfassung von Radien und Kanten an Werkzeugen und Bauteilen. In Optische Messungen technischer Oberflächen in der Praxis. VDI-Berichte Nr. 1996 (2007) 53-68

[Frühauf 2010] Frühauf, J.; Seifert, M.; Jeß, S.: Methode zur Bestimmung des Nadelradius bei Tastschnittgeräten. *tm Technisches Messen* **77** (2010), 12 S. 638 - 642

[Vorburger 2011] Vorburger, T.V.; Zheng, A.; Renegar, T.B.; Song, J.-F.; Ma, L.: An Iterative Algorithm for Calculating Stylus Radius Unambiguously. 13th Intern. Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Twickenham Stadium on 12-15 April 2011, Proceedings pp. 638 - 642

[Frühauf 1998] Frühauf, J.: Problems of contour measuring on microstructures using a surface profiler. *Meas. Sci. Technol.* **9** (1998) 293-296