

Möglichkeiten und Herausforderungen bei der taktilen 2D Rauheitsmessung auf Konturen

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der Technischen Universität Kaiserslautern

zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Tatjana Kusnezowa

aus Moskau

Kaiserslautern 2016

D386

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig Prof. Dr.-Ing. Horst Bodschinna
Tag der mündlichen Prüfung:	27. Juni 2016

Vorwort

„Was gestern unmöglich war, das ist heute auch unmöglich! Nur, was gestern als unmöglich erschien, könnte heute möglich sein ...“

Wolfgang J. Reus

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig für sein mir entgegengebrachtes Vertrauen und die großen eingeräumten Freiräume sowohl bei meiner Lehrtätigkeit als auch beim Anfertigen meiner Dissertation. Die Förderung zum einen der selbstständigen wissenschaftlichen Arbeit und zum anderen der Möglichkeit der freien und kreativen Umsetzung von eigenen Projekten in der Lehre haben mich persönlich stark weiterentwickelt und mir viel Freude bereitet.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Bodschinna für die Übernahme der Berichterstattung und die rege fachliche Diskussion in meiner Prüfung bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für die erfolgreiche Zusammenarbeit. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Sebastian Rief für seine wertvolle fachliche Unterstützung und Diskussion. Weiter gilt mein Dank Herrn Patrick Schäfer, der mich mit: „Einfach machen!“ stets motiviert und angetrieben hat. Bedanken möchte ich mich ebenso bei Herrn Matthias Eifler für seine stetige Hilfe und seinen Rat. Nicht zuletzt danke ich Herrn Felix Ströer für die produktive Zeit in unserem zwischenzeitlichen Zweierbüro und für die konstruktiven Anregungen.

Ebenso danke ich dem Supportteam des Lehrstuhls Frau Marieluise Demuth und Herrn Matthias Fischer für ihre Unterstützung.

Ich danke meinen Studentinnen und Studenten, insbesondere Frau Katja Klauer, Frau Leonore Keil, Frau Lea Mayer und Herrn Anton Illi für ihre tatkräftige Unterstützung, die zum Erfolg dieser Dissertation beigetragen haben. Herrn Andreas Oberländer danke ich für seine Ruhe im Chaos, durch die wir durch viele Praktika gekommen sind.

Des Weiteren bedanken möchte ich mich bei meinem Projektpartner der Jenoptik AG und besonders bei Herrn Dr. Raimund Volk für die erfolgreiche Zusammenarbeit.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Sie hat mich immer unterstützt, mich frei entfalten lassen und mich zu stetigem Lernen und Neugier motiviert.

Herrstein, im April 2017

Tatjana Kusnezowa

Kurzfassung

Die taktile Rauheitsmesstechnik ist ausgiebig erforscht, genormt und dient für andere Messprinzipien und Messverfahren als Referenz. Allerdings fehlen für eine Rauheitsmessung auf Konturen Grundlagenuntersuchungen, Richtlinien und Normen. Eine Messung und Auswertung der Rauheit und Kontur in einem Schritt bringen der Industrie wertvolle ökonomische Vorteile. Kombinierte Rauheits- und Konturenmessplätze erlauben bereits heute aufgrund ihres vertikalen Messbereiches von mehreren Millimetern und einer vertikalen Auflösung im Nanometerbereich eine kombinierte Rauheits- und Konturenmessung in nur einem Messvorgang. Das Ziel der vorliegenden Dissertation sind Grundlagenuntersuchungen, um starke und schwache Einflüsse bei der taktilen 2D Rauheitsmessung auf Konturen zu ermitteln. Einflussgrößen und Messparameter werden aufgezeigt, analysiert und neue Ansätze für die Messstrategie und die Auswertung präsentiert und untersucht. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen erfolgen an ausgewählten Normalen und technischen Oberflächen mit den vorgestellten Parameterkombinationen. Die Auswertung der Rauheitskennwerte wird mit den erläuterten Auswertemethoden durchgeführt und es erfolgt eine Analyse der Profile. Für ein vollständiges Messergebnis wird die Messunsicherheit bestimmt und diskutiert.

Abstract

The tactile roughness metrology is extensively researched, standardized and serves as a reference for other principles of measurement and measurement procedures. However, for the roughness metrology on contours fundamental investigations, guidelines and standards are missing. A roughness and contour measurement and evaluation in one step have an economic advantage for industry. Rather, present combined roughness and contour measurement instruments allow a combined roughness and contour measurement, due to their vertical range of a few millimetres and a vertical resolution in the range of nanometres. In this thesis fundamental investigations of the tactile 2D roughness metrology on contours are presented, to identify weak and strong influences. Influencing variables and measuring parameters are determined and analysed. Further, new approaches for the measuring strategy and evaluation are introduced and investigated. The experimental investigations are performed with measurement standards and technical surfaces with the presented parameter combinations. The evaluation of the roughness parameters is achieved by the introduced evaluation methods. Additionally, an analysis of the profiles is realized. For a complete measurement result measurement uncertainty is determined and discussed.

Inhaltsverzeichnis

Summary	XI
Nomenklatur	XIV
1 Problemstellung und Zielsetzung.....	1
2 Fertigungsmesstechnik.....	3
2.1 Grundprinzip der taktilen 2D Rauheits- und Konturenmessung.....	4
2.1.1 Rauheitsmessung	5
2.1.2 Konturenmessung	14
2.1.3 Zusammenfassung und Gegenüberstellung	16
2.2 Industrielle Messplätze	17
2.3 Beispiele für Messaufgaben.....	19
2.4 Messabweichungen und Messunsicherheit	20
3 Vorbetrachtungen	25
3.1 Mittelpunktprofil und Berührprofil	27
3.2 Messeinrichtung	28
3.3 Einflussparameter.....	28
3.4 Verwendete Proben	30
3.5 Wahl der Parameter	31
3.6 Messeinstellungen	43
3.7 Taststrecke, Abtastung und Messverfahren.....	44
3.8 Änderung der relativen Tastergeschwindigkeit	46
3.9 Software und Berechnung.....	50
4 Experimentelle Untersuchungen.....	53
4.1 Mittelpunktprofil und Berührprofil	53
4.2 Voruntersuchungen	58
4.2.1 Normale.....	59
4.2.2 Technische Oberflächen.....	61
4.3 Hauptuntersuchungen.....	65
4.3.1 Ergebnisse der Hauptuntersuchungen.....	68
4.3.2 Profile.....	79

5	Messunsicherheit.....	87
6	Zusammenfassung	95
7	Ausblick.....	98
8	Leitfaden für eine Messung von Rauheit auf Konturen	99
	Anhang	100
	Anhang A: Interpolierender Gaußfilter (IpL).....	100
	Anhang B: Messdaten	102
	Abbildungsverzeichnis.....	120
	Tabellenverzeichnis	122
	Veröffentlichungen	128
	Betreute studentische Arbeiten.....	129
	Literaturverzeichnis	130
	Lebenslauf.....	139

Summary

The production measurement metrology plays a key role in the quality control of products. Quick and reliable results are demanded. The quality control proofs for example different characteristics of a surface of a product. One property is the micro-geometry, which can be examined by the roughness. Another property is the macro-geometry, which is characterized by the contour. Roughness is essential because it provides information about the quality of the surface. The surface quality determines the function of a component significantly. The tactile roughness metrology is extensively researched, standardized and serves as a reference for other principles of measurement and measurement procedures. However, for the roughness metrology on contours fundamental investigations, guidelines and standards are missing. A roughness and contour measurement and evaluation in one step have an economic advantage for industry. Rather, present combined roughness and contour measurement instruments allow a combined roughness and contour measurement, due to their vertical range of a few millimetres and a vertical resolution in the range of nanometres. One difference between the roughness and contour metrology is the measuring process. During the contour measuring process the tracing element performs a vertical deviation in the millimetre range. By comparison, during the roughness measuring process the tracing element performs a very small vertical deviation in the micrometre range. Another difference is the used profile for evaluation. The roughness metrology uses the profile which is the locus of the centre of an ideal tactile sphere (centre profile). The contour metrology uses the touching profile of an ideal tactile sphere (touching profile).

In this thesis fundamental investigations of the tactile 2D roughness metrology on contours are presented. New concepts for the measuring strategy and evaluation are introduced and influences are identified and analysed. The experimental investigations are performed with measurement standards and technical surfaces. The specimens were manufactured by two different processes: turning and grinding and have different roughnesses.

For the comparison of the centre and touching profile technical surfaces were used. The differences of the profiles and the chosen roughness parameters were analysed. Important signal processing steps for the evaluation of the data are shown as well. The investigations for roughness on contours were carried out on an inclined plane. Different angles of inclination were chosen and all measurements were performed in ascending as well as descending measuring direction. Further, measurement parameters like the measuring speed, the probing force and the distance of profile points were varied. Eight measurement parameters were evaluated by four introduced evaluation methods. For form removal the least squares and total least squares methods were used. For interpolation a spline and an interpolating Gaussian filter were used.

It was determined that the traversing length is shorter with ascending and longer with descending measuring direction. Thereby the relative velocity of the stylus is changing. It is slower with ascending and faster with descending measuring direction. A faster velocity leads to a take-off of the probe tip. This can cause impacts on the surface which can damage and destroy the probing tip and the surface. The investigation proves that a combined roughness and contour measurement is possible even with steep angles of 45° . However certain measurement parameters have different influences on the roughness parameter.

Periodic profiles show very good results independent of the inclination angle, the measuring direction, the probing force and roughness. Important is the used evaluation method. Accurate roughness parameters were evaluated with the total least squares method. Further, depending on roughness, the inclination angle and the measuring parameters, the evaluated roughness parameters are significantly higher to the reference parameters in comparison to the periodic profiles.

Three categories were classified for the parameters with strong, weak and rarely or no influences on the roughness measurement on contours. A strong influence has the measuring speed depending on the probing force and the distance of profile points. Further, the angle of inclination and the measuring direction have a strong influence depending on the manufacturing process and the roughness. A weak influence has the angle of inclination depending on the probing force, the measuring direction and the measuring speed. Rare or no influences have the angle of inclination depending on the distance of profile points and the measuring speed depending on the manufacturing process and the roughness. Furthermore, the distance of profile points depending on the measuring direction, the probing force, the manufacturing process and the roughness has rare or no influence on the roughness measurement on contours.

For a complete measurement result measurement uncertainty was determined and discussed. The measurement uncertainty of the periodic and aperiodic profiles is independent of the angle. With comparable roughness the measurement uncertainty of the periodic profiles is lower than of the aperiodic profiles. Further, the smooth surfaces of both periodic and aperiodic profiles have a significant higher measurement uncertainty than the specimens with a rougher surface.

In summary, the presented thesis answers questions concerning measuring strategy and evaluation of roughness parameters for a roughness measurement on contours. A combined roughness and contour measurement and evaluation are possible even with steep angles of 45° . This holds a high potential. Benefits are major time savings and that the time consuming alignment of components become no longer necessary. However, the measuring and evaluation strategy must be chosen very accurate to achieve reliable results with a small measurement uncertainty.

Based on this thesis further investigations on a sphere or complex freeform surfaces can be conducted. The next step is the development of a measurement standard for roughness measurement on contours. For this measurement standard different factors like the manufacturing process, roughness, angle of inclination and measuring direction must be considered. Furthermore, the presented results can contribute to the VDI/VDE guideline “Roughness on contours” and for a new ISO standard, which would fill the present gap.

Nomenklatur

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m/s ²	Beschleunigung
d	μm	Durchmesser des Rubin-Kugelnormals
he	nm	Verformungstiefe, elastischer Anteil, ruhender Taster
hep	nm	Verformungstiefe, elastoplastischer Fall, ruhender Taster
hepv	nm	Verformungstiefe, elastoplastischer Fall, bewegter Taster
hp	nm	Eindrucktiefe, rein plastischer Fall, ruhender Taster
hp*	nm	elastoplastische Verformung, plastischer Anteil, ruhender Taster
hpv	nm	Eindrucktiefe, rein plastischer Fall, bewegter Taster
hpv*	nm	elastoplastische Verformung, plastischer Anteil, bewegter Taster
le	mm	Einzelmessstrecke
lm	mm	Messtrecke
ln	mm	Vor- und Nachlaufstrecke
lt	mm	Taststrecke
r	μm	Tastspitzenradius
rb	mm	Radius des Tasters
rm	μm	effektiver Radius
rk	μm	Radius des Scheitelkrümmungskreises einer Wurfparabel
v	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit
vreal	mm/s	reale Geschwindigkeit

E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
Fa	mN	Antastkraft
Fs	mN	statische Messkraft
Fx	mN	Zugkraft in x-Richtung
Fy	mN	Tastkraft in y-Richtung
Fxfurch	mN	Furchungsanteil in x-Richtung bei reiner Gleitreibung für glatte Oberflächen
Fxgeo	mN	Geometrieanteil in x-Richtung für raue Oberflächen
Fxgleit	mN	Tastkraft in x-Richtung bei reiner Gleitreibung auf glatten Oberflächen
Fxhaft	mN	Tastkraft in x-Richtung bei reiner Haftreibung auf glatten Oberflächen
H	μm	Abhebehöhe
Ht		Härte
Hv		Vickershärte
Lc		Abschneidewert
Mr1	%	Materialanteil bestimmt durch die Schnittlinie, die die herausragenden Spitzen von dem Rauheitskernprofil abtrennt
Mr2	%	Materialanteil bestimmt durch die Schnittlinie, die die tiefen Täler von dem Rauheitskernprofil abtrennt
P	μm	Profilpunktabstand
PSm	μm	Mittlere Rillenbreite der Profilelemente innerhalb der Einzelmessstrecke le des P-Profiles
Ra	μm	arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten innerhalb der Einzelmessstrecke le
Rk	μm	Kernrautiefe
Rmr(c)		Materialanteil des Profils (R-Profil)

Rpk	μm	reduzierte Spitzenhöhe, mittlere Höhe der herausragenden Spitzen über dem Rauheitskernprofil
Rq	μm	quadratischer Mittelwert der Profilordinaten innerhalb der Einzelmessstrecke
RSm	μm	mittlere Rillenbreite der Profilelemente innerhalb der Einzelmessstrecke l_e des R-Profiles
Rvk	μm	reduzierte Riefentiefe, mittlere Tiefe der Profiltäler unterhalb des Rauheitskernprofils
Rz	μm	größte Höhe des Profils innerhalb der Einzelmessstrecke l_e
Rz1max	μm	maximale Rautiefe
T	ms	Abhebezeit
W	μm	Abhebeweite
α	$^\circ$	Neigungswinkel zwischen x- und z-Achse
β	$^\circ$	Neigungswinkel zwischen x- und y-Achse
γ	$^\circ$	Kegelwinkel des Tasters
δ		empirische Standardabweichung
κ	$^\circ$	Winkel zwischen Tastelement und Vorschubgerät
λ_c	mm	Grenzwellenlänge
λ_s	μm	Profilfilter
τ	$^\circ$	Neigungswinkel zwischen y- und z-Achse
μ_G		Koeffizient der Gleitreibung
μ_H		Koeffizient der Haftreibung
μ_p		Poissonzahl
μ_R		Reibwert

1 Problemstellung und Zielsetzung

In der Fertigung zählen Schnelligkeit, Präzision und Wirtschaftlichkeit. Die Forderung nach höherer Produktqualität stellt, zum Beispiel für sensible Produkte aus der Automobilindustrie oder Medizintechnik, sehr hohe Qualitätsanforderungen. Um diese zu erfüllen und eine einwandfreie und gleichbleibende Qualität der Produkte zu garantieren, wird in verschiedenen Stadien der Produktion Messtechnik eingesetzt, bei Zwischenprodukten, inline oder am Ende des Fertigungsprozesses. Somit spielt die Messtechnik, oder Fertigungsmesstechnik für die Qualitätskontrolle eine entscheidende Rolle. Dabei zählt nicht nur eine schnelle Messung, sondern ein sicheres Ergebnis muss garantiert sein, das heißt, die Fertigungsmesstechnik muss zuverlässige Informationen über das Produkt liefern. Diese Informationen garantieren eine ressourceneffiziente und transparente Produktion und geben Auskunft über die Beherrschbarkeit des Fertigungsprozesses.

Bei der Qualitätskontrolle von Werkstücken oder Produkten werden verschiedene Anforderungen gestellt. Anforderungen sowohl an die Mikrogeometrie hinsichtlich der Oberflächenstruktur, der Rauheit und an die Makrogeometrie hinsichtlich der Kontur. Rauheit ist ein Maß für die Oberflächengüte, die die Funktion eines Bauteil maßgeblich bestimmt. Es gilt, die gewählten Rauheitskenngrößen im Mikrometerbereich schnell, präzise und sicher zu messen. Eine schnelle, präzise und sichere Messung muss selbstverständlich ebenfalls für die Konturenmessung garantiert werden. Zu beachten ist, dass das Messen von Rauheit mit Tastschnittgeräten genormt ist, dagegen fehlen für das Messen von Konturen und für Rauheit auf Konturen mit Tastschnittgeräten Normen.

Die Zeit spielt für die Fertigungsmesstechnik in den meisten Fällen eine außerordentliche Rolle. Es gibt Produkte, die zudem eine 100 %-Prüfung durchlaufen oder komplexe Konturen aufweisen, was die Fertigungsmesstechnik vor verschiedene Herausforderungen stellt. Eine Problemstellung, um erheblich Mess- und Auswertzeit einzusparen, ist das Messen und Auswerten von Rauheit und Konturen in einem Schritt. Heute werden diese beiden Merkmale getrennt gemessen und ausgewertet. Dabei erlauben kombinierte Rauheits- und Konturenmessplätze aufgrund ihres vertikalen Messbereiches von mehreren Millimetern und einer vertikalen Auflösung im Nanometerbereich eine Rauheits- und Konturenmessung in nur einem Messvorgang.

Da eine Messung von Rauheiten auf Konturen nach heutiger Normung nicht möglich ist, zeigt sich, dass Messgeräte heute schon mehr können, als es in den Normen festgeschrieben ist. Weitere Beispiele dafür sind, dass bereits Bogenbewegungen des Tastelements berücksichtigt und korrigiert und aus nichtäquidistanten Messpunkten äquidistante Profilpunkte berechnet werden.

Die Messung von Rauheit auf Konturen ist eine große Lücke, die geschlossen werden muss. Es besteht der Bedarf eine neue Richtlinie und Norm zu entwickeln. Damit beschäftigen sich die VDI/VDE-Fachausschüsse 3.24 „Konturmessung“ und 3.25 „Oberflächenmessung“.

Aufgrund des Messhubs des Tasters beim Messen von Rauheit auf Konturen ergeben sich Fragestellungen betreffend der Auswirkungen auf die Taststrecke, die Tasterdynamik, den Antastwinkel und den Profilkpunktstand beim Messvorgang. Ebenso wirken sich die Steigungen auf die Auswertung von Rauheitskenngrößen aus, da die Auswertung nur für Oberflächen, die senkrecht zur Tastnadel gradlinig abgetastet sind normiert ist. Somit müssen die klassischen, standardisierten Auswertestrategien für die Rauheit überarbeitet werden und neue Lösungen gefunden werden. Dafür sind Grundlagenuntersuchungen, die Grenzen und Möglichkeiten aufzeigen, notwendig. Es müssen neue Definitionen geschrieben und neue Messbedingungen und Auswertestrategien festgelegt werden.

Danach können die folgenden Kernfragen beantwortet werden: Ist eine den hohen Anforderungen gerechte, dem Stand der Technik angemessene, Rauheitsmessung auf Konturen möglich? Welche Messabweichungen treten dabei auf? Werden die Anforderungen bezüglich Messbedingungen, einer anwendergerechten Mess- und Auswertestrategie, einem stabilen, sicheren und schnellen Messvorgang und einer kleinen Messunsicherheit gerecht? Die Ergebnisse dieser Arbeit können Beiträge für die neue Norm Rauheit auf Konturen liefern.

Für die genannte Problemstellung werden in dieser Arbeit Lösungen vorgestellt. Da die 2D Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten ausführlich genormt und untersucht ist und zudem als Referenz für zum Beispiel optische Messverfahren gilt, ist es sinnvoll von den Rauheitsnormen auszugehen, um Untersuchungen für die 2D Messung von Rauheiten auf Konturen durchzuführen.

Zuerst werden in Kapitel 2 die Fertigungsmesstechnik in die Fertigung eingeordnet und das Grundprinzip und Auswertemethoden der Rauheits- und Konturenmesstechnik erläutert. Es folgen der Stand der Technik kombinierter industrieller Rauheits- und Konturenmessplätze und Beispiele von kombinierten Messaufgaben. Weiter werden die Messabweichungen bei der Rauheits- und Konturenmessung beschrieben. Im Anschluss folgen in Kapitel 3 Vorbetrachtungen zu der Fragestellung Rauheit auf Konturen. Es folgt im Kapitel 4 die experimentelle Durchführung und Auswertung. Im nächsten Kapitel 5 wird die Messunsicherheitsbetrachtung durchgeführt. Nach der Zusammenfassung im Kapitel 6 und dem Ausblick in Kapitel 7 schließt die Arbeit mit einer Empfehlung für die Messung von Rauheit auf Konturen in Kapitel 8.

2 Fertigungsmesstechnik

In der Fertigung wird das Qualitätsmanagement (QM) nach der DIN EN ISO 9000 – Reihe, mit Grundlagen nach DIN EN ISO 9000 [DIN 9000] und Anforderungen nach DIN EN ISO 9001 [DIN 9001] immer wichtiger [Dut02]. Dadurch ist die Produktion heute für die Qualität der produzierten Teile verantwortlich, mit dem Ziel einer beherrschten Fertigung [Kef15]. Die Fertigungsmesstechnik (FMT) ist ein wesentliches Element des QM in der Fertigung und ist der Oberbegriff für Mess- und Prüfaufgaben beim gesamten industriellen Entstehungsprozess und im gesamten Lebenszyklus des Produkts [Kef15] [Pfe10]. Heutige Produktionsbedingungen sind charakterisiert durch einen hohen Automatisierungsgrad, kurze Produktlebensdauer, geringe Fertigungstiefe und gestiegene Qualitätsanforderungen [Pfe10]. Damit sind die wesentlichen Anforderungen an die FMT Schnelligkeit, Robustheit, Präzision, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit. [Dut02], [Imk12].

Eine weitere Anforderung ist die Integration der Messtechnik in die Produktionsabläufe, um Messergebnisse schneller zu erhalten und damit effizienter nutzen zu können. Gerade der Einsatz von Messtechnik bei Zwischenprodukten oder inline hilft Fehler früh zu erkennen und eine Fehlproduktion zu vermeiden. Dieser Vorteil spart Geld und Zeit. Zudem besteht die Möglichkeit, die Bauteile mit entstandenen Fehlern sofort im Prozess nachzubearbeiten. Weiter besteht eine bessere Kontrolle und Korrektur von Umgebungseinflüssen. [Dut02], [Imk12], [Tut06]

Diese prozessorientierte FMT hilft Qualitätsregelkreise aufzubauen und stabiler zu machen, den Prozess zu optimieren und systematische Abweichungen zu minimieren. [Kef15], [Tut06] Die FMT misst und überprüft Qualitätsmerkmale und die einzuhaltenden Toleranzen von Werkstücken. Damit werden zum einen die Anforderungen kontrolliert und zum anderen die Funktion des Werkstückes sichergestellt [Tut06].

Die vorgegebenen Merkmale, wie Rauheitskennwerte oder Konturelemente, gewährleisten ein funktionsfähiges und sicheres Produkt. Sie haben grundlegenden Einfluss auf die Lebensdauer, Zuverlässigkeit und den Wirkungsgrad des Werkstücks. [Dut02], [Tut06] Messen heißt dabei eine qualitative und quantitative Aussage über die Eigenschaften eines Werkstückes und des Fertigungsvorgangs zu geben. Voraussetzung für das Messen sind eine eindeutig definierte Messgröße und ein eindeutig definiertes Bezugsnormale. [Kun84]

Beim Messen müssen Kompromisse eingegangen werden. Durch zeitintensive Messabläufe können hohe Messkosten zu Betriebskosten und Investitionskosten hinzukommen. Es muss ein Kompromiss zwischen, zum einen vielen Messungen, die zeitintensiv sind, aber eine sehr gute statistische Absicherung bedeuten und zum anderen Stichproben geschlossen werden. [Tut06]

Prüfen heißt zu Überprüfung, ob die vergebenen Forderungen, an das Produkt erfüllt werden [Pfe10]. Dafür gibt es heute eine Vielzahl von Messprinzipien. Zu den traditionellen taktilen Messprinzipien kommen optische, pneumatische und computertomografische Verfahren hinzu. [Vol13]

Eine wichtige Aufgabe haben zudem Normen und Richtlinien für die Fertigung, denn sie enthalten Grundlagen für die FMT [Kef15]. Normen haben großen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Wert, sie tragen zum Wirtschaftswachstum und zum Bruttoinlandsprodukt bei und dies stärker als Patente und Lizenzen. Sie führen zu höherer Sicherheit, besserer Qualität und Schutz der Umwelt. Für Unternehmen bringen Normen enorme Vorteile, wie kürzere Entwicklungs- und Produktionszeiten und Kostenersparnis, weitere siehe Hartlieb [Har09]. Es gibt unterschiedliche Arten von Normen. Grundsätzlich kann zwischen dem Grad und Inhalt der Norm unterschieden werden. Neben den in Deutschland häufig gebrauchten deutschen DIN Normen und internationalen DIN EN ISO Normen werden in Deutschland die europäischen EN Normen, firmeninterne Werksnormen und VDI/VDE-Richtlinien angewendet. [DGQ91], [Har09]

2.1 Grundprinzip der taktilen 2D Rauheits- und Konturenmessung

Um die Qualitätsmerkmale auf der Makro- und Mikroskala eines Werkstückes zu überprüfen, gibt es verschiedene Messprinzipien. Das sind neben dem klassischen taktilen Verfahren vor allem berührungslose Messverfahren, wie optische, pneumatische und computertomografische Messverfahren. Ein genereller Vergleich der aufgezählten Verfahren ist nicht sinnvoll, da diese sich häufig nicht konkurrieren, sondern sich über ihre Messaufgaben ergänzen. Die Messaufgabe und die Wirtschaftlichkeit bestimmen somit den Einsatz eines Verfahrens, da jedes Verfahren seine Vor- und Nachteile hat. Ohne Kenntnis der Oberfläche ist ein Vergleich von optischen und taktilen Messverfahren nicht möglich. Bei optischen Messverfahren wird zum Beispiel bei auftretenden steilen Flanken der Messstrahl ungünstig reflektiert und es treten Artefakte bei der Messung auf. Andererseits werden bei sensiblen und nichtkratzfesten Oberflächen optische Sensoren bevorzugt. Zudem messen optische Verfahren schneller und meist flächenhaft. Bei Werkstücken mit Hinterschneidungen kann auf die Röntgentomografie zurückgegriffen werden und bei inline Prozessen mit starken Verschmutzungen können Konturen mit Hilfe der pneumatischen Messtechnik geprüft werden. Nicht zu vergessen ist, dass die taktile Rauheitsmesstechnik in Rückführung und Kalibrierung ausführlich genormt ist und als Referenz angesehen wird. Weitere Beispiele und Einsatzmöglichkeiten finden sich in zu optischen Verfahren in Keferstein [Kef15], zu pneumatischen Verfahren in Schäfer [Sch15] und zu röntgentomografischen Verfahren in Christoph [Chr06]. [Brei00], [Die07], [Tut06], [Vol13]

Trotz der verschiedenen und sich ergänzenden Anwendungsmöglichkeiten werden vor allem taktile und optische Verfahren häufig verglichen. Am Beispiel des faseroptischen Sensors

zum taktilen Messverfahren wurde eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse in Ströer [Str14] gezeigt.

Um ein Verständnis für die Problematik der Rauheitsmessung auf Konturen zu erhalten, müssen zunächst die Grundlagen der taktilen Rauheits- und Konturenmesstechnik erläutert werden. In dem Kapitel 2.1 werden die Begriffe Rauheit und Kontur und die Grundprinzipien der Rauheits- und Konturenmessung beschrieben. Weiter erfolgt der Stand der Technik der normgerechten Auswertung, zum einen für die Rauheitsmesstechnik mit Oberflächenkenngrößen und zum anderen für die Konturenmesstechnik. Am Ende des Kapitels 2.1 werden die Unterschiede, das heißt sowohl beim Messvorgang als auch bei der Auswertung der Rauheits- und Konturenmesstechnik, klar gegenübergestellt. Diese werden im Kapitel 3 aufgegriffen, um die Problematik der Kombination aus beiden, heißt der Rauheitsmessung auf Konturen aufzuzeigen. Es folgen das Kapitel 2.2 mit dem Stand der Technik industrieller Messplätze und das Kapitel 2.3 mit Beispielen für Messaufgaben für die Rauheits- und Konturenmesstechnik. Abschließend werden in Kapitel 2.4 Messabweichungen und die Messunsicherheit erläutert.

2.1.1 Rauheitsmessung

Die geometrischen Eigenschaften des Oberflächenzustandes werden in eine Grobgestalt (Maß, Riss, Form und Lage) und in eine Feingestalt unterteilt. Die Feingestalt ist die Rauheit und Welligkeit der Oberfläche. Die Gestaltprüfung erfolgt über die Rauheitsprüfung. [Dut02] [VDI 2601]

In einem Fertigungsverfahren kann gezielt eine gewünschte Rauheit auf ein Bauteil erzeugt werden. Diese ist abhängig vom Fertigungsverfahren, den verwendeten Werkzeugen und den Schnittbedingungen. Rauheit entsteht durch die Abbildung der Werkzeugschneide auf der Oberfläche und ist die regelmäßige oder unregelmäßige wiederkehrende Gestaltabweichung dritter bis sechster Ordnung. [Bod92], [DIN 4760], [Hen84]

Die abgetastete Istoberfläche entspricht herstellungsbedingt auf Grund von Gestaltabweichungen nicht der idealen geometrischen Oberfläche. Bei keinem Fertigungsverfahren kann eine ideale Oberfläche ohne Abweichungen erzeugt werden. Das Ordnungssystem der Gestaltabweichungen ist in der Norm DIN 4760 [DIN 4760] zu finden. Dabei sind die Gestaltabweichungen in sechs Ordnungen unterteilt, diese gehen von Formabweichungen (Erste Ordnung), über die Welligkeit (Zweite Ordnung) zur Rauheit (dritte bis sechste Ordnung). [DIN 4760], [Dut02], [Tut06]

Die Funktion einer Oberfläche wird neben ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften auch über ihre geometrischen Eigenschaften bestimmt, das heißt die Oberfläche kann über Rauheitskenngrößen beschrieben werden. Die Eigenschaften bestimmen die Lebensdauer, die Sicherheit, die Funktion und die Belastung des Bauteils.

Weiter können der Verschleiß und Geräusche im Betrieb des Werkstückes verringert werden. [Bod92], [Hen84], [VDI 2601]

Tastschnittgerät

Bei der Rauheitsmessung wird traditionell die Oberfläche mit einem Tastschnittgerät gemessen [Tut06]. Dies ist in der Norm DIN EN ISO 3274 definiert [DIN 3274]. Das taktile Messsystem ist ein Standardmesssystem und wird für Referenzmessungen eingesetzt, da viele verlässliche Daten und damit Erfahrungswerte vorhanden sind.

Es stehen verschiedene Bauarten von Tastsystemen zur Verfügung. Diese sind das Bezugsflächentastsystem, das Pendeltastsystem und das Einkufentastsystem, dargestellt in Abbildung 1.

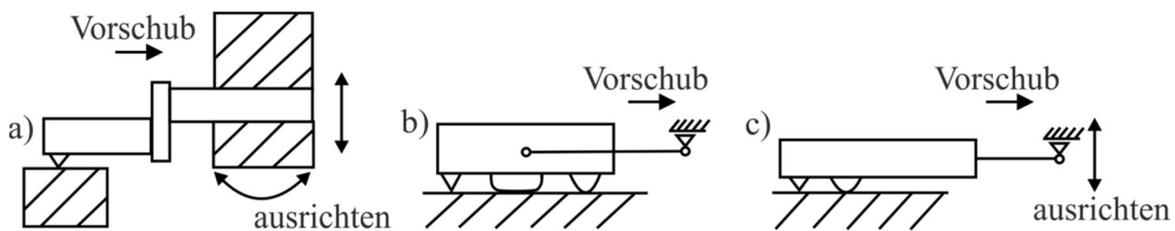


Abbildung 1: a) Bezugsflächentastsystem b) Pendeltastsystem c) Einkufentastsystem

Pendeltastsysteme werden mit zwei Gleitkufen über die Oberfläche geführt und richten sich selbstständig zu dieser aus. Das System ist einfach, kann aber aufgrund der Gleitkufen zu Profilverfälschungen führen und kleine Werkstücke können nicht geprüft werden. Einkufentastsysteme werden mit einer Gleitkufe über die Oberfläche geführt und es müssen Oberfläche und Vorschubeinheit parallel zu einander ausgerichtet werden. Es benötigt wenig Platz und kann auch an schwer zugänglichen Stellen wie Bohrungen angewendet werden. Allerdings kann es zu Profilverfälschungen kommen, bei denen Profilanteile ausgelöscht oder mit doppelter Höhe überragen werden können. [Bod92]

Das Bezugsflächentastsystem eignet sich für die Rauheits- und Konturenmessung am besten, da keine Profilverfälschungen, wie bei Pendeltastsystemen oder Einkufentastsystemen auftreten. Es wird in dieser Arbeit verwendet und daher wird im Weiteren nur auf das verwendete Bezugsflächentastsystem eingegangen. Detaillierte Erklärungen, Vor- und Nachteile der drei Tastsysteme und weitere Ausführungen des Bezugsflächentastsystems finden sich in Bodschinna [Bod92], Tutsch [Tut06], VDI 2602 [VDI 2602], VDI 2602-2 [VDI 2602-2] und Volk [Voll13].

Die Abbildung 2 zeigt den grundlegenden Aufbau eines Tastschnittgeräts (Bezugsflächentastsystem) nach VDI 2602-2 [VDI 2602-2]. Neben den grundlegenden Elementen, wie Tastspitze und Vorschubeinheit ist die Messsignalkette aufgeführt.

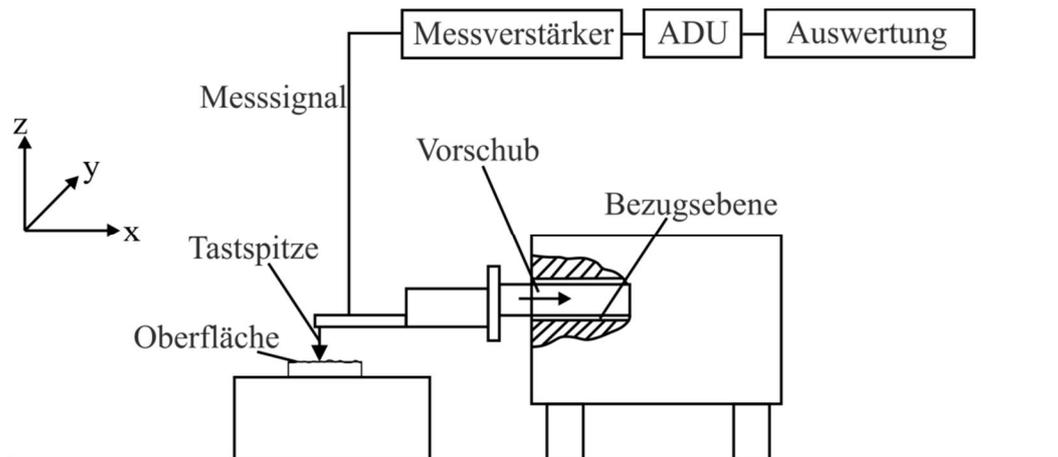


Abbildung 2: Aufbau eines Tastschnittgeräts nach VDI 2602-2 [VDI 2602-2]

Das Bezugsflächentastsystem ist ideal zum Messen von Oberflächen. Beim Messvorgang wird der Taster entlang einer annähernd idealen Bezugsfläche geführt und die Rauheit, Welligkeit und bei ausreichender Messtrecke auch Formabweichungen erfasst. Der Vorteil des Bezugsflächensystems ist der universelle und robuste Einsatz. Es ist aufgrund von Erfahrungswerten ein Referenzmesssystem und damit sehr zuverlässig. Die Nachteile des Bezugsflächentastsystems sind zum einen das Ausrichten zwischen der Bezugsfläche und der Oberfläche, welches viel Zeit in Anspruch nehmen kann und zum anderen die Schwingungsempfindlichkeit, die erhebliche Auswirkungen auf das Messergebnis haben. [Bod92], [Dut02], [VDI 2602-2]

Die Oberfläche wird mit der Tastnadel, die sich senkrecht zur Taststrecke befindet, geradlinig abgetastet. Dies geschieht mit einer annähernd konstanten Geschwindigkeit und Antastkraft. Die Tastnadel mit Diamantspitze hat eine Kegel- oder Pyramidenform mit einem Kegelwinkel von $\gamma = 60^\circ$ oder $\gamma = 90^\circ$ und einen Radius von $r = 2 \mu\text{m}$, $r = 5 \mu\text{m}$ oder $r = 10 \mu\text{m}$. Dabei gilt die Tastspitze mit einem Kegelwinkel von $\gamma = 60^\circ$ als ideal [Kef15].

Die Geometrie der Tastnadel bestimmt auch die mögliche Erfassung des Profils. Die Tastspitze kann nicht alle Strukturen wiedergeben. Haarrisse oder Hinterschneidungen werden nicht erfasst. Diese geometrische Grenze spiegelt sich im Messergebnis wieder. Die wirkliche Oberfläche wird durch den Taster gefiltert. Dieser Effekt nennt sich morphologische Filterung. [Dut02] [VDI 2602-2]

Da eine größere Tastspitze eine stärkere morphologische Filterwirkung hat und damit die Rauheitskennwerte beeinflusst, ist die Wahl des Tastspitzenradius r und des Profilpunktabstands P in Abhängigkeit der Grenzwellenlänge λ_c (Filter cut-off) und des Profilfilters λ_s in DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] festgelegt, siehe Tabelle 1. [Bod92], [DIN 3274], [VDI 2602-2]. Der Profilfilter λ_s ist dabei für eine definierte Bandbegrenzung

für die spätere Auswertung wichtig, da der Einfluss der Tastspitze abgeschwächt und dem Übertragungsverhalten der Messeinrichtung Rechnung getragen wird. Damit werden Messergebnisse vergleichbar. [See11]

Tabelle 1: Grenzwellenlänge λ_c , Profilfilter λ_s , Tastspitzenradius r und Profilpunktabstand P nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274]

λ_c / mm	$\lambda_s / \mu\text{m}$	λ_c / λ_s	$r / \mu\text{m}$ Höchstwert	$P / \mu\text{m}$ Höchstwert
0,08	2,5	30	2	0,5
0,25	2,5	100	2	0,5
0,8	2,5	300	2*	0,5
2,5	8	300	5	1,5
8	25	300	10	5

*Wenn der arithmetische Mittelwert der Profilordinaten $R_a > 0,5 \mu\text{m}$ oder die größte Höhe des Profils $R_z > 3 \mu\text{m}$ kann $r = 5 \mu\text{m}$ verwendet werden.

Weiter muss die Geometrie der Tastspitze und die Qualität der Tastnadel überprüft werden. Dies kann nach DIN EN ISO 5436-1 [DIN 5436-1] erfolgen. Mithilfe eines Normals wird der Zustand der Tastspitze kalibriert. Dies geschieht durch Abtastung einer scharfen Kante, wie zum Beispiel einer Rasierklinge.

Die Härte und die Gestalt der Oberfläche hat einen großen Einfluss bei der Wahl des Tastspitzenradius r , des Kegelwinkels γ , der Messkraft F_a und der Vorschubgeschwindigkeit v des Tasters. Trotz eines nach Norm, siehe Tabelle 1, gewählten Tastspitzenradius $r = 2 \mu\text{m}$, kann es auf Grund der Gestalt der Oberfläche und der hohen Druckbelastung der Tastspitze zur Beschädigung dieser kommen. Es muss daher ein sinnvoller Kompromiss aus den Einflussgrößen gefunden werden, um zum einen die Oberfläche richtig abzubilden, aber zum anderen sie und den Taster nicht zu beschädigen. [Hen84], [VDI 2602-2]

Allerdings gibt es andere Vorgaben für die Wahl der Tastspitze, wie in der VDA 2006 [VDA 06] genannt. Es wird nicht die Tabelle nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] angewendet, sondern für $R_z \leq 2 \mu\text{m}$ $r = 2 \mu\text{m}$ und für $R_z > 2 \mu\text{m}$ $r = 5 \mu\text{m}$ gewählt.

Zusammenfassend werden weitere Nachteile des Tastsystems ersichtlich. Zum einen die niedrige Tastgeschwindigkeit und zum anderen die geringe Antastkraft, die trotz alledem, aufgrund der kleinen Tastspitze von $r = 2 \mu\text{m}$ oder $r = 5 \mu\text{m}$, hohe Druckbelastungen auf die Oberfläche ausübt. Dadurch können, vor allem auf weichen Materialien, wie Kunststoff und Aluminium, elastische oder plastische Verformungen auftreten, die die Oberfläche beschädigen und zu Messfehlern führen zum anderen die morphologische Filterwirkung der

Tastspitze, die auf Grund ihrer Kantenverrundung von mehreren Mikrometern auf einer feinen Struktur eine Tiefpassfilterwirkung hat. [Tut06]

Vor der Messung

Vor Beginn einer Messung müssen die Grenzwellenlänge λ_c , die Länge der Messstrecke l_m und die Taststrecke l_t richtig festgelegt werden. Die Grenzwellenlänge λ_c ist für periodische und aperiodische Profile in DIN EN ISO 4288 [DIN 4288] und nur für lineare Profilfilter festgelegt. Dabei richtet sich die Grenzwellenlänge λ_c bei periodischen Profilen nach dem Rillenabstand des R-Profiles R_{Sm} . Dabei wäre der Rillenabstand des P-Profiles P_{Sm} die sinnvollere Wahl, da der Rillenabstand R_{Sm} nach Anwendung der Grenzwellenlänge λ_c erhalten wird. Bei aperiodischen Profilen richtet sich die Grenzwellenlänge λ_c nach der Vorgabe von entweder dem arithmetischen Mittelwert der Profilordinaten innerhalb der Einzelmessstrecke l_e , R_a oder der größten Höhe des Profils innerhalb der Einzelmessstrecke l_e , R_z . Die gewählte Grenzwellenlänge λ_c entspricht dann der Einzelmessstrecke l_e . Daraus ergibt sich die Messstrecke l_m zu dem Fünffachen der Grenzwellenlänge $l_m = 5 \cdot \lambda_c$. [Bod92], [DIN 4288]

Ist die Wahl der Messstrecke wegen der Werkstückgeometrie nicht möglich, kann eine Aufteilung in Teilmessstrecken erfolgen [Tut06]. Die Taststrecke ergibt sich zu dem sechs- oder siebenfachen der Grenzwellenlänge λ_c , wobei die Messgerätehersteller Mahr GmbH die sechsfache und Jenoptik AG die siebenfache Grenzwellenlänge verwenden. Damit ergeben sich unterschiedliche Taststrecken l_t . Dies begründet sich damit, dass für den Filter eine Vor- und Nachlaufstrecke l_n notwendig ist, bevor es linear arbeitet. Das Filter kann nach DIN EN ISO 16610-28 [DIN 16610-28] so modifiziert werden, dass keine Vor- und Nachlaufstrecke benötigt werden, jedoch arbeitet es dann nicht mehr linear. Dies gilt auch für das Splinefilter. Die Beziehung zwischen der Grenzwellenlänge λ_c , der Messstrecke l_m und Taststrecke l_t ist in Tabelle 2 nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] aufgezeigt.

Tabelle 2: Grenzwellenlänge λ_c , Messstrecke l_m und Taststrecke l_t nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274]

λ_c / mm	l_m / mm	l_t / mm
0,08	0,4	0,48/0,56
0,25	1,25	1,5/1,75
0,8	4,0	4,8/5,6
2,5	12,5	15,0/17,5
8,0	40,0	48,0/56,0

Oberflächenunvollkommenheiten, wie zum Beispiel Riefen, Kratzer, Risse oder Dellen sind in DIN EN ISO 8785 [DIN 8785] charakterisiert. Diese können die Messung stark

verfälschen oder die Tastspitze beschädigen. Allerdings muss ein Werkstück mit Oberflächenunvollkommenheiten nicht unbrauchbar sein, es hängt von der Anwendung und Funktion dieser ab [DIN 8785]. Es ist daher wichtig das zu messende Werkstück vor der Messung mit dem Auge zu begutachten.

Außerdem müssen vor der Messung Messbedingungen festgelegt werden. Die Messbedingungen und die genaue Angabe derer sind entscheidend. Messergebnisse ohne Angabe, schlechte oder falsche Bedingungen führen zu völlig unterschiedlichen und nicht vergleichbaren Ergebnissen, zum Beispiel bei der Wahl unterschiedlicher Grenzwellenlängen λ_c können die Ergebnisse der Mittenrauheit R_a bis zu + 100 % und - 50 % schwanken. [Hen71], [Hen84]

Weiter ist der Messkreis ein wichtiger Einflussfaktor bei der Messung. Die Komponenten des Tastschnittgerätes und die Darstellung des Messkreises sind in DIN EN ISO 3274 [DIN3274] aufgeführt und in Abbildung 3 dargestellt.

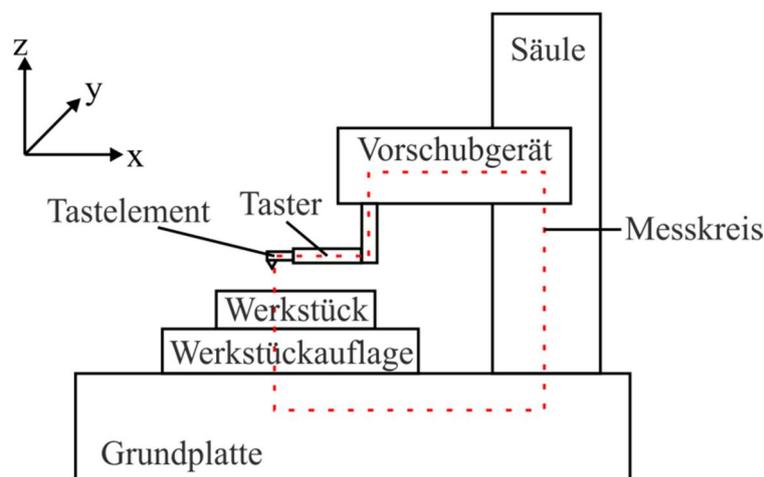


Abbildung 3: Komponenten und Messkreis eines Tastschnittgerätes nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274]

Der Messkreis sollte möglichst klein sein, da er äußeren und inneren Störungen ausgesetzt ist und damit das Referenzprofil beeinflusst wird. [Ber84], [Vol13]

Diese Störungen sind Quellen für Messabweichungen und Unsicherheiten. Eine Beschreibung nach DIN EN ISO 14253-2 [DIN 14253-2] findet sich in Kapitel 2.4.

Messung

Die bevorzugte Abtastrichtung ist rechtwinklig zur Bearbeitungsrichtung der Oberfläche zu wählen, da die Kenngrößen für diese Bearbeitungsrichtung definiert sind und damit bei den Senkrechtkenngößen, wie bei der größten Höhe des Profils R_z oder dem arithmetischer Mittelwert der Profildordinaten R_a , der größtmögliche Kennwert erhalten wird. Weisen die

Rillen auf der Oberfläche einen ungeordneten Verlauf auf, kann die Richtung beliebig gewählt werden. Ist eine bestimmte Messrichtung erwünscht, sollte dies auf der Zeichnungseintragung kenntlich gemacht werden. Die ermittelten Kennwerte sind nur dann als sinnvoll zu beurteilen, wenn der Messort repräsentativ für die gesamte zu prüfende Oberfläche des Werkstückes ist. Wichtig sind zudem die statistische Absicherung und eine verlässliche Aussage über die Messunsicherheit. [DIN 4288], [Dut02], [Kef15], [Kun84], [Tut06]

Die Rauheitsmessung wird mit einem aus Tabelle 1 nach DIN EN ISO 3274 [DIN3274] gewähltem Profilkpunktabstand P , einer statischen Messkraft $F_a = 0,75 \text{ mN}$ und einer gewählten Vorschubgeschwindigkeit v durchgeführt. Dabei ist die Vorschubgeschwindigkeit nicht normiert und hängt von der Messaufgabe ab. Allerdings sei zu beachten, dass bei einer Geschwindigkeit von etwa $v = 0,2 \text{ mm/s}$ nur geringe Grundstörungen auftreten [Vol13]. Daher ist von großen Geschwindigkeiten $v > 0,5 \text{ mm/s}$ abzusehen.

Nach der Messung

Das ertastete Profil ist gemäß DIN EN ISO 3274 definiert als „die Linie des Mittelpunktes einer Tastspitze, die die Oberfläche in der Schnittebene abtastet“ (DIN 3274). Nach der Digitalisierung des Signals wird von diesem Profil zunächst die Nennform beseitigt und im Anschluss wird der Profilter λ_s angewendet. Der Profilter λ_s macht durch eine einheitliche Begrenzung von hochfrequenten Anteilen des Messsignals Messergebnisse vergleichbar. Dabei wird zum Beispiel der Einfluss der Tastspitze abgeschwächt [See11]. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht der aktuellen Normen von den Messbedingungen bis hin zu den Kenngrößen.

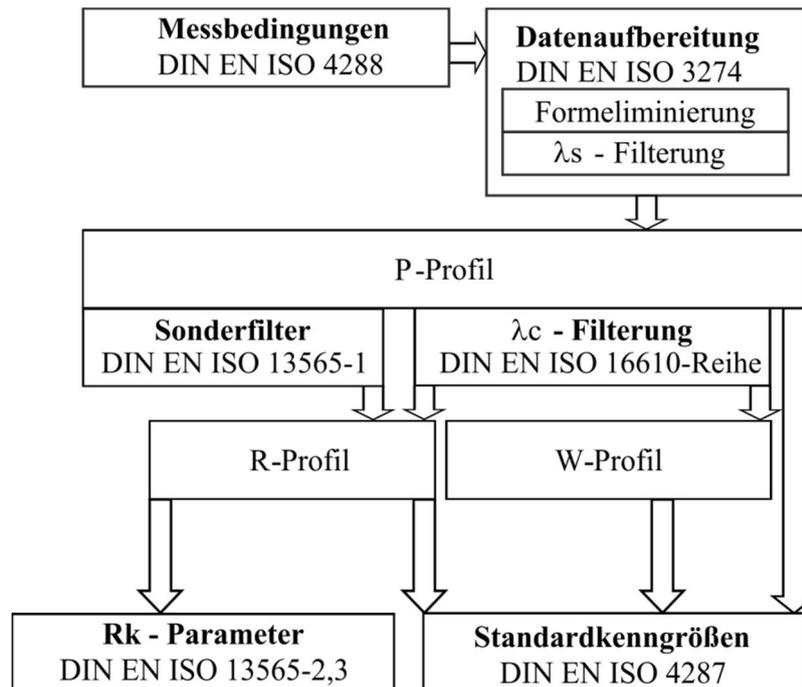


Abbildung 4: Normen von Messbedingungen bis zu den Kenngrößen

Nach der Filterung wird das Profil als Primärprofil (P-Profil) gespeichert. Ausgehend vom P-Profil können direkt Standardkenngrößen nach DIN EN ISO 4287 [DIN 4287] berechnet werden oder Profilverfahren angewendet werden, um die Gestaltabweichungen zu trennen. Die Trennung der Gestaltabweichungen erfolgt mit Filtern aus der DIN EN ISO 16610 Reihe, zum Beispiel mit dem Gaußfilter nach DIN EN ISO 16610-21 [DIN 16610-21] als default oder dem Splinefilter nach DIN EN ISO 16610-22 [DIN 16610-22]. Für plateauartige Oberflächen erfolgt die Trennung der Gestaltabweichungen mit dem Sonderfilter nach DIN EN ISO 13565-1 [DIN 13565-1]. Eine Übersicht mit Erörterungen an Beispielen und die Vor- und Nachteile der Filtertypen werden in DIN EN ISO 16610-1 [DIN 16610-1] erläutert. Die Filter trennen das kurzwellige Rauheitsprofil (R-Profil) vom langwelligen Welligkeitsprofil (W-Profil). Ausgehend vom R-Profil können Standardkenngrößen und charakteristische Funktionen nach DIN EN ISO 4287 [DIN 4287], DIN EN ISO 13565-2,3 [DIN 13565-2], [DIN 13565-3] und / oder selten auch Motifkenngrößen nach DIN EN ISO 12085 [DIN 12085] berechnet werden. Für die Welligkeit ist in der DIN EN ISO 4287 [DIN 4287] ein langwelliges Filter λ_f aufgezeigt, welches Welligkeit von langwelligen Formanteilen trennt. Allerdings werden keine Zahlenwerte für das Filter λ_f angegeben und daher wird dieses Filter nicht genutzt [Vol13]. Aus dem W-Profil können Standardkenngrößen nach DIN EN ISO 4287 [DIN 4287] berechnet werden. Wichtig für die Welligkeit ist zudem die Auswertung der dominanten Welligkeit nach VDA 2007 [VDA 07]. Dabei werden periodische Welligkeiten über einen großen Skalenbereich von 0,02 mm bis

zu mehreren Millimetern detektiert und bewertet [VDA 07]. Eine praxisorientierte Beschreibung findet sich in Seewig [See04].

2 D Oberflächenkenngößen

Die Definitionen der Oberflächenkenngößen finden sich in den Normen DIN EN ISO 4287 [DIN 4287] und DIN EN ISO 13565-2,3 [DIN 13565-2], [DIN 13565-3]. In der DIN EN ISO 4287 [DIN 4287] werden die Kenngößen innerhalb der Einzelmessstrecke l_e berechnet und meist über die Messstrecke l_m gemittelt.

In der DIN EN ISO 4287 [DIN 4287] sind die Oberflächenkenngößen in fünf Kategorien eingeteilt mit jeweils den zugehörigen Kennwerten für das P-Profil, das W-Profil und das R-Profil. Die DIN EN ISO 13565-2 [DIN 13565-2] enthält die R_k -Parameter und die DIN EN ISO 13565-3 [DIN 13565-3] Kenngößen aus der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve.

In der folgenden Aufzählung sind nach Dutschke [Dut02] und Volk [Vol13] nur die aktuell wichtigen Rauheitskenngößen aufgeführt.

DIN EN ISO 4287

Die Kenngößen sind innerhalb der Einzelmessstrecke l_e definiert, wenn nicht anders angegeben.

Senkrechtkenngößen: Spitzenhöhen und Taltiefen

- Größte Höhe des Profils R_z

Senkrechtkenngößen: Mittelwerte von Ordinaten

- Arithmetischer Mittelwert der Profilorordinaten R_a
- Quadratischer Mittelwert der Profilorordinaten R_q

Waagrechtkenngößen

- Mittlere Rillenbreite der Profilelemente R_{Sm}

Charakteristische Kurven

Die folgend aufgeführten Kurven und Kennwerte werden aufgrund der stabileren Ergebnisse über die Messstrecke und nicht über die Einzelmessstrecke l_e definiert.

- Materialanteil des Profils $R_{mr}(c)$

DIN EN ISO 13565-2

- Kernrautiefe R_k
- Reduzierte Spitzenhöhe R_{pk}
- Reduzierte Riefentiefe R_{vk}
- Materialanteile Mr_1 und Mr_2

Kritisch ist die Charakterisierung einer Oberfläche mit nur einer Kenngröße. Ein Beispiel ist in Abbildung 5 zu sehen. Das Profil ist an der Mittellinie gespiegelt. Die Funktionseigenschaften der beiden Profile sind sehr unterschiedlich, der Mittenrauwert R_a ist aber gleich. Es kann somit aus einer reinen Messung von R_a nicht auf die Oberflächenstruktur und damit auf das Fertigungsverfahren geschlossen werden. [Bod92]

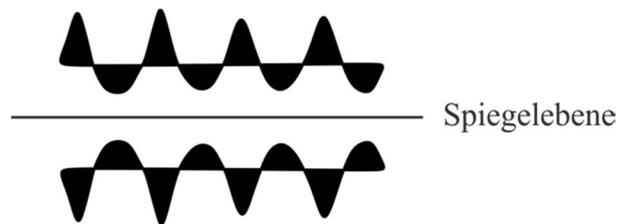


Abbildung 5: Profil einer Oberfläche und deren Spiegelbild nach [Bod92]

Mit den Normen DIN EN ISO 13565, Teil 1 und Teil 2 [DIN 13565-1], [DIN 13565-2] wurde die alte Norm DIN 4776 [DIN 4776] ersetzt. Die DIN 4776 [DIN 4776] ging aus Forschungsarbeiten von Bodschiwna an der Leibniz Universität Hannover zum Einfluss der Rauheit auf die Schmierfilmbildung in Wälzkontakten aus [Bod88].

Weitere Vor- und Nachteile der Oberflächenkenngrößen finden sich in Bodschiwna [Bod92] und Volk [Vol13].

Die 2D Rauheitsmessung wurde ausführlich beschrieben. Für die Oberflächenbeschaffenheit flächig gibt es analog die Normreihe DIN EN ISO 25178 [DIN25178]. Teil 1 beschreibt die Eintragung der Oberflächenbeschaffenheit [25178-1], Teil 2 definiert Begriffe und Kenngrößen [25178-2], in Teil 3 werden Spezifikationsoperatoren erläutert [25178-3], in Teil 6 findet eine Klassifizierung von Methoden statt [25178-6], in Teil 70 werden Maßverkörperung dargestellt [25178-70] und in Teil 701 wird die Kalibrierung und Normale für berührend messende Geräte vorgestellt [25178-701].

2.1.2 Konturenmessung

Eine Definition der Kontur findet sich momentan in keiner Norm oder VDI/VDE – Richtlinie.

Ein Vorschlag: *Eine Kontur ist die äußere Gestalt eines Werkstückes, die sich mit Hilfe von Geometrieelementen, wie zum Beispiel einer Geraden und einem Kreis beschreiben lässt.*

Nach der Einteilung nach VDI 2601 [VDI 2601] ordnet sich die Kontur bei der Grobgestalt (Maß, Riss, Form und Lage) ein. In der VDI 2629-1 [VDI 2629-1] finden sich die Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Konturenmessgeräte und ein Beispiel für ein Konturennormal. In der VDI 2629-2 [VDI 2629-2] ist die Ermittlung der Unsicherheit von spezifischen Konturenmessungen angegeben. Dabei wird bei der Auswertung auf die DIN EN ISO 1101 [DIN 1101] und DIN EN ISO 14660-1 [DIN 14660-1] verwiesen. In diesen Normen finden sich die Definitionen von Geometrieelementen und die Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Zur Beschreibung von Form- und Lage gibt es eine Reihe an Normen und Hilfen zur Anwendungen, zum Beispiel in Henzold [Hen02]. Für die Funktion bestimmter Bauteile ist es wesentlich, dass die Bauteile die vorgegebene Kontur mit einzuhaltenden Toleranzen erfüllen. Eine Nichterfüllung kann zu einer geringen Lebensdauer oder zum Versagen des Bauteils führen.

Tastschnittgerät

Wie bei der Rauheitsmessung, wird bei der Konturenmessung die Oberfläche traditionell mit einem Tastschnittgerät abgetastet. In Abbildung 6 ist ein Konturenmessplatz mit Bezugsflächentastsystem mit eingezeichnetem Messkreis dargestellt.

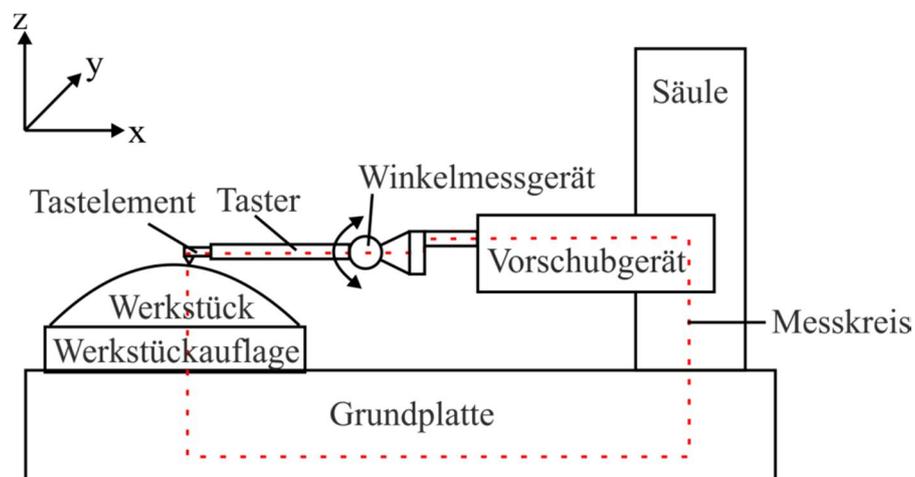


Abbildung 6: Konturenmessplatz mit Messkreis

Analog zur Rauheitsmessung sollte der Messkreis auf Grund von Störungen, wie zum Beispiel Schwingungen oder Vibrationen des Umfelds, möglichst klein sein. Eine detaillierte Beschreibung folgt in Kapitel 2.4.

Für die Konturenmessung werden folgende Tastelemente verwendet: Tastspitzen, Tastschneiden oder Tastkugeln. Die Tastspitzen und Tastschneiden haben in der Regel einen Radius von $r = 25 \mu\text{m}$, die Tastkugeln einen Radius, je nach Messaufgabe, von $r = 250 \mu\text{m}$ bis $r = 1500 \mu\text{m}$.

Messung und Auswertung

Das Tastelement wird mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit v über das zu messende Werkstück geführt. Bei der Messung wird die Auslenkung des Tastelements erfasst und aufgenommen. Weder die Antastkraft F_a , die Vorschubgeschwindigkeit v noch der Profilmittelpunkt-Abstand P sind für die Konturmessung genormt und variieren je nach Messaufgabe. Die Antastkraft F_a kann bei den meisten Konturmessgeräten auf bis zu $F_a = 20 \text{ mN}$ eingestellt werden. Die Vorschubgeschwindigkeit v hängt von der Messaufgabe ab, häufig wird mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1 \text{ mm/s}$ gemessen. Ein wichtiger Punkt ist die relative Tastergeschwindigkeit bei der Messung. Während bei der Rauheitsmessung, aufgrund der ebenen Werkstücke, keine Änderung der relativen Tastergeschwindigkeit erfolgt, ändert sich diese bei der Konturmessung. Beim Messen einer schiefen Ebene / Kugel ist die relative Tastergeschwindigkeit beim Anstieg geringer als beim Abfall. Häufig wird ein Profilmittelpunkt-Abstand von $P = 1 \mu\text{m}$ gewählt. Wie bei der Rauheitsmessung muss, aufgrund der Beschaffenheit der Oberfläche ein Kompromiss zwischen Vorschubgeschwindigkeit v , Antastkraft F_a , Profilmittelpunkt-Abstand P und Tastspitzenradius r gefunden werden, um die Oberflächen und den Taster nicht zu beschädigen, aber zudem wirtschaftlich zu bleiben. Denn gerade bei der Konturenmessung können Werkstücke groß sein und bei langsamer Vorschubgeschwindigkeit kann eine Messung viel Zeit in Anspruch nehmen. Für die Auswertung wird nicht das Mittelpunktpprofil, wie bei der Rauheitsmessung, sondern das Berührprofil verwendet. Der Radius des Tasters wird herausgerechnet. Die Auswertung erfolgt durch Einpassung von Geometrielemente, wie Kreis, Gerade, Kugel oder Ebene und es werden zum Beispiel folgende Größen ausgewertet: Winkel, Radius, Abstände, Kantengeometrien oder Durchmesser.

2.1.3 Zusammenfassung und Gegenüberstellung

Die Rauheits- und Konturenmessung kann kombiniert erfolgen. Beim Messvorgang gibt es viele Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Gemeinsamkeiten und Unterschiede zusammengetragen.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Rauheit- und Konturenmessung

	Rauheit	Kontur
Einordnung	Mikrogeometrie	Makrogeometrie
Messsystem (häufig)	Bezugsflächentastsystem	Bezugsflächentastsystem
Messrichtung zur Bearbeitungsrichtung	quer	unabhängig
Tastnadel zur Taststrecke beim Messvorgang	senkrecht zur Taststrecke, z-Abstand konstant, geradlinige Abtastung in x-Richtung	nicht immer senkrecht zur Taststrecke, kein konstanter z-Abstand, keine geradlinige Abtastung in x-Richtung
Vorschubgeschwindigkeit v empfohlen	Etwa $v = 0,2 \text{ mm/s}$	$v = 1 \text{ mm/s}$
Relative Tastergeschwindigkeit	Keine Änderung	Änderung
Antastkraft F_a	$F_a = 1 \text{ mN}$	F_a bis 20 mN
Profilpunktabstand P	$P = 0,5 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$	$P = 1 \mu\text{m} -$ nicht definiert
Tastspitzenradius r	$r = 2 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}, 10 \mu\text{m}$	$r = 25 \mu\text{m}$ bis $1500 \mu\text{m}$
Auswertung Profil	Mittelpunktprofil	Berührprofil

Wie in Tabelle 3 ersichtlich wird, müssen für die Messstrategie und die Auswertung neue Lösungsvorschläge erbracht werden, angefangen von der Wahl der Vorschubgeschwindigkeit v , der Antastkraft F_a , dem Profilpunktabstand P , dem Tastspitzenradius r , dem Messvorgang bis zur Auswertung. Detaillierte Lösungsvorschläge werden in Kapitel 3 vorgestellt.

2.2 Industrielle Messplätze

In der Industrie findet sich eine Vielzahl von Tastschnittgeräten. Neben den klassischen Rauheits- und Konturenmessplätzen werden kombinierte Rauheits- und Konturenmessplätze angeboten, die eine Rauheits- und Konturenmessung in nur einem Messvorgang möglich machen. Es folgen der Stand der Technik ausgewählter kombinierter Rauheits- und Konturenmessplätze und die Beschreibung des verwendeten Messgeräts nanoscan 855 der Jenoptik AG.

Kombinierte industrielle Rauheits- und Konturenmessplätze

Namenhafte Hersteller von Tastschnittgeräten bieten in ihrem Sortiment kombinierte Rauheits- und Konturenmessplätze. In Tabelle 4 ist eine Übersicht einer Auswahl von Messgeräten gegeben, die die Rauheit und Kontur in einem Messvorgang erfassen können.

Dabei sind Messgeräthersteller, Name des Messgerätes, die maximale Taststrecke, horizontale Auflösung, der vertikaler Messbereich und die minimale vertikale Auflösung angegeben. Es ist zu erkennen, dass die verschiedenen Messgeräte diesbezüglich gut vergleichbar sind.

Tabelle 4: Übersicht kombinierter Rauheits- und Konturenmessplätze [Jen09], [Mah12], [Zei12], [Tay12]

Hersteller Messgerät	Max. Taststrecke / horiz. Auflösung	Messbereich vert. Z+ / Z-	Min. vert. Auflösung
Jenoptik AG nanoscan 855	200 mm / 0,01 μm	24 mm / 48 mm	0,6 nm
Mahr GmbH MarSurf LD 260	260 mm / 0,05 μm	26 mm	0,8 nm
Carl Zeiss AG Surfcom 5000	200 mm	13 mm / 26 mm	0,31 nm
Taylor Hobson Form Talysurf PGI 1200	200 mm / 0,125 μm	12,5 mm	0,8 nm

Allerdings zeigte Hillmann [Hil89] in einem Ringvergleich mit Normalen, dass der Messgeräteunterschied, beim Vergleich von Rauheitskennwerten, bis zu $\pm 15\%$ beträgt. Wichtig ist daher eine richtige Kalibrierung von Messgeräten und Normalen nach dem Deutschen Kalibrierdienst (DKD) und Prüfung der Messgeräte. [DKD 4-2-1], [DKD 4-2-2], [DKD 4-2-3], [Hil89], [Hil91]

Weitere Normen und Richtlinien für die Kalibrierung und Messunsicherheit von Tastschnittgeräten finden sich in DIN EN ISO 12179 und VDI 2602-4. [DIN 12179], [VDI2602-4]

nanoscan 855

Das nanoscan 855 der Jenoptik AG ist ein Messgerät in der Form eines Bezugsflächentastsystems. Neben einer Hartgesteinplatte und einer aktiven Niveauregulierung mit Dämpfungsfunktion von Schwingungen, ist es mit einer Haube ausgestattet, um Umwelteinflüsse, wie Luftzüge, zu minimieren. In der Tabelle 5 sind ergänzend zu Tabelle 4 weitere wichtige Daten des nanoscan 855 aufgeführt.

Tabelle 5: Übersicht nanoscan 855 [Jen09]

Tastsystem	
Antastkraft	$\pm 1 \text{ mN bis } 50 \text{ mN}$
Antastrichtung	Z+ / Z-
Positioniergenauigkeit in Z	$\pm 25 \text{ }\mu\text{m}$
Tastarm	
Tastspitze	Diamant $5 \text{ }\mu\text{m} / 60^\circ$
Vorschub	
Messgeschwindigkeit	$0,1 - 3 \text{ mm/s}$
Geradheitsführung	$\leq 0,4 \text{ }\mu\text{m} / 200 \text{ mm}$
Messsäule	
Verfahrweg	550 mm
Positionierwiederholgenauigkeit	$\leq 10 \text{ }\mu\text{m}$

2.3 Beispiele für Messaufgaben

Für das taktile Messen von Rauheiten und Konturen gibt es eine Vielzahl an Messaufgaben aus verschiedenen Bereichen. Stand der Technik ist heute die Kontur und die Oberflächenkenngrößen gesondert zu messen. Teilweise geschieht dies auf verschiedenen Messgeräten. Das bedeutet einen höheren Aufwand, kostet Zeit und ist damit unwirtschaftlich. Die Lösung, um den Messaufwand erheblich zu reduzieren, ist beide Messaufgaben in einem Schritt auf einem Messgerät zu messen. Es folgen repräsentative Beispiele von Werkstücken aus unterschiedlichen Bereichen, die auf Kontur und Rauheit geprüft werden und die in Zukunft in einem Schritt geprüft werden könnten.

Automobilindustrie

Im Jahr 2014 wurden weltweit ungefähr 65,3 Millionen Personenkraftwagen hergestellt [OIC14]. Dabei ist der Verbrennungsmotor die meist verbaute Antriebstechnik. Eine Qualitätskontrolle erfolgt über das Messen von Kontur und Rauheit von essentiellen Motorbauteilen wie Kolben, Nocken- und Kurbelwelle, Zylinderkopf, Ventile und Einspritzsysteme. Bei einigen Bauteilen wird eine 100 % Prüfung durchgeführt. Daher ist der Zeitaufwand ein wichtiger Faktor.

Maschinenbau

Im Bereich Maschinenbau werden zum Beispiel Präzisionslager, Zahnstangen, Kugelköpfe und Steuerkolben von Hydrauliken auf Kontur und Rauheit geprüft. Fertigungsnah werden zum Beispiel Verzahnungswerkzeuge wie Fräser, Schabräder und Schneidräder geprüft.

Medizintechnik

Knieprothesen, Hüftgelenk- und Zahnimplantate, medizinische Schrauben und chirurgische Instrumente werden sowohl auf Kontur als auch auf Rauheit geprüft.

Optik

Asphärische Linsen, Blenden und Prismen werden auf Kontur und Rauheit geprüft.

Abbildung 7 stellt drei Beispiele dar, ein Düsenkörper aus dem Automobilbereich, ein Präzisionslager aus dem Maschinenbaubereich und eine Knieprothese aus der Medizintechnik.



Abbildung 7: Düsenkörper, Präzisionslager und Knieprothese [Mah15]

2.4 Messabweichungen und Messunsicherheit

Messergebnisse enthalten verschiedene Messabweichungen, wie systematische Messabweichung, zufällige Messabweichung, Messgerätedrift und Ausreißer [DIN 14253 - 2]. Die Messabweichung ist die Differenz aus Messwert und Referenzwert. Der Referenzwert kann dabei ein wahrer Wert, ein Messwert eines Normals oder ein vereinbarter Wert sein [VIM10]. Systematische Abweichungen des Messgerätes lassen sich durch eine Kalibrierung und zufällige Abweichungen durch statistische Verfahren beherrschen [Tut06]. Bei einem Messverfahren gibt es verschiedene Verursacher von Messabweichungen. Diese sind zum Beispiel die Umgebung, die Messeinrichtung, der Messaufbau und das Messverfahren, die Software und Berechnung, der Bediener und der Prüfgegenstand. Weitere finden sich in DIN EN ISO 14253-2 [DIN 14253-2]. Die Quellen der Messabweichungen sollten vermieden oder klein gehalten werden, damit eine geringe Messabweichung gewährleistet werden kann [Dut02]. Die genannten Abweichungen tragen zur Messunsicherheit bei und nur mit einer vorhandenen Messunsicherheit ist ein Messergebnis rückführbar. Aus diesem Grund muss eine Messunsicherheitsberechnung zur jeder Messung durchgeführt werden. Erst dann liegt ein vollständiges Messergebnis vor [Müh12]. Zudem muss der Einfluss der Messunsicherheitsanteile beachtet werden. Bei Normalen, wie dem Tiefeneinstell-, Geometrie- und Raunormal haben der Geräteanteil, die Wechselwirkung der Oberfläche mit der Messeinrichtung und die Rückführung einen

schwachen Einfluss, das heißt unter einem halben Prozent vom Messwert. Die Statistik der Oberfläche hat einen mittleren Einfluss bis zu zwei Prozent vom Messwert. Ganz anders verhalten sich technische Oberflächen. Während die Rückführung einen schwachen Einfluss hat, haben das Messgerät und die Wechselwirkung der Oberfläche mit der Messeinrichtung einen mittleren und die Statistik der Oberfläche einen sehr starken Einfluss bei ungefähr 10 Prozent vom Messwert. [VDI 2602-4]

Es folgt eine Aufzählung von Unsicherheitsverursachern nach DIN EN ISO 14253-2 [DIN 14253 - 2] bei der verwendeten Messeinrichtung und dem Messverfahren. Im Anschluss folgt eine tabellarische Übersicht der Verursacher und der getroffenen Gegenmaßnahmen für das verwendete Messgerät nanoscan 855 in Tabelle 6 und eine detaillierte Beschreibung der Verursacher.

Tabelle 6: Verursacher von Unsicherheiten und Gegenmaßnahmen

Verursacher	Gegenmaßnahme nanoscan 855
Umwelt	
Rauschen / Schwingungen	Hartgesteinplatte mit aktiver Niveauregulierung mit Dämpfungsfunktion
Temperatur / Feuchtigkeit	Klimatisierung des Labors
Verunreinigungen	Reinigung der Proben mit Isopropanol
Beleuchtung	Mischlicht, LED-Beleuchtung, geringer Einfluss vom Tageslicht
Luftströmung und Staub	Haube über der Messeinrichtung
Messeinrichtung, Messaufbau und Messverfahren	
Kalibrierung	Regelmäßige Kalibrierung nach Volk [Voll14], Beschreibung in Kapitel 3
Messkraftstabilität	Elektrische Tastkrafteinstellung
Führungen	Geradheitsführung $\leq 0,4 \mu\text{m} / 200 \text{mm}$ Positionierwiederholgenauigkeit $\leq 10 \mu\text{m}$
Taststab	Taststab Jenoptik WCN1T KE5 mit Gitterstruktur mit hohem Verformungswiderstand bei gleichzeitig geringem Eigengewicht und einem vertikalen Messbereich von $+ / - 12 \text{mm}$
Messverfahren	Detaillierte Beschreibung in Kapitel 3
Software und Berechnung	
Auswertestrategien	Vergleich von Auswertestrategien in Kapitel 3
Unterschiedliche Auswertealgorithmen	Dokumentierte und normgerechte Auswertung, Beschreibung in Kapitel 3
Bediener	
Inhomogene Tagesform	Arbeit mit höchster Sorgfalt und Achtsamkeit

Umgebung

Zu den wichtigen Einflüssen der Umgebung zählen: Rauschen, Schwingungen, Temperatur, Feuchtigkeit, Luftströmung, Staub, Verunreinigungen, Beleuchtung und elektromagnetische Störungen, wie zum Beispiel elektromagnetische Interferenz oder Einschwingvorgänge der Stromversorgung.

Das Rauschen kann zum Großteil von unerwünschten Schwingungen aus der Umgebung kommen und kann mit Messtischen mit Schwingungsdämpfung minimiert werden. Die Temperatur ist für die Oberflächenmessung eine unkritische Größe. Da die Rauheitsmessung

aufgrund der kurzen Messstrecken nur kurze Messzeiten in Anspruch nimmt und beispielweise Stahl eine Ausdehnung von etwa 0,001 % pro Grad Celsius hat, kommt es während der Messung zu keiner relevanten Temperaturänderung. Allerdings hat die Temperatur Einfluss auf die Formmessung, daher sollten Formmessungen in einem klimatisierten Messlabor durchgeführt werden. Weiter kann Zugluft ebenfalls die Form beeinflussen und sollte vermieden werden. Verunreinigungen von Werkstücken, wie Öl, Schmutz oder Staub führen beeinträchtigen vor allem die Tastspitze in ihrer Beweglichkeit. Bei der Beleuchtung erfolgt eine Unterscheidung in Tages-, Kunst- und Mischlicht. Zudem sollte bei einer Beleuchtung von einem wärmeabstrahlendem Leuchtmittel abgesehen werden und zum Beispiel eine LED-Beleuchtung gewählt werden, da die Temperatur Einfluss auf die Messeinrichtung und das Messobjekt hat. [DIN 14253-2], [VDI 2627-1], [Vol13]

Der Messraum, in dem das nanoscan 855 verwendet wurde, entspricht nach VDI 2627-1 [VDI 2627-1] der Güteklasse 3, einem Standardmessraum.

Messeinrichtung, Messaufbau und Messverfahren

Wichtige Faktoren der Messeinrichtung sind zum Beispiel die Unsicherheit und der Zeitraum der Kalibrierung, die Messkraftstabilität und Führungen. Beim Messaufbau sollten die Temperaturempfindlichkeit, die Steifigkeit, der Radius und die Formabweichungen des Tastelements bedacht werden. Weiter die Steifigkeit des Aufnehmersystems und die Wechselwirkung zwischen Werkstück und Tastspitze. [DIN 14253-2]

Diese Wechselwirkungen können durch auftretende Reib- und Tastkräfte zu ungewollten plastischen Veränderungen beim Werkstück und der Tastspitze führen. Der Kontakt kann über den Reibwert μR beschrieben werden. Er ist abhängig von Temperatur, Oberflächenrauheit, Normalkraft, Schmierstoff, Geschwindigkeit und Härte und ist daher schwer zu schätzen. [Püs08]

Püschmann [Püs08] hat die Verformung des Tastarms während der Konturenmessung untersucht und eine Neukonstruktion eines optimierten Tastarms mit großem Verformungswiderstand und geringem Eigengewicht vorgestellt. Weiter wurde zudem ein Kalibrierverfahren für den Tastarm vorgestellt. Des Weiteren folgte eine Untersuchung des tribologischen Einflusses beim Kontakt von Tastspitze und Werkstoffoberfläche. Zu beachten ist, dass durch die Steigung beim Messen von Konturen die relative Geschwindigkeit der Tastspitze variiert und es dadurch zu einer Änderung der Reibleistung kommt, was zu einer Änderung der Temperatur führt, die sich wiederum auf die Oberfläche, die Tastspitze und damit auf die Wechselwirkung zwischen den beiden auswirkt. Nicht zu vergessen sind die Abweichungen bei Wiedergabe der Oberfläche, da es durch die endliche Geometrie der Tastspitze zu einer morphologischen Filterwirkung kommt und somit die Oberfläche nie exakt zu 100 % abgebildet werden kann. [Püs08]

Bei den Einflüssen auf das Messverfahren sind vorbereitende Maßnahmen, Anzahl, Reihenfolge und Dauer der Messungen zu nennen. Außerdem haben die Ausrichtung des Tastsystems, Prinzip der Antastung, Messstrategie und Anzahl der Messpunkte Einfluss. [DIN 14253-2]

Maßgeblich ist zu betonen, dass gerade bei der Ausrichtung des Tastsystems, der Antastung und der Messstrategie neue Ansätze gewählt werden, die nicht normgerecht sind. Die Messstrategie, wie auch die durchgeführte Kalibrierung nach Volk [Vol14] werden in dem Kapitel 3 ausführlich erläutert.

Software und Berechnung

Verschiedene Software-Produkte zeigen Unterschiede bei der Auswertung. Sei es durch anders programmierte Auswertelgorithmen, die beispielweise Unterschiede beim Runden, bei der Filterung und bei der Interpolation ausgeben oder generell bei Unterschieden in der Auswertestrategie [DIN 14253-2]. Zum einen können unterschiedliche Auswertestrategien verglichen werden und zum anderen kann eine sehr gut dokumentierte und normgerechte Auswertung helfen Auswerteabweichungen zu erkennen.

Bediener

Neben der Umwelt hat der Mensch (Bediener) Einfluss auf die Messeinrichtung und die Messobjekte. Der Bediener ist kein zuverlässiger und stabiler Einflussfaktor. Einflüsse des Menschen sind neben seiner Tagesform und Arbeitsweise auch seine Körperwärme. Somit kommt es nicht nur auf die Ausbildung und Erfahrung. [DIN 14253-2], [VDI 2627-1] Es muss versucht werden die Versuche mit gleichbleibender Sorgfalt durchzuführen.

Am Ende kann eine Unsicherheitsbilanz nach dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM), deutschsprachige Version DIN V ENV 13005 [DIN 13005], nach dem „Procedure for Uncertainty Management“ (PUMA) in DIN ISO 14253-2 [DIN 14253 - 2] oder einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden. In Kapitel 6 wird eine, zu der durchgeführten Messaufgabe Rauheit auf Konturen bezogene Messunsicherheit bestimmt.

3 Vorbetrachtungen

Durch eine Verkürzung der Messzeit, kann die Wirtschaftlichkeit gesichert werden. Dies kann durch den Schritt Rauheit und Konturen in einem Messvorgang zu erfassen und in einem Schritt auszuwerten, erfüllt werden. Dabei muss ein sicherer Messvorgang gewährleistet, Messabweichungen und die Messunsicherheit bekannt sein. Zudem muss die Auswertemethode zuverlässige Kenngrößen liefern, das heißt Kenngrößen, die eine Aussagekraft über die Qualität und das Funktionsverhalten haben. Durch die Forderung an die Fertigung einer immer höheren Produktqualität, muss zum Beispiel bei sensiblen Produkte wie Hüftgelenken nicht nur eine schnelle Messung erfolgen, sondern ein valides und präzises Ergebnis garantiert werden. Dabei darf weder das Messobjekt, noch die Tastspitze beschädigt werden. Während die Rauheitsmessung und Auswertung genormt sind, gibt es für die Konturenmessung keine Normen. Für eine kombinierte Rauheitsmessung auf Konturen können die bestehenden Normen für die Rauheitsmessung nicht einfach kopiert werden, da sich die Mess- und Auswertebedingungen bei der kombinierten Messung ändern. Daher müssen neue Lösungsansätze gefunden werden. Die Lösungen für die kombinierte Rauheitsmessung auf Konturen kann ein Entwurf für eine neue Norm sein, sollte aber keine Widersprüche zu den bestehenden Normen aufweisen.

Um Rauheit auf Konturen sicher in einem Schritt messen und auswerten zu können, müssen die Messeinrichtung, der Messaufbau, das Messverfahren und die Auswertestrategie neu analysiert werden. Alle Einflussparameter müssen gefunden und untersucht werden. In diesem Kapitel werden die theoretischen Überlegungen zu der Rauheitsmessung auf Konturen dargelegt und im Kapitel 4 werden experimentelle Untersuchungen vorgestellt. Betrachtet wird zunächst eine schiefe Ebene. Die Erkenntnisse aus den Ergebnissen der Untersuchungen können im nächsten Schritt die Grundlage für die Untersuchungen an einer Kugel sein.

In Tabelle 7 ist ein Auszug aus Tabelle 3 aus Kapitel 2, in der die Unterschiede zwischen Rauheits- und Konturenmessung ersichtlich werden, dargestellt. Weiter ist eine zusätzliche Spalte mit der Rauheitsmessung auf Konturen hinzugefügt.

Tabelle 7: Auszug aus Tabelle 3: Gegenüberstellung der Rauheit- und Konturenmessung und Rauheitsmessung auf Konturen

	Rauheit	Kontur	Rauheit auf Konturen
Messrichtung zur Bearbeitungsrichtung	quer	unabhängig	quer
Tastnadel zur Taststrecke beim Messvorgang	senkrecht zur Taststrecke, geradlinige Abtastung in x-Richtung	nicht immer senkrecht zur Taststrecke, keine geradlinige Abtastung in x-Richtung	nicht immer senkrecht zur Taststrecke, keine geradlinige Abtastung in x-Richtung
Vorschubgeschwindigkeit empfohlen	Etwa 0,2 mm/s	1 mm/s	Noch unbekannt
Relative Tastergeschwindigkeit	Keine Änderung	Änderung	Änderung
Antastkraft	1 mN	bis 20 mN	Noch unbekannt
Profilpunktabstand	0,5 μm – 5 μm	1 μm – nicht definiert	Noch unbekannt
Tastspitze	2 μm , 5 μm , 10 μm	25 μm bis 1500 μm	Noch unbekannt
Auswertung Profil	Mittelpunktprofil	Berührprofil	Noch unbekannt

Es wird ersichtlich, dass sich bei bestimmten Punkten die Messung nur nach der Rauheits- oder der Konturenmessung richten kann. Die Messrichtung muss quer zur Bearbeitungsrichtung erfolgen, um Rauheitskenngrößen normgerecht auswerten zu können. Die Tastnadel wird zwangsläufig bei der Rauheitsmessung auf Konturen nicht mehr senkrecht zur Tastspitze laufen und es wird keine geradlinige Abtastung erfolgen. Somit braucht eine Autonullung, das heißt eine vom Messgerät selbstständige Ausrichtung, vor einer Messung, wie sie bei der Rauheitsmessung zu empfehlen ist, nicht mehr durchgeführt werden. Weiter wird sich ebenfalls die relative Tastergeschwindigkeit bei der Messung ändern. Auf der anderen Seite gibt es Punkte, die neu definiert werden müssen. Das sind Messparameter wie die Vorschubgeschwindigkeit v , die Antastkraft F_a , den Profilpunktabstand P und die Wahl der Tastspitze.

Weiter muss die Auswertung ebenfalls neu betrachtet werden. Bei der Rauheitsmessung wird das Mittelpunktprofil und bei der Konturenmessung das Berührprofil ausgewertet,

dabei ist es durchaus sinnvoll sowohl bei der Konturenmessung, als auch bei der Rauheitsmessung das Berührprofil zu verwenden. Hinsichtlich dessen wird bereits die neue ISO Norm, ISO/TC 213/WG 16 für die Rauheitsmesstechnik überarbeitet.

Weiter müssen neue Auswertemethoden untersucht werden. Bei der kombinierten Messung wird das Werkstück während der gesamten Messung nicht senkrecht zur Taststrecke abgetastet und das erhaltene Profil ist dadurch mit einer Form behaftet, die entfernt werden muss. Weiter werden keine äquidistanten Messpunkte aufgenommen, die für die Auswertung der Rauheitskennwerte zu äquidistanten Messpunkte überführt werden müssen.

3.1 Mittelpunktprofil und Berührprofil

Die Oberfläche wird mit einer Tastspitze mit Radius r abgetastet und nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] ein Mittelpunktprofil erzeugt. Das Mittelpunktprofil kann durch Erosion nach DIN EN ISO 16610-41 [DIN 16610-41] in das Berührprofil umgerechnet werden. Dies ist in Abbildung 8 dargestellt.

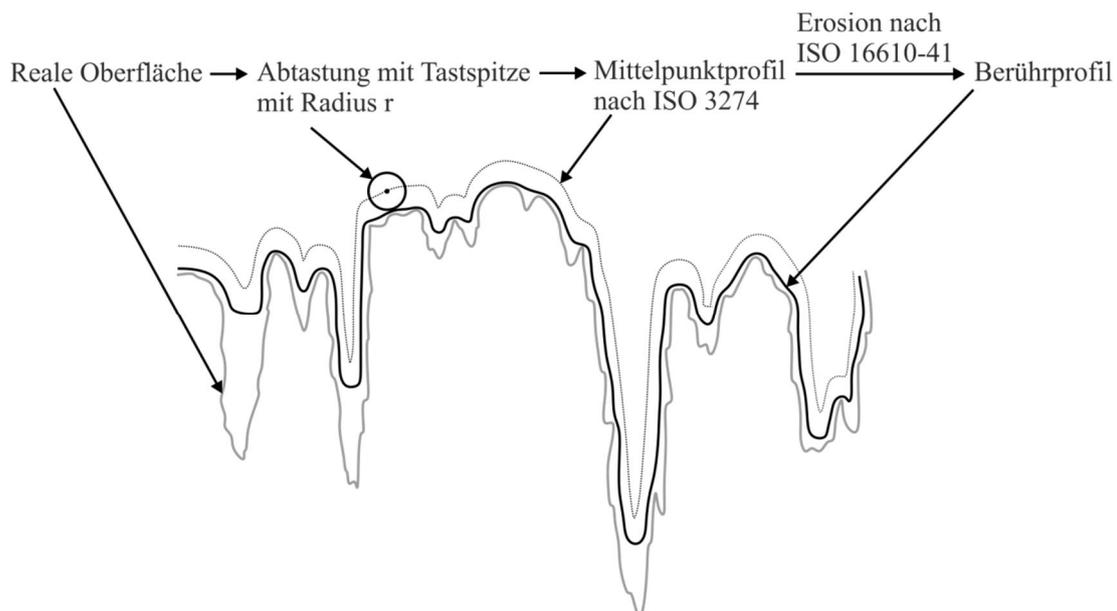


Abbildung 8: Reale Oberfläche – Mittelpunktprofil und Berührprofil

Dabei ist zu beachten, dass es beim Messen zu keiner gleitenden Abtastung kommt aufgrund der nicht idealen Tastnadel und der nicht ideal steifen Tastsystemmechanik. In der Realität verbiegt sich die Tastnadel, weicht aus, verhakt sich und springt. Für einen Vergleich von Mittelpunktprofil und Berührprofil erfolgen die Rauheitsmessung und Auswertung über das Mittelpunktprofil normgerecht, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben. Für einen Vergleich mit dem Berührprofil, wird das Mittelpunktprofil nach DIN EN ISO 16610-41 [DIN 16610-41] in das Berührprofil umgerechnet. Dabei wird das Mittelpunktprofil über die Erosion durch

eine Kreisscheibe mit dem Radius der Tastspitze $r = 5 \mu\text{m}$ umgerechnet. Im Anschluss werden die Rauheitskennwerte des Berührprofils ebenso ausgewertet wie beim Mittelpunktprofil.

Kedziora [Ked13] verwendet für einen Vergleich eine Tastspitze mit Radius $r = 2 \mu\text{m}$ und Proben mit verschiedenen Fertigungsverfahren und unterschiedlichen Rauheiten. Er zeigt, dass Spitzen beim Mittelpunktprofil breiter und Täler schmaler sind als beim Berührprofil und dass die Unterschiede der Rauheitsergebnisse von der Profilform abhängen.

3.2 Messeinrichtung

Die Kalibrierung erfolgt nach Volk [Vol14] für eine kombinierte Rauheitsmessung auf Kontur. Dabei wird mit dem ausgewählten Taster mit einem Rubin-Kugelnormals mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Rundheitsabweichung von $0,079 \mu\text{m}$ kalibriert. Auf dem Kalibrierschein wird die Messunsicherheit mit $U = 0,2 \mu\text{m} + 1 \cdot 10^{-6} \cdot d$, wobei d der Durchmesser des Rubin-Kugelnormals ist, angegeben. Die Kalibrierung minimiert die systematische Abweichung der Bogenbewegung des Tasters. Der Taster erfährt bei der Abtastung einer Kontur nicht nur eine Änderung in z -Richtung, sondern durch seine Bewegung auf einer Kreisbahn, auch eine Änderung von Δx in x -Richtung. Der Zusammenhang ist Abbildung 9 dargestellt. Durch die Kalibrierung wird die Abweichung der Bogenbewegung beim Messen erfasst und korrigiert.

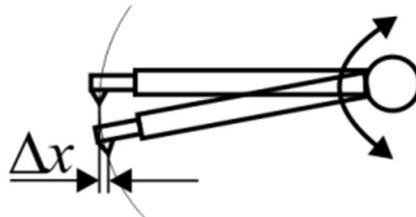


Abbildung 9: Bogenbewegung des Tasters

3.3 Einflussparameter

Zunächst werden Einflussparameter und Variationsmöglichkeiten aufgezeigt, die die Rauheitsmessung auf Konturen beeinflussen. Die Einflussparameter sind in Tabelle 8 dargestellt. Eine Beurteilung, ob sie einen starken oder schwachen Einfluss haben, kann erst nach einer experimentellen Untersuchungen festgestellt werden. Die fehlenden Größen, die mit einem Fragezeichen gekennzeichnet sind, werden in diesem Kapitel behandelt.

Tabelle 8: Einflussparameter bei der Rauheitsmessung auf Konturen

Einflussparameter	Variationsmöglichkeit
Proben	Normale, technische Oberflächen
Fertigungsverfahren	Drehen (periodisch), Schleifen (aperiodisch), Hochglanzpoliert
Rauheiten Rz	Rz = 0,05 μm bis Rz = 10 μm
Neigungswinkel zur Referenzebene α	0° bis 45°
Messrichtung	ansteigend / abfallend
Vorschubgeschwindigkeit v	?
Profilpunktastand P	?
Antastkraft Fa	?

Die eingesetzten Proben sind Normale und technische Oberflächen, die mit verschiedenen Fertigungsverfahren hergestellt wurden. Zudem wird eine Auswahl an verschiedenen Rauheiten getroffen.

Bei der Neigung der Werkstücke, kann zwischen drei Winkeln α , β und τ unterschieden werden, siehe Abbildung 10. Dabei ist der Winkel α der Winkel, der von der x- zu der z-Achse aufgespannt wird. Ein Werkstück mit $\alpha = 0^\circ$ liegt auf der x-Achse, der Referenzebene und ist nicht in Richtung z-Achse ausgelenkt. Analog ist der Winkel β , der Winkel zwischen x- und y-Achse und der Winkel τ , der Winkel zwischen y- und z-Achse. In dieser Arbeit seien die Winkel $\beta = 0^\circ$ und $\tau = 0^\circ$ gewählt.

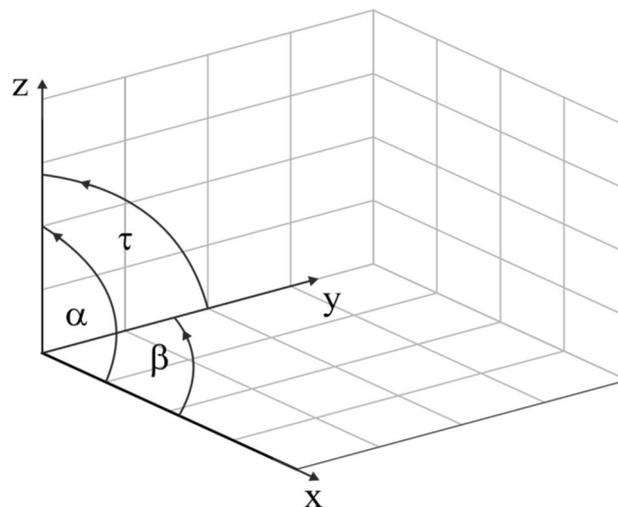


Abbildung 10: Darstellung der Neigungswinkel

3.4 Verwendete Proben

Normale

Die verwendeten Normale sind Halle Kalibriernormale nach DIN EN ISO 5436-1 [DIN 5436-1]. Zum einen geschliffene Raunormale Stufe 1 (R1) und Stufe 2 (R2) der Baureihe 4058/01 und zum anderen gedrehte superfeine Raunormale Stufe 1 (S1), Stufe 2 (S2) und Stufe 3 (S3) der Baureihe 4070/03. Als weiteres Normal wird ein am Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik entwickeltes Rk-Normal (Rk) verwendet, siehe Seewig [See15]. Das Rk-Normal besteht aus Kupfer, der mit einer Nickelphosphorschicht beschichtet wurde.

Technische Oberflächen

Die verwendeten Proben, mit angegebenem Material, Fertigungsverfahren und Rz-Wert sind tabellarisch in der Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Übersicht der verwendeten technischen Oberflächen

Probe	Material	Fertigungsverfahren	Rz/ μm
1	42CrMo4	Hochglanzpoliert (schleifen, läppen, polieren)	0,05
2	42CrMo4	Schleifen	3
3	42CrMo4	Schleifen	5
4	42CrMo4	Schleifen	8
5	42CrMo4	Schleifen	10
6	Aluminium	Drehen	1
7	Aluminium	Drehen	3
8	Aluminium	Drehen	6
9	Aluminium	Drehen	9

Proben 1 bis 5 sind plangeschliffene Proben aus 42CrMo4 und für die Proben 6 – 9 wurde eine längsgedrehte Welle mit den in Tabelle 9 aufgeführten Rauheiten verwendet. Für die Voruntersuchungen in Kapitel 4.2 werden die Normale und die technischen Oberflächen 1 bis 9 für die Hauptuntersuchungen in Kapitel 4.3 nur die technischen Oberflächen verwendet. Nach Kranz [Kra80] hängt die Unsicherheit einer Messung von der Tastspitzengeometrie, Oberflächengeometrie und der Messeinstellung, heißt der einzustellenden Vorschubgeschwindigkeit v , Antastkraft F_a und Profilkpunkt Abstandes P , ab. Weshalb der Tastvorgang ein Kompromiss aus Zeit, Genauigkeit und Beschädigung darstellt. Daher müssen sorgfältige Überlegungen zur Wahl der Tastspitze, den Messeinstellungen und dem Tastvorgang getroffen werden.

3.5 Wahl der Parameter

Wahl der Tastspitze

Nach Kranz [Kra80] sollte bei großen Steigungen die Tastspitze einen Kegelwinkel von $\gamma = 60^\circ$ haben. Deshalb wird für die Messungen eine Diamanttastspitze mit einem Radius von $r = 5 \mu\text{m}$ mit einem Kegelwinkel von $\gamma = 60^\circ$ gewählt. Der Radius von $r = 5 \mu\text{m}$ wird gewählt, um die Gefahr einer Zerstörung der Tastspitze zu minimieren, da eine kleinere Tastspitze, $r = 2 \mu\text{m}$, aufgrund der höheren Druckbelastung eher zu einer Beschädigung bei hohen Antastkräften oder Stößen neigt.

Bei den Proben mit geringen Rauheiten wird die stärkere morphologische Filterwirkung der größeren Tastspitze in Kauf genommen. Betroffene Proben sind die superfeinen Raunormale S1, S2 und S3 und die Proben 1 und 6. Allerdings gilt zu beachten, dass die superfeinen Raunormalen mit einer $5 \mu\text{m}$ Diamantschneide gefertigt sind und damit keine Abhängigkeiten der Tastspitze mit Spitzenradius von $r = 2 \mu\text{m}$ und $r = 5 \mu\text{m}$ aufweisen [Hal14]. Zudem ergeben sich Unterschiede in der Anwendung der DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] und der VDA 2006 [VDA 06]. Diese sind für alle verwendeten Proben in Tabelle 10 aufgeführt. Unterschiede sind grün hinterlegt.

Tabelle 10: Tastspitzenradius r nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] und VDA 2006 [VDA 06]

Probe	Rz / μm	r / μm DIN 3274 / VDA 2006	Probe	Rz / μm	r / μm DIN 3274 / VDA 2006
R1	1,43	2 / 2	1	0,05	2 / 2
R2	2,76	2 / 5	2	3	2 / 5
S1	0,140	2 / 2	3	5	5 / 5
S2	0,317	2 / 2	4	8	5 / 5
S3	0,457	2 / 2	5	10	5 / 5
Rk	2,91±0,28	5 / 5	6	1	2 / 2
			7	3	2 / 5
			8	6	2 / 5
			9	9	5 / 5

Bei den Normalen ist der Kennwert Rz aus den Abnahmeprotokollen [Hal10a] [Hal10b] [Hal11a] [Hal11b] [Hal11c] entnommen. Das Rk Normal wird über 12 unabhängige Messstrecken gemessen. Bei den Proben 1 bis 9 ist der angegebene Rz Parameter die Fertigungsvorgabe. In der Tabelle 10 ist zu sehen, dass die Proben R2, 2, 7 und 8 nach VDA

2006 [VDA 06] auch mit einem Tastspitzenradius $r = 5 \mu\text{m}$ gemessen werden können. Es werden, wie erwähnt, aufgrund der hohen Belastungen und der Zerstörungsgefahr alle Proben mit einem Tastspitzenradius von $r = 5 \mu\text{m}$ gemessen.

Die um den Winkel α geneigte und mit dem Tastspitzenradius r abgetastete Oberfläche muss nach Kranz [Kra80] über eine Mindestrauheit $Rz1_{\text{max}_{\text{min}}}$ abgetastet werden, siehe Abbildung 11.

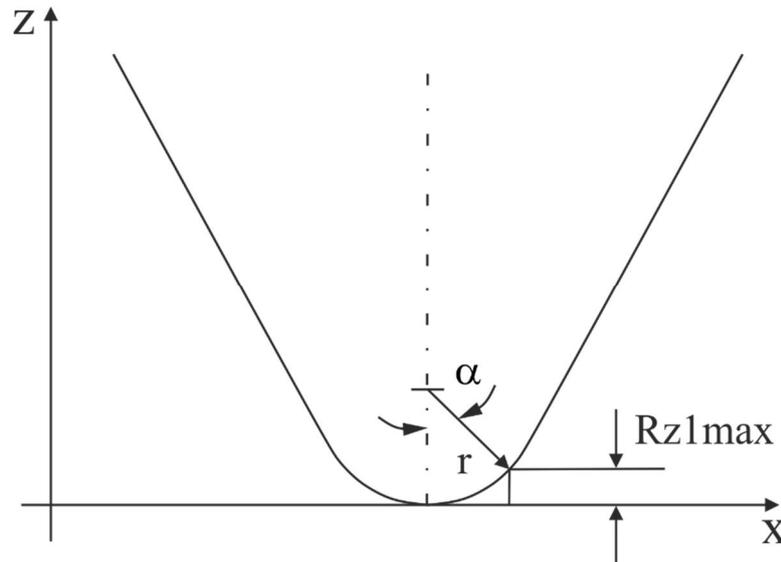


Abbildung 11: Abtastung einer Stufe mit der Höhe $Rz1_{\text{max}}$ nach Kranz [Kra80]

Der Zusammenhang zwischen dem Neigungswinkel α , der Mindestrautiefe $Rz1_{\text{max}_{\text{min}}}$ und dem Tastspitzenradius r kann über den Zusammenhang

$$Rz1_{\text{max}_{\text{min}}} \geq -(\cos \alpha \cdot r - r) \quad (1)$$

beschrieben werden. $Rz1_{\text{max}}$ ist nach DIN EN ISO 4288 [DIN 4288] die maximale Rautiefe (alte Bezeichnung R_{max} nach DIN 4768 [DIN 4768]). Weiter sollte bei großen Steigungen der Tastspitzenradius r den dreifachen R_{max} -Wert der Oberfläche nicht wesentlich überschreiten, es gilt: $r \approx \leq 3 \cdot Rz1_{\text{max}}$.

Die maximale Abweichung $\Delta Rz1_{\text{max}}$ berechnet sich über den Zusammenhang:

$$\Delta Rz1_{\text{max}} = r \cdot (1/\cos \alpha - 1). \quad (2)$$

Mit der gewählten Tastspitze von $r = 5 \mu\text{m}$ ergeben sich, wie in Tabelle 11 gezeigt, die Mindestrauheiten $Rz1_{\text{max}_{\text{min}}}$ und die maximale Abweichung $\Delta Rz1_{\text{max}}$ für ausgewählte Winkel α . In Tabelle 12 sind die $Rz1_{\text{max}}$ -Werte aller Proben bei $\alpha = 0^\circ$, kritische Winkel und die Kennzeichnung der Erfüllung (grün) oder Nichterfüllung (rot) der Bedingung $r \approx \leq 3 \cdot Rz1_{\text{max}}$ aufgeführt.

Tabelle 11: Ausgewählte Winkel α , erforderliche Mindestrauheiten $Rz1_{\max_{\min}}$ und maximale Abweichung $\Delta Rz1_{\max}$

Winkel $\alpha / ^\circ$	0	5	10	20	30	45
$Rz1_{\max_{\min}} / \mu\text{m}$	0	0,02	0,078	0,3	0,67	1,46
$\Delta Rz1_{\max} / \text{nm}$	0	20	80	320	780	2100

Tabelle 12: $Rz1_{\max}$ bei $\alpha = 0^\circ$, kritische Winkel, Erfüllung oder Nichterfüllung der Bedingung $r \approx \leq 3 \cdot Rz1_{\max}$

Probe	R1	R2	S1	S2	S3	Rk
$Rz1_{\max} / \mu\text{m}$	1,49	3,37	0,182	0,375	0,540	6,26
Kritisch ab Winkel / $^\circ$			20	30	30	
$r \approx \leq 3 \cdot Rz1_{\max}$						

Probe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Rz1_{\max} / \mu\text{m}$	0,06	1,78	3,6	4,06	5,9	0,8	1,7	2,8	3,2
Kritisch ab Winkel / $^\circ$	10					45			
$r \approx \leq 3 \cdot Rz1_{\max}$									

Die $Rz1_{\max}$ -Werte für die Normale R1, R2, S1, S2 und S3 sind den Abnahmeprotokollen entnommen, für die restlichen Proben werden Messungen durchgeführt.

In Tabelle 11 wird ersichtlich, dass ab einem Neigungswinkel von $\alpha > 20^\circ$ die Abweichungen $\Delta Rz1_{\max}$ sehr groß werden, was Einfluss auf die Messwerte hat. In Tabelle 12 ist zu sehen, dass wie auch schon bei der Wahl der Tastspitze bei folgenden Proben S1, S2, S3, 1 und 6 Probleme bei ausgewählten Neigungswinkeln α entstehen, die Auswirkungen auf die Messung und die Messwerte haben können.

Wahl der Vorschubgeschwindigkeit v , der Antastkraft F_a und des Profilkpunkt Abstandes P

Die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit v und der Antastkraft F_a erfolgt nach Kranz [Kra80]. Dabei ist die Antastkraft F_a die Kraft, die in vertikale Richtung auf die Probe drückt und vom Messgerät erzeugt wird. Unsanftes Aufsetzen und Stöße können die Tastspitze und die Oberfläche schädigen. Ebenfalls führen große Relativgeschwindigkeiten zwischen der Tastnadel und der Oberfläche zu Tastnadelschwingungen, die wiederum über Stöße Schäden an Tastnadel und Oberfläche verursachen können. Verformungen der Tastspitze und der Oberfläche führen zu Abweichungen. Es muss daher vermieden werden, zu schnell über die Oberfläche zu fahren. Meist treten Abheben der Tastspitze und Stöße ab einer

Vorschubgeschwindigkeit $v = 1$ bis 3 mm/s auf [Kra80]. Zudem sind die Grundstörungen bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten größer [Vol13]. Gewählt werden die drei Vorschubgeschwindigkeit: $v_1 = 0,1$ mm/s, $v_2 = 0,5$ mm/s und $v_3 = 1$ mm/s. Zu beachten ist, dass mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit v die Antastkraft F_a zunehmen sollte, da die Tastnadel sonst abheben kann und es infolge dessen zu ungewollten Stößen zwischen Tastnadel und Messobjekt kommt [Kra80].

Mit den gewählten Vorschubgeschwindigkeiten v können nach Ansatz von Kranz [Kra80] Mindestantastkräfte $F_{a_{\min}}$ ermittelt werden. Dafür muss zunächst der Radius des Scheitelkrümmungskreises einer Wurfparabel r_k mit:

$$r_k = \frac{v^2}{|a|} \quad (3)$$

berechnet werden. Dabei ist a die Beschleunigung, die ermittelt wird über die Formel

$$a = \frac{-F_{a_{\min}}}{mT} \quad (4)$$

Hier ist mT die reduzierte Masse des Systems Tastnadel-Halterung und wird mit $mT = 1$ g abgeschätzt.

Nur wenn der Scheitelkrümmungsradius kleiner als der halbe Tastspitzenradius r ist, wenn also gilt:

$$r_k < 0,5 \cdot r \quad (5)$$

bestimmt der Tastspitzenradius r die Bewegung der Tastspitze. Mit den eingesetzten Vorschubgeschwindigkeiten $v_1 = 0,1$ mm/s, $v_2 = 0,5$ mm/s und $v_3 = 1$ mm/s ergeben sich die in Tabelle 13 dargestellten Mindestantastkräfte $F_{a_{\min}}$.

Tabelle 13: Vorschubgeschwindigkeiten v und zugehörige Mindestantastkräfte $F_{a_{\min}}$

$v / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	0,1	0,5	1
$F_{a_{\min}} / \text{mN}$	$4 \cdot 10^{-3}$	0,1	0,4

Die in Tabelle 13 berechneten theoretischen Mindestantastkräfte $F_{a_{\min}}$ sollten größer gewählt werden. Zum einen, da bei der abfallenden Messrichtung bei immer größeren Neigungswinkeln α die relative Tastergeschwindigkeit zunimmt und daher die Antastkraft F_a größer werden sollte.

Zum anderen kann es durch die Kinetik des Tasters zum Abheben dieses führen, was zu vermeiden ist. Nach Kranz [Kra80] können für den Taster die Abhebezeit T mit

$$T = \frac{2 \cdot v}{|a|} \quad (6)$$

die Abhebehöhe H mit

$$H = \frac{v^2}{2 \cdot |a|} \quad (7)$$

und Abhebeweite W mit

$$W = \frac{2 \cdot v^2}{|a|} \quad (8)$$

berechnet werden. Dafür werden die folgenden Antastkräfte gewählt: $F_{a1} = 1 \text{ mN}$, $F_{a2} = 3 \text{ mN}$ und $F_{a3} = 5 \text{ mN}$. Die Wahl der hohen Tastkräfte soll Aufschluss geben, ob diese gegen das Abheben wirken können. In Tabelle 14 sind die Abhebezeiten T , die Abhebehöhen H und die Abhebeweiten W für die ausgewählten Vorschubgeschwindigkeiten v und Antastkräfte F_a dargestellt.

Tabelle 14: Abhebezeiten T , Abhebehöhen H und Abhebeweiten W für ausgewählte Vorschubgeschwindigkeiten v und Antastkräfte F_a

	$v_1 = 0,1 \text{ mm/s}$	$v_2 = 0,5 \text{ mm/s}$	$v_3 = 1 \text{ mm/s}$
Fa1 = 1 mN			
T/ms	0,2	1	2
H/ μm	$5 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,5
W/ μm	0,02	0,5	2
Fa2 = 3 mN			
T/ms	0,07	0,3	0,7
H/ μm	$2 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,2
W/ μm	$7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0,7
Fa3 = 5 mN			
T/ms	0,04	0,2	0,4
H/ μm	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	0,1
W/ μm	$4 \cdot 10^{-3}$	0,1	0,4

Anhand der ausgewählten Vorschubgeschwindigkeiten v und Antastkräfte F_a geht keine Gefahr von zu großer Abhebung und dadurch verursachten Stößen bei v_1 , v_2 und v_3 aus. Starke Stöße, die vor allem durch unsanftes Aufsetzen der Tastspitze erfolgen können, sind eine Gefahr für die Oberfläche und Tastspitze. Für die ausgewählten Proben besteht aufgrund der berechneten Abhebezeiten, -höhen- und -weiten keine Gefahr von schweren Schäden am Material noch an der Tastspitze. Bei v_3 sind Abhebezeiten T , Abhebehöhen H und Abhebeweiten W zwar größer als bei v_1 und v_2 , trotzdem sollte dies nicht zu einer Beschädigung führen. Eine Riefenbildung bei allen Proben wird aber sichtbar sein. Allerdings muss beachtet werden, dass sich durch die Messungen an der schiefen Ebene die

relative Tastergeschwindigkeit ändert. Dadurch wird sie beim Anstieg langsamer und beim Abfall schneller. Eine schnellere Geschwindigkeit erhöht die Möglichkeit des Abhebens, da die kinetische Energie der Tastnadel zunimmt. Das bedeutet, dass die Abhebezeiten, -höhen- und -weiten für eine abfallende Messrichtung größer sind, als für ansteigende.

Durch das Abtasten der Oberflächen mit den ausgewählten Antastkräften F_a treten Verformungen auf. Diese sind häufig gleichzeitig sowohl elastische als auch plastische Verformungen. Einfluss darauf haben die Härte H_t , das Elastizitätsmodul E und die Berührgeometrie B des Tasters und der Oberfläche. Die auftretenden Verformungen tragen neben der morphologischen Filterwirkung einen Anteil zur Messabweichung bei. [Kra80]

Nach Kranz [Kra80] sind für eine plane Oberfläche die auftretenden Verformungen in Abbildung 12 dargestellt. Betrachtet wird der Fall zwischen einer elastischen Kugel, heißt der Tastspitze und einem elastischen Halbraum, der Oberfläche.

Im rein elastischen Zustand, bei ruhendem Taster, kommt es zu einer Verformungstiefe h_e , siehe Abbildung 12 a). Im rein plastischen Zustand kommt es, bei ruhendem Taster, zu einer Eindrucktiefe h_p und einer Verformungstiefe h_p^* , analog entstehen für einen bewegten Taster die Eindrucktiefe h_{pv} und Verformungstiefe h_{pv}^* , siehe Abbildung 12 b).

In Abbildung 12 c) ist der elastoplastische Fall dargestellt. Bei ruhendem Taster wird im belasteten Fall eine Verformungstiefe h_{ep} erzeugt, die nach der Entlastung aus einem Anteil der elastischen Rückfederung h_e und einem plastischen Anteil h_p^* besteht. Analog entsteht für einen bewegten Taster die Verformungstiefe h_{epv} , die aus den zwei Anteilen, elastische Rückfederung h_e und plastischer Anteil h_{pv}^* besteht.

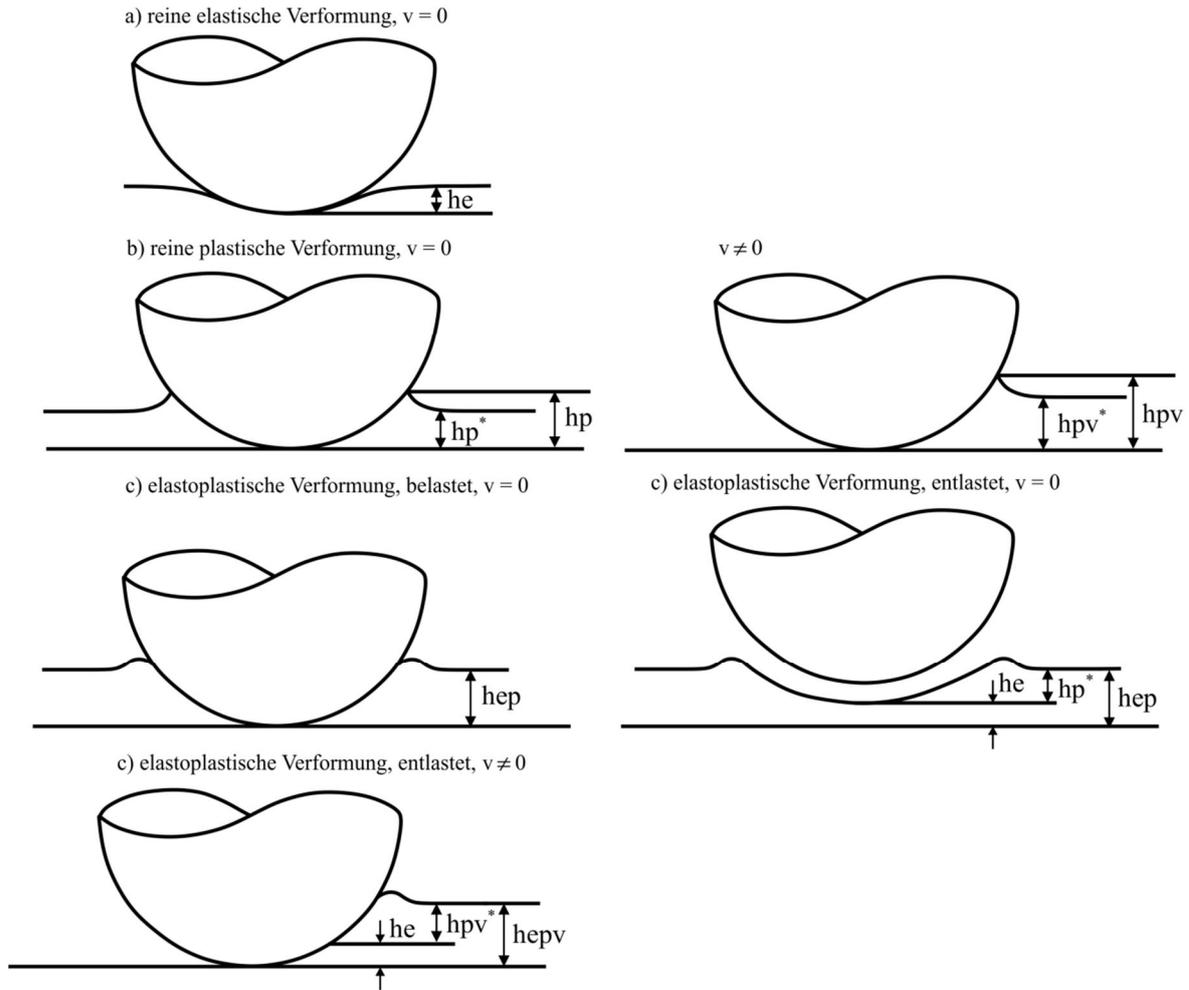


Abbildung 12: Darstellung der Verformungen für verschiedene Zustände

Interessant sind vor allem die Zustände mit bewegtem Taster. Daher werden die folgenden Berechnungen nur für diesen Zustand durchgeführt. Mit den gewählten Vorschubgeschwindigkeiten v und den Antastkräften F_a können nach Kranz [Kra80] mit Hilfe der Poissonzahl μ_p der Oberfläche, dem effektiven Elastizitätsmodul E für die elastische Verformung nach Hertz, dem effektiven Radius r_m und der Vickershärte H_v für die in Abbildung 12 gezeigten Zustände die Verformungstiefe h_e und Eindringtiefe h_p wie folgt berechnet werden:

die Verformungstiefe h_e mit

$$h_e = \left(2,25 \cdot (1 - \mu_p^2) \cdot \frac{F_a^2}{E^2 \cdot r_m} \right)^{1/3} \quad (9)$$

und die Tiefe des plastischen Eindruckes h_p von Wallspitze bis zur Sohle mit:

$$h_p = \frac{-F_a}{2 \cdot H_v \cdot r \cdot \pi} \quad (10)$$

Die Berechnung des effektiven Elastizitätsmoduls E erfolgt über die einzelnen Elastizitätsmodule der aufeinandertreffenden Materialien, mit E_1 dem Elastizitätsmodul des Diamanten und E_2 dem Elastizitätsmodul der Oberfläche.

$$E = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \quad (11)$$

Die Berechnung des effektiven Radius r_m erfolgt über die einzelnen Radien der aufeinandertreffenden Materialien, mit r_{m1} dem Spitzenradius der Tastspitze ($r_{m1} = r = 5 \mu\text{m}$) und r_{m2} dem Krümmungsradius der Oberfläche:

$$r_m = \frac{r_{m1} \cdot r_{m2}}{r_{m1} + r_{m2}} \quad (12)$$

Wenn die Tastspitze gegen eine Mulde drückt, ist $r_{m2} = -r$ und die Verformungstiefe $h_e = 0$. Wenn die Tastspitze gegen eine Bergkuppe drückt, ist $r_{m2} = r$ und damit ist h_e am größten und um den Faktor 1,26 ($2^{1/3}$) größer, als wenn die Tastspitze gegen eine plane Oberfläche drückt. Berechnet wird die Verformungstiefe h_e für den größtmöglich auftretenden Fall, das heißt für $r_{m2} = r$.

Die Eindringtiefe h_{pv} kann für eine bewegte Tastspitze mit

$$h_{pv} = 2 \cdot h_p \quad (13)$$

berechnet werden.

Nach den Untersuchungen von Kranz [Kra80] beträgt die Eindringtiefe h_{pv}^* etwa 60 % von der Eindringtiefe h_{pv} . In Tabelle 15 sind die eingesetzten Materialien gehärteter Stahl (GS), 42CrMo4, Stahl mit Nickelbeschichtung (SN), Kupfer mit Nickelphosphorbeschichtung (KN), Aluminium und Diamant mit ihrer jeweilige Vickershärte H_v , dem Elastizitätsmodul E und der Poissonzahl μ_p . Bei Diamant wird nur der Elastizitätsmodul angegeben, da nur er für die Berechnung benötigt wird. In Tabelle 16 sind die zugehörige Verformungstiefe h_e und Eindringtiefen h_p , h_{pv} und h_{pv}^* für die eingesetzten Antastkräfte F_{a1} , F_{a2} und F_{a3} eingetragen.

Tabelle 15: Materialien, Vickershärte Hv, Elastizitätsmodul E und Poissonzahl μ_p

Material (Probe)	Vickershärte/HV	E-modul/ $\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$	$\mu_p/-$
GS (R1,R2)	715	210	0,27-0,3
42CrMo4 (1-5)	450 - 650	210	0,27-0,3
SN (S1-S3) KN (Rk)	Nickel 530 - 900	205	0,31
Aluminium (6-9)	160 - 350	70	0,34
Diamant		1050	0,1

Tabelle 16: Materialien, Verformungstiefe h_e und Eindrücktiefen h_p , h_{pv} und h_{pv}^* für die Antastkräfte $F_{a1}/F_{a2}/F_{a3}$

Material (Probe)	h_e/nm	h_p/nm	h_{pv}/nm	h_{pv}^*/nm
	$F_{a1}/F_{a2}/F_{a3}$	$F_{a1}/F_{a2}/F_{a3}$	$F_{a1}/F_{a2}/F_{a3}$	$F_{a1}/F_{a2}/F_{a3}$
GS (R1,R2)	19/40/55	4,5/14/23	9/28/46	5,4/17/28
42CrMo4 (1-5)	19/40/55	6/18/30	12/36/60	7/22/36
SN (S1-S3) KN (Rk)	19/40/55	4,5/14/23	9/28/46	5,4/17/28
Aluminium (6-9)	36/75/105	13/38/64	26/76/128	16/46/77

In Tabelle 16 wird ersichtlich, dass mit größerer Antastkraft F_a die Verformungstiefe h_e und Eindrücktiefen h_p , h_{pv} und h_{pv}^* größer werden. Eine Riefenbildung wird bei allen Proben, auch bei einer kleinen Antastkraft $F_a = 1 \text{ mN}$ sichtbar sein. Bei der Antastkraft $F_{a3} = 5 \text{ mN}$ ist eine stärkere Riefentiefe beim Messvorgang und eine damit größere Messabweichung anhand der Ergebnisse anzunehmen. Allerdings besteht keine Gefahr der Zerstörung der Tastspitze oder der Oberfläche.

Jedoch muss beachtet werden, dass durch die schiefe Ebene, die Antastkraft F_a nicht mehr nur eine vertikale Komponente enthält. Zum einen ändern die Geometrie und zum anderen die Bewegung der Tastnadel die Kräfte. Dies hat ebenfalls Einfluss auf die Messabweichungen. Im Berührungspunkt B zwischen Tastnadel und Oberfläche wirken drei Kräfte in x, y, und z-Richtung, F_x , F_y und F_z . In dieser Arbeit wird die Kraftkomponente F_y vernachlässigt, da diese vor allem wirkt, wenn die Oberfläche nicht quer zur Bearbeitungsrichtung abgetastet wird.

Die Kräfte F_x und F_z setzen sich nach Kranz [Kra80] wie folgt zusammen:

F_z ist die Vertikalkomponente mit der die Nadel vertikal auf die Probe drückt und enthält die Federkraft, die Dämpfungskraft und die Trägheitskraft der Tastspitze. F_z entspricht der Antastkraft F_a .

F_x ist die Zugkraft in x-Richtung, die auftritt, wenn die Nadel bewegt wird. Es gilt:

$$F_x = -F_a \cdot \tan(\alpha + \rho), \quad (14)$$

wobei $\rho = \arctan(\mu_G)$ den Reibungswinkel darstellt.

Die Zugkraft setzt sich weiter aus den folgenden Kräften zusammen:

- 1) Der Tastkraft bei reiner Haftreibung auf glatten Oberflächen $F_{x\text{haft}}$

$$F_{x\text{haft}} = -\mu_H \cdot F_a, \quad (15)$$

wobei μ_H der Koeffizient der Haftreibung ist. Da diese Kraft nur zum Überwinden der Haftreibung, das heißt zum in Bewegung setzen der Tastnadel, notwendig ist, wird sie nachfolgend vernachlässigt.

- 2) Der Tastkraft bei reiner Gleitreibung auf glatten Oberflächen $F_{x\text{gleit}}$

$$F_{x\text{gleit}} = -\mu_G \cdot F_a \quad (16)$$

wobei μ_G der Koeffizient der Gleitreibung ist. Diese Kraft ist notwendig, um die Tastnadel in Bewegung zu halten.

- 3) Dem Anteil für die Verrichtung der plastischen Verformungsarbeit, dem Furchungsanteil $F_{x\text{furch}}$ bei reiner Gleitreibung für glatte Oberflächen.

$$F_{x\text{furch}} \approx 0,34 \cdot \frac{|F_a|^{1,5}}{r \cdot H_v^{0,5}} \quad (17)$$

- 4) Dem Geometrieanteil $F_{x\text{geo}}$

$$F_{x\text{geo}} = -\tan \alpha \cdot F_a, \quad (18)$$

der für raue Oberflächen berücksichtigt werden muss und der bei der schiefen Ebene die Gleitreibung deutlich überwiegt.

Für die Werkstoffpaarung Stahl und Diamant für die Proben R1, R2, S1, S2, S3, Rk, 1 bis 5 (Gruppe St) ist der Gleitreibungskoeffizient, wie für Stahl auf Stahl, $\mu_G = 0,1$. Für die Werkstoffpaarung Aluminium und Diamanttastspitze für die Proben 6 bis 9 (Gruppe Al) wird in Näherung die Paarung Stahl auf Aluminium verwendet. Der Gleitreibungskoeffizient für Stahl auf Aluminium ist $\mu_G = 0,5$ [Wit13]. In Tabelle 17 sind die auftretenden Komponenten der Kräfte in x-Richtung aufgeführt. Da die Zugkraft F_x einen starken Einfluss bei großen Neigungswinkeln α hat, werden die Kräfte nur für Winkel $\alpha \geq 30^\circ$ aufgeführt.

Tabelle 17: Auftretende Kräfte in x-Richtung

Kräfte in x-Richtung / Antastkraft	Fa1	Fa2	Fa3
F _{xgleit} / mN	St / Al 0,55 / 0,5	St / Al 1,7 / 1,5	St / Al 2,8 / 2,5
F _{xfurch} / mN	0,03 / 0,04	0,13 / 0,22	0,29 / 0,48
F _{xgeo} / mN			
$\alpha = 0^\circ$	0	0	0
$\alpha = \pm 5^\circ$	$\pm 0,09$	$\pm 0,26$	$\pm 0,44$
$\alpha = \pm 10^\circ$	$\pm 0,18$	$\pm 0,53$	$\pm 0,88$
$\alpha = \pm 20^\circ$	$\pm 0,36$	$\pm 1,10$	$\pm 1,80$
$\alpha = \pm 30^\circ$	$\pm 0,58$	$\pm 1,70$	$\pm 2,90$
$\alpha = \pm 45^\circ$	$\pm 1,00$	$\pm 3,00$	$\pm 5,00$
F _x / mN	St / Al	St / Al	St / Al
$\alpha = +30^\circ$	0,72 / 1,50	2,20 / 4,50	3,60 / 7,60
$\alpha = -30^\circ$	-0,45 / -0,06	-1,40 / -0,18	-2,30 / -0,30
$\alpha = +45^\circ$	1,20 / 3,00	3,70 / 9,00	6,10 / 15,00
$\alpha = -45^\circ$	-0,82 / -0,33	-2,5 / -1,00	-4,10 / -1,70

Die Kräfte in z-Richtung werden, wie die Kräfte in x-Richtung, zur Riefenbildung beitragen, allerdings besteht bei den auftretenden Kräften eine geringe Gefahr der Zerstörung der Tastspitze oder einer schweren Beschädigung der Oberflächen.

Für die gewählten Vorschubgeschwindigkeiten von $v_1 = 0,1$ mm/s, $v_2 = 0,5$ mm/s und $v_3 = 1$ mm/s werden sinnvolle Profilpunktabstände P von $P_1 = 0,1$ μ m, $P_2 = 0,5$ μ m und $P_3 = 1$ μ m gewählt. In Tabelle 18 sind die fehlenden Werte aus Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 18: Einflussparameter bei der Rauheitsmessung auf Konturen, vollständig

Einflussparameter	Variationsmöglichkeit
Proben	Normale, technische Oberflächen
Fertigungsverfahren	Drehen (periodisch), Schleifen (aperiodisch), Hochglanzpoliert
Rauheiten	$R_z = 0,05 \mu\text{m} - R_z = 10 \mu\text{m}$
Neigungswinkel zur Referenzebene	0° bis 45° ($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)
Messrichtung	ansteigend / abfallend
Vorschubgeschwindigkeit	$v_1 = 0,1 \text{ mm/s}$, $v_2 = 0,5 \text{ mm/s}$, $v_3 = 1 \text{ mm/s}$
Profilpunktastand	$P_1 = 0,1 \mu\text{m}$, $P_2 = 0,5 \mu\text{m}$, $P_3 = 1 \mu\text{m}$
Antastkraft	$F_{a1} = 1 \text{ mN}$, $F_{a2} = 3 \text{ mN}$, $F_{a3} = 5 \text{ mN}$

Weitere Fragestellungen ergeben sich durch den Messvorgang auf der schiefen Ebene. Zum einen ändert sich durch die schiefe Ebene der Antastwinkel der Tastspitze zur Oberfläche. In der Abbildung 13 ist der Taster auf einer um den Winkel α geneigten Ebene dargestellt. Abgebildet ist der Sollzustand der Tastspitze, dabei ist der Winkel $\beta_s = 90^\circ$ und der Istzustand der Tastspitze, wobei der Winkel $\beta_s \neq \beta_i$ ist.

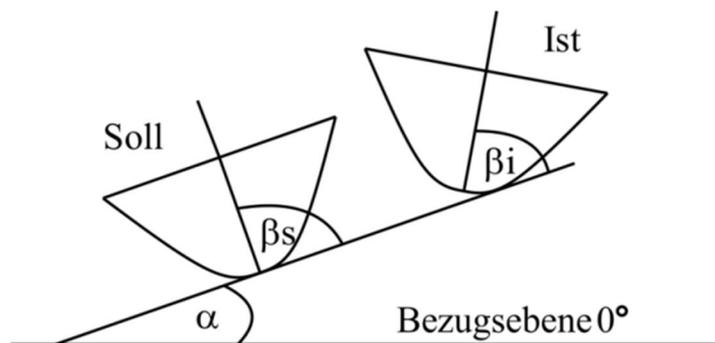


Abbildung 13: Taster auf schiefer Ebene im Soll- und Istzustand

Der Einfluss der Änderung des Antastwinkels auf die Messung und den daraus resultierenden Kennwerten müssen experimentell untersucht werden. Aufgrund der vielen Parameterkombination, siehe Tabelle 18, ist es sinnvoll für die erste Analyse die Versuchsreihen zunächst über die Statistische Versuchsplanung, Design of Experiment (DoE) und über Stichproben festzulegen. Daher werden gezielt Messeinstellungen, das heißt die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit v , der Antastkraft F_a und der Profilpunktastand P für die durchzuführenden Messungen ausgesucht.

3.6 Messeinstellungen

Die verwendeten Messeinstellungen sind für Normale (NME) in Tabelle 19 und für die technischen Oberflächen (TME) in Tabelle 20 aufgeführt. Dabei steht v für die Vorschubgeschwindigkeit, F_a für die eingestellte Antastkraft und P für den gewählten Profilkpunktstand. Die Zahlen dahinter stehen für die eingestellten Vorschubgeschwindigkeiten, z.B. $v_{0,1}$ für eine Vorschubgeschwindigkeit von $v = 0,1$ mm/s, Antastkräfte, z.B. F_{a1} für eine Antastkraft von $F_a = 1$ mN und Messpunktstände $P_{0,1}$ für einen Messpunktstand von $P = 0,1$ μ m.

Für die Normale sollten zunächst nach DoE die Eckpunkte abgedeckt werden, dies heißt die nach Tabelle 18 aufgeführten jeweils kleinsten und größten Vorschubgeschwindigkeiten, Antastkräfte und Messpunktstände. Dabei können einige Kombinationen von Geräteseite nicht ausgeführt werden. Ab einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 0,5$ mm/s kann kein Profilkpunktstand von $P = 0,1$ μ m gewählt werden. Es wird bei den Normalen daher als kleinster Profilkpunktstand $P = 0,5$ μ m gewählt. Bei den technischen Oberflächen wird der Profilkpunktstand $P = 0,1$ μ m berücksichtigt. In der Tabelle 20 werden die geräteseitig nicht ausführbaren Messeinstellungen mit nicht möglich (nim) gekennzeichnet. Bei den technischen Oberflächen werden zudem zwischen den kleinsten und größten Antastkräften F_a und Vorschubgeschwindigkeiten v noch jeweils ein weiterer Wert aus der Mitte, heißt $F_a = 3$ mN und $v = 0,5$ mm/s, hinzugenommen.

Tabelle 19: Messeinstellungsübersicht für Normale (NME)

	P0,5	P1
$v_{0,1}$ und F_{a1}	NME1	NME2
$v_{0,1}$ und F_{a5}	NME3	NME4
v_1 und F_{a1}	NME5	NME6
v_1 und F_{a5}	NME7	NME8

Tabelle 20: Messeinstellungsübersicht für technische Oberflächen (TME)

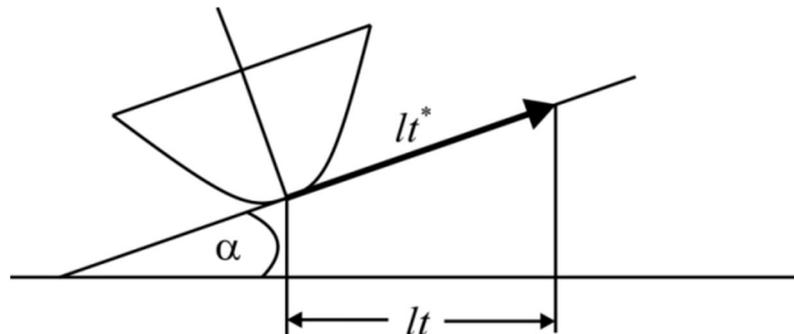
	P0,1	P0,5	P1
v0,1 und Fa1	TME1	TME2	TME3
v0,1 und Fa3	TME4	TME5	TME6
v0,1 und Fa5	TME7	TME8	TME9
v0,5 und Fa1	nim	TME10	TME11
v0,5 und Fa3	nim	TME12	TME13
v0,5 und Fa5	nim	TME14	TME15
v1 und Fa1	nim	TME16	TME17
v1 und Fa3	nim	TME18	TME19
v1 und Fa5	nim	TME20	TME21

Die Normale werden mit den gewählten Messeinstellungen auf einer Ebene mit $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ Neigung jeweils mit ansteigender und abfallender Messrichtung mit drei Wiederholungen gemessen. Die technischen Oberflächen werden mit den 21 Messeinstellungen (TME) auf einer Ebene mit $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ und 45° Neigung jeweils mit ansteigender und abfallender Messrichtung mit drei Wiederholmessungen gemessen.

3.7 Taststrecke, Abtastung und Messverfahren

Taststrecke

Durch die Neigung der Oberfläche um den Winkel α , ändert sich die Taststrecke lt . In Abbildung 14 ist gezeigt, dass die Ist-Taststrecke lt^* bei der Neigung α nicht der Soll-Taststrecke lt entspricht.

Abbildung 14: Soll-Taststrecke lt und Ist-Taststrecke lt^*

Die Änderung der Taststrecke hat Einfluss auf die Messstrecke l_m und die Vor- und Nachlaufstrecken l_n . Bei einer abfallenden Messrichtung wird die Taststrecke l_t^* größer als l_t . Dies ist nicht problematisch. Allerdings wird die Taststrecke l_t^* bei ansteigender Messrichtung kleiner, was Auswirkungen auf die Messstrecke oder die Vor- und Nachlaufstrecken l_n hat. Für eine normgerechte Auswertung sollte das vermieden werden. Weiter ist zu beachten das die Ist-Taststrecke l_t^* sich nicht einfach über die trigonometrische Funktion:

$$l_t^* = \frac{l_t}{\cos \alpha} \quad (19)$$

berechnen lässt, da sich der Winkel zwischen Tastelement und Vorschubgerät κ bei der Messung ebenso ändert, wie in Abbildung 15 dargestellt ist. Dadurch ändert sich wiederum die Ist-Tastmessstrecke l_t^* .

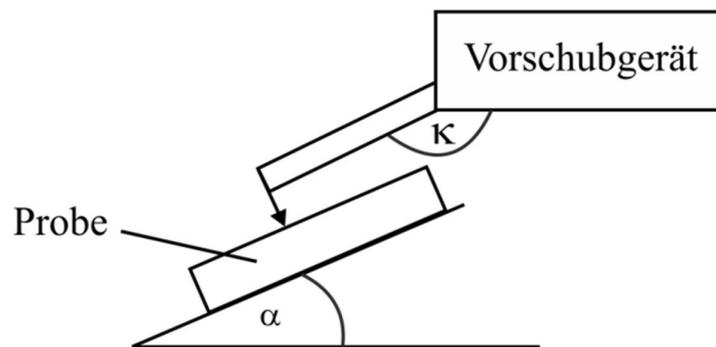


Abbildung 15: Winkeländerung zwischen Tastelement und Vorschubgerät

Es ist zu untersuchen, wie sich die Ist-Taststrecke in Abhängigkeit des Neigungswinkels α und der Winkel κ ändert.

Abtastung

Durch die Neigung α wird die Oberfläche nicht mehr äquidistant abgetastet. Um Kennwerte normgerecht auswerten zu können, müssen äquidistante Messpunkte vorliegen. Lösungen werden im Abschnitt Software und Berechnung erläutert.

Messverfahren

Für das Messverfahren sind Maßnahmen nach DIN EN ISO 14253-2 [DIN 14253-2] vor der Messung, beim Messen und nach dem Messen vorzunehmen. Diese sind in Tabelle 21 aufgeführt.

Tabelle 21: Maßnahmen beim Messverfahren

Maßnahme	Umsetzung
Reinigung der Proben vor der Messung	Reinigung der Proben mit Isopropanol
Anzahl der Messungen	Voruntersuchungen: 3 Wiederholmessungen pro Messeinstellung Hauptuntersuchungen 12 Wiederholmessungen pro Messeinstellung
Reihenfolge der Messungen	Alle Messeinstellungen pro Winkel auf einer Probe, eine Messrichtung
Dauer der Messungen	Abhängig von Messstrecke und Vorschubgeschwindigkeit
Ausrichten	Vorschubeinheit parallel zur x-Achse
Wahl der Referenz	Werkstücklage bei $\alpha = 0^\circ$, Nullpunktausrichtung des Tastelements, 24 Messstrecken
Messstrategie: Vorschubgeschwindigkeit v , Antastkraft F_a und Profilpunktstand P	$v_1 = 0,1 \text{ mm/s}$, $v_2 = 0,5 \text{ mm/s}$, $v_3 = 1 \text{ mm/s}$ $F_{a1} = 1 \text{ mN}$, $F_{a2} = 3 \text{ mN}$, $F_{a3} = 5 \text{ mN}$ $P_1 = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$, $P_2 = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$, $P = 1 \text{ }\mu\text{m}$
Einzelmessstrecke l_e	Je nach Oberfläche nach DIN EN ISO 3274
Art des Filters	λ_s Filter nach DIN EN ISO 16610-21 λ_c Filter nach DIN EN ISO 16610-21 Sonderfilter nach DIN EN ISO 13565-1
Prinzip Antastung und Antaststrategie	Untersuchung der Auslenkung des Tastelements auf Messstrecke und Rauheitskennwerte

Es ist zunächst sinnvoll, aufgrund der vielen Parameter, eine Stichprobenuntersuchung durchzuführen. Daher werden drei Wiederholmessungen pro Parameterkombination (Messeinstellung) gemessen.

3.8 Änderung der relativen Tastergeschwindigkeit

Beim Messen von Rauheit auf Konturen ändert sich die relative Tastergeschwindigkeit beim Messvorgang. Dies wird am Beispiel einer Messung auf einer schiefen Ebene für eine fallende Messrichtung gezeigt. Auf anderen Konturen ergeben sich andere Geschwindigkeitsverläufe. Dabei werden zunächst zwei Extremfälle, wie in Abbildung 16 dargestellt, unterschieden.

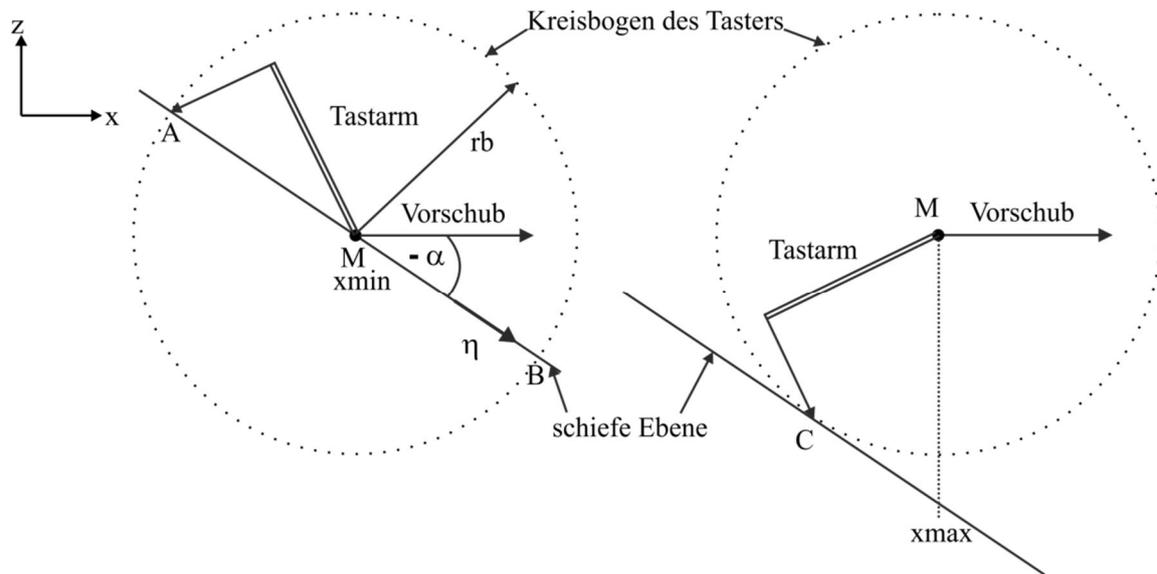


Abbildung 16: Fallunterscheidung Taster auf Ebene; links Fall 1, rechts Fall 2

Im Fall 1 liegt der Vorschub zu Beginn der Messung auf der schiefen Ebene, im Fall 2 am weitesten entfernt, so dass die Tastspitze die Oberfläche gerade noch berührt. Der Vorschub bewegt sich entlang der x-Achse mit dem Vektor \vec{v}

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} x(t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Der Taster bewegt sich beim Messvorgang auf einem Kreisbogen mit dem Radius r_b , der dem Radius des Tasters entspricht. Im Fall 1 verläuft die Ebene, hier als Gerade \vec{g} betrachtet, durch den Mittelpunkt des Kreises M (0,0) und es ergeben sich zwei Schnittpunkte, A und B, der Geraden \vec{g} mit dem Kreis. Im Fall 2 ergibt sich nur ein Schnittpunkt C der Geraden \vec{g} mit dem Kreis. Der Vektor der Geraden \vec{g} kann über einen Aufpunkt und einem mit η multipliziertem Richtungsvektor wie folgt aufgestellt werden:

$$\vec{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \eta \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Die Kreisgleichung kann beschrieben werden mit x , z , dem Radius des Kreises r_b und der zeitabhängigen Komponente $x(t)$ über:

$$(x - x(t))^2 + z^2 = r_b^2. \quad (22)$$

Im Fall 1 schneidet die Gerade \vec{g} den Kreis in den zwei Punkten A und B. Gesucht wird der Schnittpunkt A. Für die Berechnung der zwei Punkte wird die Geradengleichung in die Kreisgleichung eingesetzt und nach η aufgelöst.

$$(\eta \cdot \cos \alpha - x(t))^2 + \eta^2 \cdot \sin^2 \alpha = r_b^2$$

$$\eta^2 - \eta \cdot 2 \cdot \cos \alpha \cdot x(t) + x^2(t) - rb^2 = 0$$

$$\eta_{1,2} = \cos \alpha \cdot x(t) \pm \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot x^2(t) - x(t) + rb^2}$$

Dabei ist die Lösung für den Punkt B η_1

$$\eta_1 = \cos \alpha \cdot x(t) + \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot x^2(t) - x(t) + rb^2}$$

und die Lösung für den Punkt A η_2

$$\eta_2 = \cos \alpha \cdot x(t) - \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot x^2(t) - x(t) + rb^2} \quad (23)$$

Nach der Ableitung von η_2 :

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} = \frac{\partial x(t)}{\partial t} \cdot \cos \alpha - \frac{(\cos^2 \alpha - 1) \cdot x(t)}{\sqrt{(\cos^2 \alpha - 1) \cdot x^2(t) + rb^2}} \quad (24)$$

kann die Geschwindigkeit berechnet werden von $x(t)_{\min}$ von Fall 1 bis zu $x(t)_{\max}$ von Fall 2. Dabei gilt:

$$x(t)_{\min} = 0 \quad (25)$$

und

$$x(t)_{\max} = \sqrt{\frac{rb^2}{1 - \cos^2 \alpha}} \quad (26)$$

Für die Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$, 30° und 45° in fallender Messrichtung werden die Geschwindigkeitsverläufe, das heißt die reale Geschwindigkeit v_{real} zu der Vorschubgeschwindigkeit v über die mit dem Radius des Tasters rb normierte Taststrecke l_t in Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt.

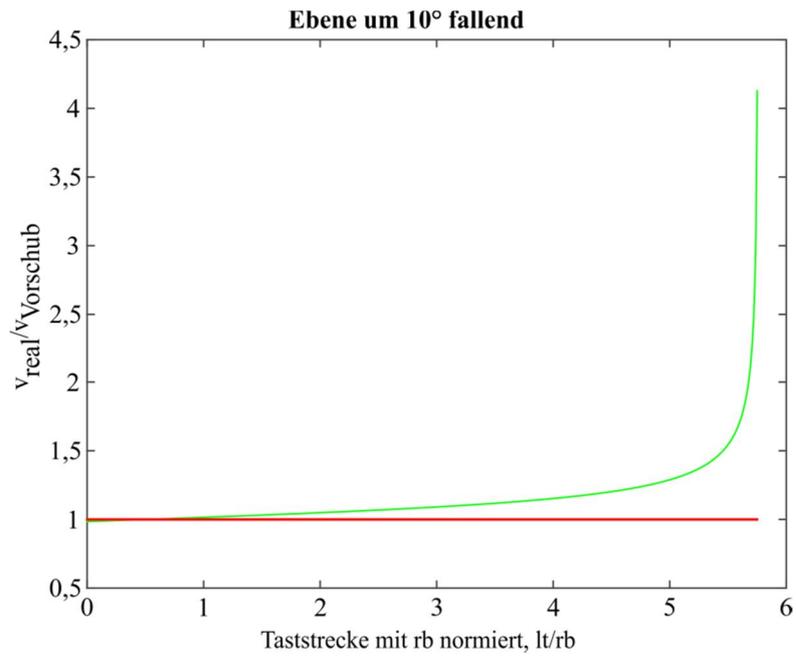


Abbildung 17: Geschwindigkeitsverlauf 10° fallend

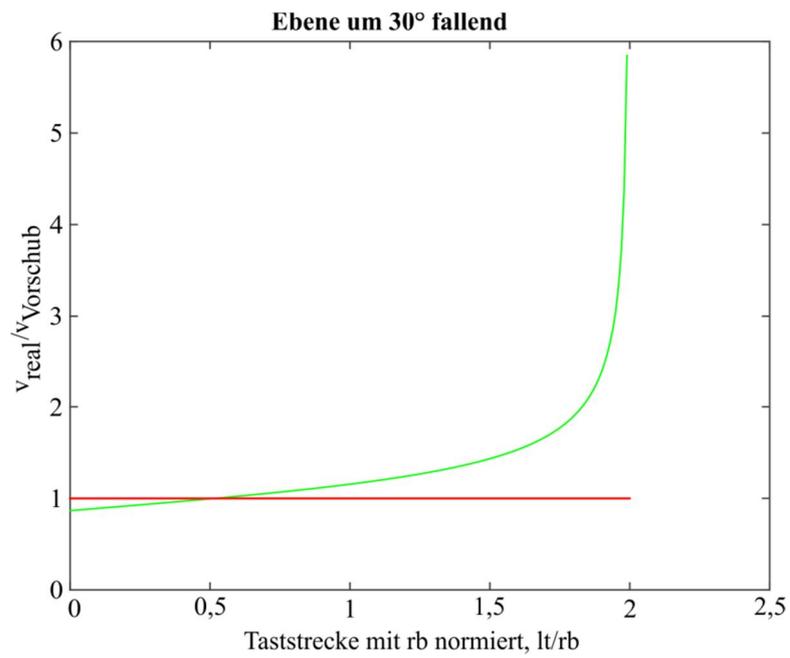


Abbildung 18: Geschwindigkeitsverlauf 30° fallend

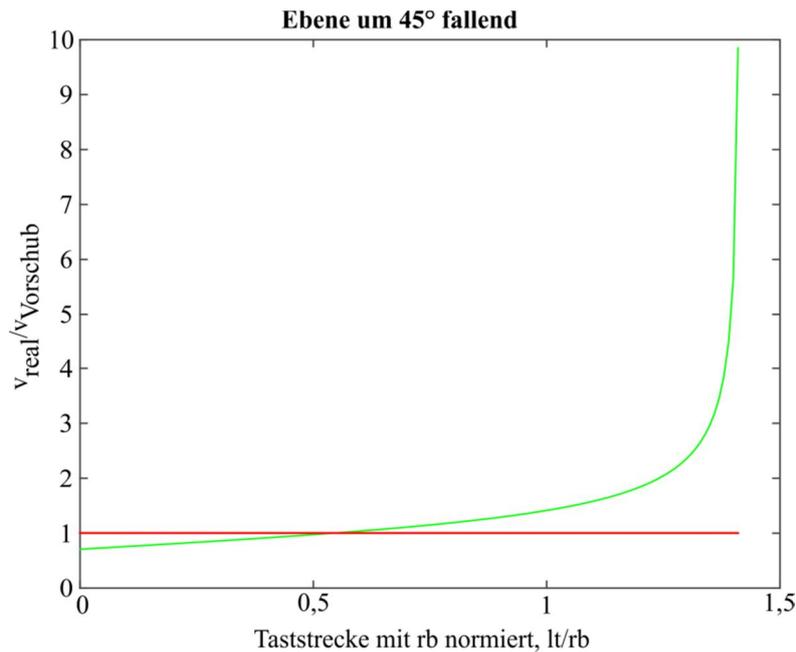


Abbildung 19: Geschwindigkeitsverlauf 45° fallend

Aus der Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 ist zu erkennen, dass mit ansteigendem Neigungswinkel α die verfügbare Taststrecke l_t kürzer wird und die reale Geschwindigkeit v_{real} stärker zunimmt. Für den Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ist eine maximale Taststrecke von $l_t = r_b \cdot \sqrt{2}$ verfügbar. Zu beachten ist, dass bei einem Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ und 45° die reale Geschwindigkeit v_{real} am Anfang sogar kleiner als die Vorschubgeschwindigkeit v ist. Die Vorschubeinheit sollte daher beim Start der Messung nah an der schiefen Ebene positioniert werden. Die vorgestellte Betrachtung kann analog für eine ansteigende Messrichtung verwendet werden.

3.9 Software und Berechnung

Nach der Auswertung kann analysiert werden welche Parameter einen starken und welche einen schwachen Einfluss bei der kombinierten Rauheitsmessung auf Konturen haben. Weiter kann eine Aussage über ein geeignetes Auswerteverfahren getroffen werden und Vorschläge für die Wahl der Messtrecke gemacht werden. Zum Ausrichten und Interpolieren wird das Programm Matlab®, Version R2014b, verwendet und zum Auswerten der Rauheitskennwerte das Programm Surflab©.

Parameter

Aufgrund der vielen Parameterkombinationen werden zunächst Stichprobenmessungen durchgeführt. Die dadurch erhaltenen Informationen sollen Aussagen über die Eigenschaften der Parameter geben, vor allem welche Parameter einen schwachen und welche einen starken Einfluss haben. Danach können gezielt weitere Messreihen durchgeführt werden.

In den meisten Fällen sind Messdaten einer Messreihe normalverteilt [Müh12]. Zudem besagt der zentrale Grenzwertsatz, dass mit Zunahme der Eingangsgrößen die Verteilung der Ausgangsgröße gegen eine Normalverteilung konvergiert. [DIN 13005]

Zudem gibt es Testverfahren, um Messreihen auf Vorliegen einer Normalverteilung zu überprüfen. Für eine kleine Stichprobenanzahl eignen sich der Kolmogorow-Smirnow-Test (KST), der Anderson-Darling-Test (ADT) und der Shapiro-Wilk-Test (SWT). Weiter kann mit dem Jarque-Bera-Test (JBT) zusätzlich auf Schiefe und Kurtosis getestet werden. Mit Hilfe der Varianzanalyse (ANOVA) können zudem Ähnlichkeiten und Unterschiede der Messeinstellungen signifikant untersucht werden.

Auswertealgorithmen

Um ein Profil normgerecht auswerten zu können und Rauheitskennwerte zu berechnen, muss das Rohprofil ausgerichtet sein, die Nennform entfernt und äquidistante Werte vorliegen. Daher muss im ersten Schritt der Auswertung ein Ausgleichselement eingepasst und abgezogen werden. Im Fall der schiefen Ebene eine Ausgleichgerade. Dabei kann die Methode der kleinsten Quadrate (least squares Methode) (LS) oder die einer orthogonalen Regression (total least squares Methode) (TLS) angewendet werden. Nach Anwendung der LS Methode sind die erhaltenen Profildaten äquidistant, nach Anwendung der TLS Methode nicht äquidistant. Allerdings sind die Daten nach der LS Methode nur dann äquidistant, wenn die aufgenommenen Rohdaten aus dem Messgerät ebenfalls äquidistant vorliegen. Dies ist bei dem Messgerät nanoscan 855 nur dann der Fall, wenn exakt auf 0° zur Bezugsachse gemessen wird. Da dies nicht möglich ist, sind die vorliegenden Rohdaten nicht äquidistant (NEQ). Daher muss im nächsten Schritt interpoliert werden, um äquidistante Werte zu erhalten. Für die Interpolation werden zwei verschiedene Operationen miteinander verglichen. Zum einen ein Spline (Sp) und zum anderen ein am Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik entwickelter interpolierender Gaußfilter (IpL). Beim IpL wird in einem Schritt der Profilfilter λ_s angewendet und interpoliert, siehe Anhang B. Eine weiterführende Veröffentlichung folgt in Kürze. Für die Daten, bei denen nicht der IpL angewendet wird, erfolgt nach der Interpolation die Filterung mit dem λ_s Filter nach DIN EN ISO 16610-21 [DIN 16610-21]. Nach anschließender Anwendung eines Hochpasses über den λ_c Filter nach DIN EN ISO 16610-21 [DIN 16610-21] oder dem Sonderfilter nach DIN EN ISO 13565-1 [DIN 13565-1] ist der hochfrequente Anteil das R-Profil, von dem ausgehend die Rauheitskennwerte berechnet werden können. Bei den Voruntersuchungen werden für die Normale und die technischen Oberflächen die folgenden Kennwerte ausgewertet: R_a , R_q , R_z , R_k , R_{pk} , R_{vk} , Mr_1 und Mr_2 . Die Auswerteschritte sind in Abbildung 20 dargestellt.

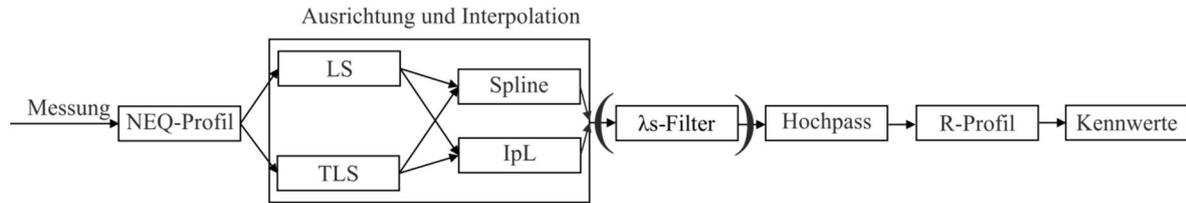


Abbildung 20: Auswerteschema

Es ergeben sich vier verschiedene Methoden zur Ausrichtung und Interpolation, die in Tabelle 22 aufgestellt sind. Bei der Anwendung des IpL wird in einem Schritt der Profilfilter λ_s angewendet und interpoliert, so dass eine anschließende λ_s Filterung nicht notwendig ist.

Tabelle 22: Methoden zur Ausrichtung und Interpolation

Methode	Ausrichten	Interpolation	Profilfilter λ_s
A	LS	Spline	Ja
B	LS	IpL	Nein
C	TLS	Spline	Ja
D	TLS	IpL	Nein

4 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden zunächst Mittelpunktprofile und Berührprofile anhand der technischen Oberflächen untersucht. Im Anschluss folgen, mit Hilfe der Statistischen Versuchsplanung (DOE), Voruntersuchungen mit den ausgewählten Normalen und den technischen Oberflächen. Aus den gewonnenen Ergebnisse werden Hauptuntersuchungen an den technischen Oberflächen durchgeführt.

4.1 Mittelpunktprofil und Berührprofil

Es werden 24 Messtrecken mit der Vorschubgeschwindigkeit $v = 0,5 \text{ mm/s}$, der Antastkraft $F_a = 1 \text{ mN}$ und einem Profilkpunktastand $P = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ gemessen. Diese Messstrecken bilden zudem für die Vor- und Hauptuntersuchen die Referenz. Da die Rohdaten nicht äquidistant und nicht exakt mit $\alpha = 0^\circ$ gemessen werden können, müssen diese zunächst ausgerichtet und interpoliert werden. Da die Neigung α mit $\alpha = 0^\circ \pm 1^\circ$ sehr gering ist, sind die Ergebnisse für eine LS und TLS Ausrichtung identisch. Für den Vergleich von Mittelpunkt und Berührprofil werden zwei verschiedene Ansätze herangezogen.

Mit dem ersten Ansatz werden die Profile mit der Methode A, siehe Tabelle 22, mit der LS Methode und Spline ohne den Profilfilter λ_s ausgerichtet und interpoliert. Das erhaltene Profil ist ausgerichtet und es sind äquidistant Messdaten vorhanden. Es erfolgt die Erosion nach DIN EN ISO 16610-41 [DIN 16610-41] mit einer $5 \text{ }\mu\text{m}$ Tastspitze und danach werden der λ_s Profilfilter und der λ_c Filter nach DIN EN ISO 16610-21 [DIN 16610-21] oder der Sonderfilter nach DIN EN ISO 13565-1 [DIN 13565-1] angewendet und Rauheitskennwerte berechnet.

Mit dem zweiten Ansatz werden die Profile mit der Methode B, siehe Tabelle 22, mit der LS Methode und dem interpolierendem Gaußfilter (IpL) ausgerichtet und interpoliert. Da beim IpL in einem Schritt interpoliert und der λ_s Profilfilter angewendet wird, wird der λ_s Filter nach der Erosion nicht mehr angewendet. Das erhaltene Profil ist ausgerichtet und es sind äquidistant Messdaten vorhanden. Es erfolgt die Erosion nach DIN EN ISO 16610-41 [DIN 16610-41] mit einer $5 \text{ }\mu\text{m}$ Tastspitze und danach wird der λ_c Filter oder der Sonderfilter angewendet und Rauheitskennwerte berechnet. Die R-Profile und Kennwerte der zwei Ansätze werden untersucht und miteinander verglichen. Die zwei Ansätze sind in Abbildung 21 dargestellt.

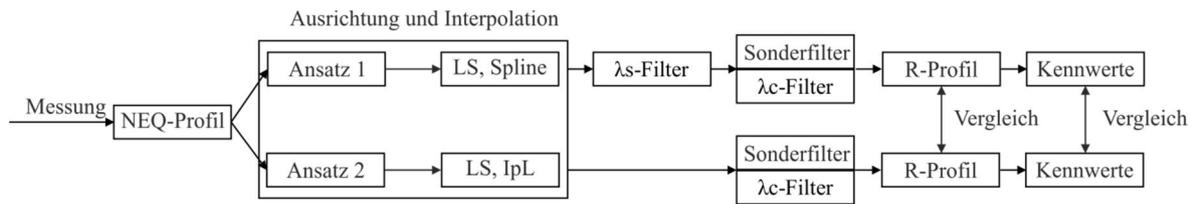


Abbildung 21: Ansatz 1 und Ansatz 2

Für die Proben 1,2,5,6 und 9 sind beispielhaft in Tabelle 23 die Mittelpunktprofile nach Ansatz 1, in Tabelle 24 die Mittelpunktprofile nach Ansatz 2, in Tabelle 25 die Berührprofile nach Ansatz 1 und in Tabelle 26 die Berührprofile nach Ansatz 2 mit der zugehörigen empirischen Standardabweichung δ dargestellt. Die Ergebnisse aller Proben finden sich im Anhang B.

Tabelle 23: Mittelpunktprofile nach Ansatz 1 (λ_s nach Erosion)

	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
Pr1	0,01±0,00	0,01±0,01	0,06±0,02	0,03±0,00	0,01±0,02	0,01±0,01
Pr2	0,19±0,08	0,32±0,21	2,34±1,17	0,44±0,03	0,21±0,03	0,65±0,54
Pr5	1,56±0,65	2,12±0,83	12,32±3,94	4,13±1,78	1,94±0,58	3,71±1,46
Pr6	0,16±0,01	0,19±0,01	0,85±0,12	0,50±0,05	0,16±0,02	0,14±0,06
Pr9	2,13±0,02	2,50±0,02	8,95±0,17	2,84±0,14	5,39±0,08	0,55±0,15

Tabelle 24: Mittelpunktprofile nach Ansatz 2 (λ_s vor Erosion)

	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
Pr1	0,01±0,00	0,01±0,01	0,06±0,02	0,03±0,00	0,01±0,01	0,01±0,01
Pr2	0,19±0,08	0,32±0,21	2,35±1,14	0,44±0,03	0,21±0,03	0,66±0,55
Pr5	1,57±0,66	2,14±0,83	12,32±3,81	4,21±1,91	1,94±0,57	3,66±1,36
Pr6	0,16±0,01	0,19±0,01	0,85±0,12	0,50±0,05	0,16±0,02	0,14±0,06
Pr9	2,13±0,02	2,50±0,02	8,95±0,17	2,35±0,16	5,10±0,13	0,53±0,26

Tabelle 25: Berührprofile nach Ansatz 1 (λ_s nach Erosion)

	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
Pr1	0,01±0,00	0,01±0,00	0,06±0,02	0,03±0,00	0,01±0,01	0,01±0,01
Pr2	0,19±0,08	0,34±0,23	2,32±1,18	0,44±0,03	0,20±0,03	0,70±0,58
Pr5	1,58±0,65	2,13±0,82	12,14±3,95	4,10±1,75	1,83±0,65	3,73±1,39
Pr6	0,16±0,01	0,19±0,01	0,85±0,12	0,50±0,05	0,16±0,02	0,15±0,07
Pr9	2,09±0,02	2,46±0,02	8,93±0,17	2,84±0,14	5,28±0,08	0,57±0,15

Tabelle 26: Berührprofile nach Ansatz 2 (λ_s vor Erosion)

	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
Pr1	0,01 \pm 0,00	0,01 \pm 0,00	0,06 \pm 0,02	0,03 \pm 0,00	0,01 \pm 0,01	0,01 \pm 0,00
Pr2	0,19 \pm 0,08	0,34 \pm 0,23	2,34 \pm 1,18	0,44 \pm 0,03	0,20 \pm 0,03	0,71 \pm 0,59
Pr5	1,59 \pm 0,66	2,14 \pm 0,83	12,24 \pm 3,83	4,18 \pm 1,88	1,83 \pm 0,63	3,68 \pm 1,30
Pr6	0,16 \pm 0,01	0,19 \pm 0,01	0,84 \pm 0,12	0,50 \pm 0,05	0,16 \pm 0,02	0,15 \pm 0,07
Pr9	2,09 \pm 0,02	2,46 \pm 0,02	8,94 \pm 0,17	2,35 \pm 0,17	5,00 \pm 0,13	0,55 \pm 0,26

Es sind kaum Unterschiede sowohl zwischen dem Mittelpunktprofilen nach Ansatz 1 und Ansatz 2 noch zwischen den Berührprofilen nach Ansatz 1 und Ansatz 2 bis auf wenige Ausreißer zu erkennen. Ebenso zeigt ein Vergleich des Mittelpunktprofils und des Berührprofils nach Ansatz 1 und Ansatz 2 bis auf wenige Ausreißer geringe Unterschiede. Bis auf die hochglanzpolierte Probe 1, Probe 2 mit $R_z = 1 \mu\text{m}$ und Probe 5 mit $R_z = 10 \mu\text{m}$ haben die Proben eine kleine empirische Standardabweichung δ . Allerdings ist zu beachten, dass bei allen Proben eine hohe Standardabweichung für den Rauheitskennwert Rvk vorliegt. Um die genannten Ausreißer besser zu erkennen und zu bewerten sind in Tabelle 27 die Mittelpunktprofile nach Ansatz 1 zu den Mittelpunktprofilen nach Ansatz 2 und in Tabelle 28 die Berührprofile nach Ansatz 1 zu den Berührprofilen nach Ansatz 2 dargestellt. Dabei sind nur die Proben dargestellt, bei denen die prozentualen Unterschiede $> 5 \%$ betragen und diese sind rot markiert. Die Ergebnisse aller Proben befinden sich im Anhang B.

Tabelle 27: Mittelpunktprofile nach Ansatz 1 zu Mittelpunktprofilen nach Ansatz 2

	$\frac{Ra_{MP1}}{Ra_{MP2}} / \%$	$\frac{Rq_{MP1}}{Rq_{MP2}} / \%$	$\frac{Rz_{MP1}}{Rz_{MP2}} / \%$	$\frac{Rk_{MP1}}{Rk_{MP2}} / \%$	$\frac{Rpk_{MP1}}{Rpk_{MP2}} / \%$	$\frac{Rvk_{MP1}}{Rvk_{MP2}} / \%$
Pr1	+0,83	-0,01	+0,77	+2,29	+9,57	-3,53
Pr9	-0,00	-0,00	-0,00	-20,74	+5,74	+2,89

Tabelle 28: Berührprofile nach Ansatz 1 zu Berührprofilen nach Ansatz 2

	$\frac{Ra_{BP1}}{Ra_{BP2}} / \%$	$\frac{Rq_{BP1}}{Rq_{BP2}} / \%$	$\frac{Rz_{BP1}}{Rz_{BP2}} / \%$	$\frac{Rk_{BP1}}{Rk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rpk_{BP1}}{Rpk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rvk_{BP1}}{Rvk_{BP2}} / \%$
Pr1	+0,72	-0,44	-0,09	+2,38	+6,17	-2,56
Pr9	+0,00	+0,01	+0,15	-20,74	-5,55	-3,25

Bei den Proben 2 bis 8 sind die prozentualen Unterschiede sowohl bei dem Vergleich der Mittelpunktprofile, als auch bei den Berührprofilen $\leq \pm 2 \%$. Der Rk Kennwert bei Probe 9 ist

bei beiden Vergleichen mit über 20 % Unterschied ein offensichtlicher Ausreißer. Unterschiede >5 % treten zudem nur bei den Rauheitskennwerten R_k und R_{pk} auf. Es kann festgehalten werden, dass es keinen großen Unterschied macht, ob vor oder nach der Erosion der Profilfilter λ_s angewendet wird.

Weiter folgt der Vergleich der Mittelpunktprofile zu den Berührprofilen nach Ansatz 1 in Tabelle 29 und nach Ansatz 2 in Tabelle 30. Wiederum sind nur die Proben dargestellt, bei denen die prozentualen Unterschiede >5 % betragen und diese sind rot markiert. Die Ergebnisse aller Proben befinden sich im Anhang B.

Tabelle 29: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 1

	$\frac{Ra_{MP1}}{Ra_{BP1}} / \%$	$\frac{Rq_{MP1}}{Rq_{BP1}} / \%$	$\frac{Rz_{MP1}}{Rz_{BP1}} / \%$	$\frac{Rk_{MP1}}{Rk_{BP1}} / \%$	$\frac{Rpk_{MP1}}{Rpk_{BP1}} / \%$	$\frac{Rvk_{MP1}}{Rvk_{BP1}} / \%$
Pr1	+1,02	+2,45	+1,15	+0,17	+11,16	+4,64
Pr2	-2,72	-4,40	+1,17	+0,30	+9,27	-6,89
Pr3	+1,20	+1,19	+1,68	+1,43	+5,74	-0,25
Pr5	-0,99	-0,26	+1,50	+0,58	+5,90	-0,50
Pr6	-0,03	-0,35	-0,03	+0,18	+0,05	-6,80
Pr7	+1,15	+0,97	+0,01	-0,22	+3,12	-6,04

Tabelle 30: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 2

	$\frac{Ra_{MP2}}{Ra_{BP2}} / \%$	$\frac{Rq_{MP2}}{Rq_{BP2}} / \%$	$\frac{Rz_{MP2}}{Rz_{BP2}} / \%$	$\frac{Rk_{MP2}}{Rk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rpk_{MP2}}{Rpk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rvk_{MP2}}{Rvk_{BP2}} / \%$
Pr1	+0,90	+2,01	+0,28	+0,25	+7,71	+5,69
Pr2	-2,68	-4,34	+0,03	+0,19	+7,49	-6,83
Pr3	+1,10	+1,08	+0,76	+1,40	+5,74	-0,39
Pr5	-0,94	-0,22	+0,69	+0,70	+5,90	-0,56
Pr6	-0,03	-0,32	+0,07	+0,21	-0,01	-6,29

Bei dem Vergleich von Mittelpunktprofil zu Berührprofil nach Ansatz 1 sind bei den Proben 4,8, und 9 und bei dem Vergleich von Mittelpunktprofil zu Berührprofil nach Ansatz 2 sind bei den Proben 4,8,7 und 9 die prozentualen Unterschiede $<\pm 5$ %.

Deutlich sichtbar wird, dass prozentuale Unterschiede >5 % nur bei den Rauheitskennwerte R_{pk} und R_{vk} auftreten.

Zusammenfassend kann anhand der Ergebnisse keine Abhängigkeit der Rauheit festgestellt werden, noch eindeutig beantwortet werden, ob es eine Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens gibt, das heißt ob die Oberfläche gedreht oder geschliffen wurde.

Die aufgezeigten geringen, aber doch vorhandenen Unterschiede der Rauheitskennwerte zwischen dem Mittelpunktprofil und dem Berührprofil sollten im Profil erkennbar sein. In Abbildung 22 ist beispielhaft ein Ausschnitt des Rauheitsprofils der Probe 2, einer geschliffenen Probe mit $R_z = 3 \mu\text{m}$ und in Abbildung 23 ein Ausschnitt des Rauheitsprofils der Probe 7, einer gedrehten Probe mit $R_z = 3 \mu\text{m}$ abgebildet. Es ist jeweils das Mittelpunktprofil und das zugehörige Berührprofil nach Ansatz 2 dargestellt.

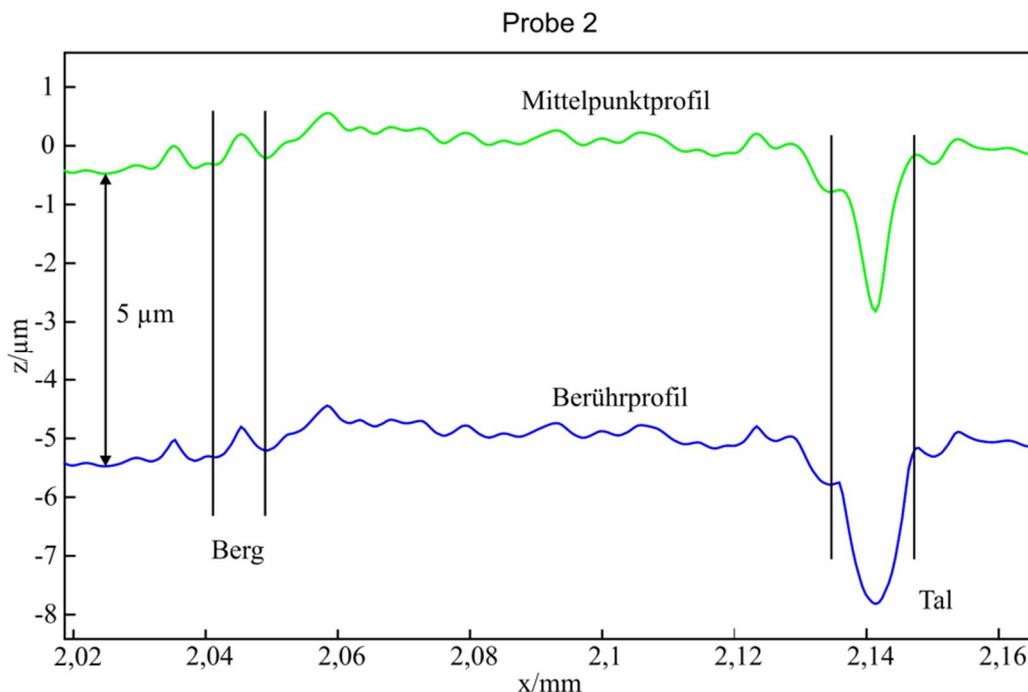


Abbildung 22: Probe 2, Mittelpunktprofil und Berührprofil, Ansatz 2

Beide Proben haben eine geringe Rauheit, bei gleichem R_z Wert von $R_z = 3 \mu\text{m}$. Durch die Erosion mit einer $r = 5 \mu\text{m}$ Tastspitze liegen die Berührprofile $z = -5 \mu\text{m}$ unter den Mittelpunktprofilen. Unterschiede zwischen dem Mittelpunktprofil und dem Berührprofil sind stärker an der geschliffenen Probe 2 als an der gedrehten Probe 7 zu erkennen. Berge des Mittelpunktprofils sind runder und Täler dafür spitzer, als beim Berührprofil. Daher wird ersichtlich, dass der Unterschied zwischen den Rauheitskennwerten zwischen Mittelpunktprofil und Berührprofil bei der Probe 2 größer sind, als bei der Probe 7, siehe Tabelle 31. Allerdings ist diese Beobachtung beim Vergleich der anderen gedrehten und geschliffenen Proben mit gleicher Rauheit anders. Es kann nicht eindeutig festgehalten werden, dass die gedrehten Oberflächen kleinere prozentuale Abweichungen als die geschliffenen aufweisen.

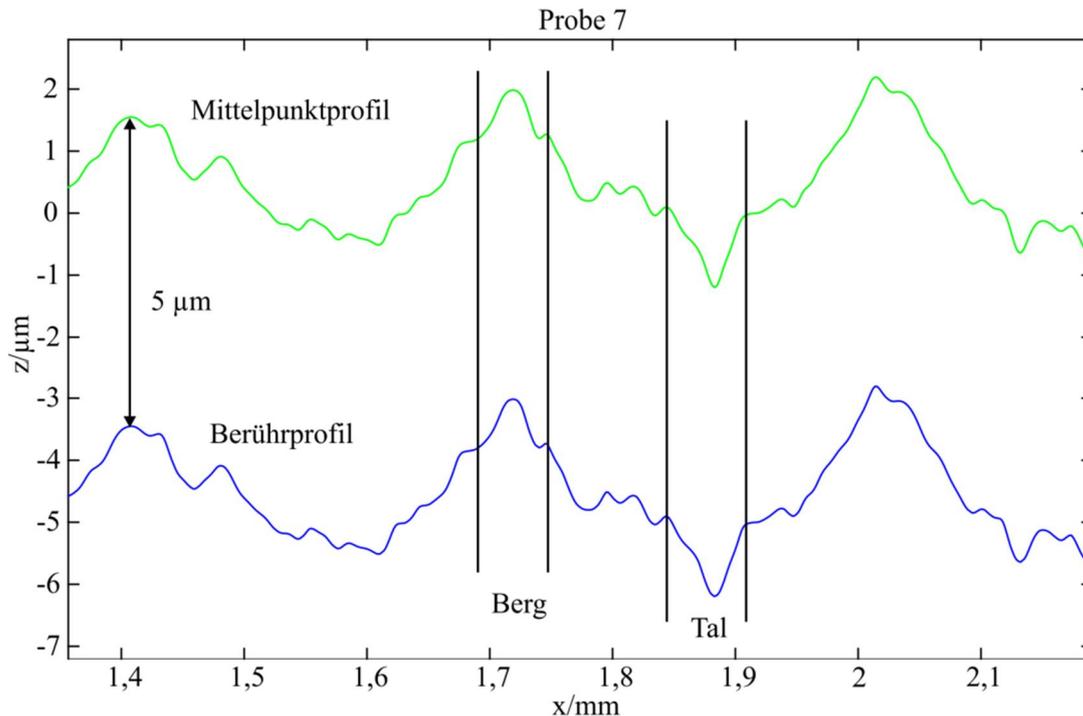


Abbildung 23: Probe 7, Mittelpunktprofil und Berührprofil, Ansatz 2

Tabelle 31: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 2, Probe 2 und 7

	$\frac{Ra_{MP2}}{Ra_{BP2}} / \%$	$\frac{Rq_{MP2}}{Rq_{BP2}} / \%$	$\frac{Rz_{MP2}}{Rz_{BP2}} / \%$	$\frac{Rk_{MP2}}{Rk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rpk_{MP2}}{Rpk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rvk_{MP2}}{Rvk_{BP2}} / \%$
P2	-2,68	-4,34	+0,03	+0,19	+7,49	-6,83
P7	+1,16	+0,97	+0,04	-0,31	+3,08	-4,80

4.2 Voruntersuchungen

Mit den Zusammenhängen und Parametern aus Kapitel 3 wird, aufgrund der vielen Parameterkombinationen eine Versuchsreihe mit Hilfe der Statistischen Versuchsplanung (DOE) für die Untersuchung der Normale aufgestellt. Dies soll zunächst ein erstes Ergebnis und eine erste Aussage über die Durchführbarkeit einer Rauheitsmessung auf Konturen liefern. Basierend darauf erfolgen Versuchsreihen an den ausgewählten technischen Oberflächen. Die Versuchsreihen sollen Abhängigkeiten der Parameter und deren Einfluss auf die Rauheitsmessung auf Konturen aufzeigen. Beim DOE-Konzept müssen zunächst die Zielfunktion und die zugehörigen Parameter gefunden werden. Es müssen Stell-, Steuer- und Störgrößen extrahiert werden. Im Anschluss folgen die Reduzierung der Versuchsgrößen und damit die Abgrenzung der Wechselwirkungen. [Kle11], [Brü15]

Die Zielfunktion, beziehungsweise die Parameter der Zielfunktion sind die Rauheitskennwerte beim Messen von Rauheit auf Konturen. Stell-, Steuer und Störgrößen sind in Kapitel 3 detailliert aufgeführt. Es folgt die sinnvolle Reduzierung der Versuchsgrößen Neigungswinkel α , Profilkpunktastand P, Antastkraft F_a , Vorschubgeschwindigkeit v und Rauheitsstufen. Dadurch können die Parameter zielgerichtet untersucht und bewertet werden. Die Ergebnisse der Einflüsse der Parameter können am Ende der Untersuchungen in die Tabelle 32 eingefügt und bewertet werden. Damit kann zum Beispiel beantwortet werden, ob eine Änderung der Vorschubgeschwindigkeit v je nach Messrichtung unterschiedliche Rauheitskennwerte liefert, oder ob die Rauheitskennwerte je nach Neigungswinkel α und Bearbeitungsverfahren Unterschiede aufzeigen und ob der Einfluss stark oder schwach ist.

Tabelle 32: Einflüsse der Parameter

	(N)	(V)	(P)	(M)	(Fa)	(FV)	(R)
Neigung (N)		?	?	?	?	?	?
Vorschub (V)			?	?	?	?	?
Profilpunktastand (P)				?	?	?	?
Messrichtung (M)					?	?	?
Antastkraft (Fa)						?	?
Fertigungsverfahren (FV)							?
Rauheit (R)							

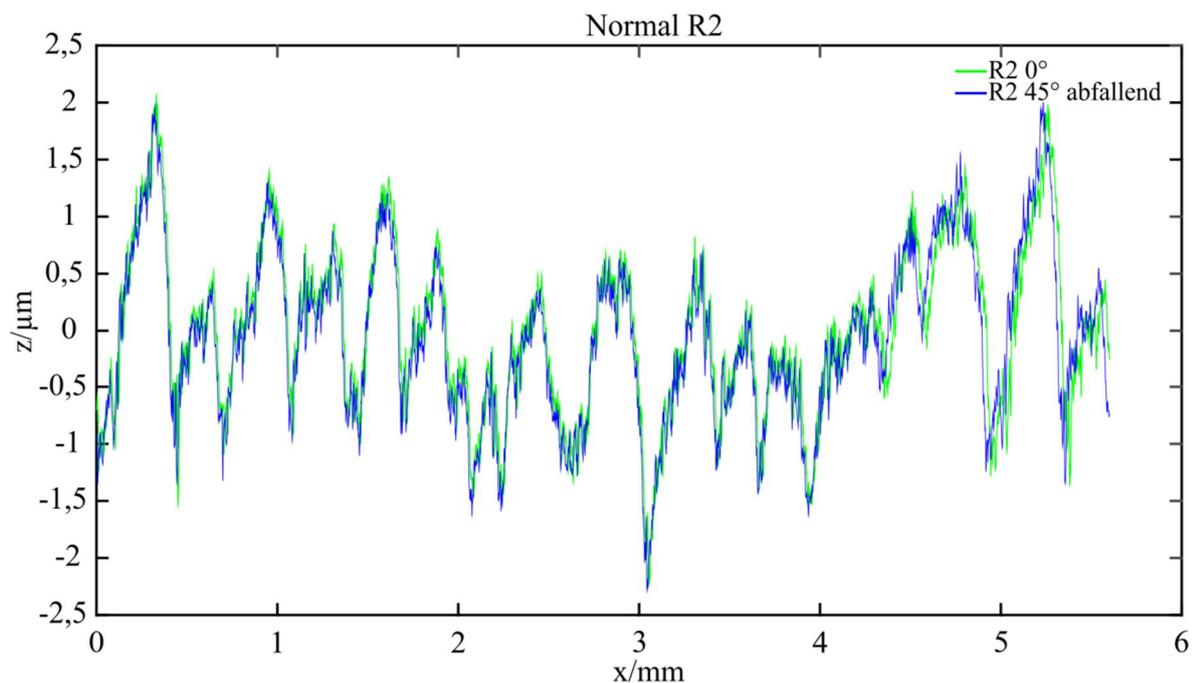
4.2.1 Normale

In den betreuten Arbeiten Illi, A., Keil L. und Mayer L. wurden mit Hilfe der DOE Parameterstudien an den sechs ausgewählten Normalen durchgeführt. Die Ergebnisse der Normale sollen einen ersten Eindruck geben, welche Rauheitskennwerte bei der Rauheitsmessung auf Konturen zu erwarten sind und ob diese brauchbar sind. Gemessen werden die Normale bei einem Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ mit zwei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten $v_1 = 0,1 \text{ mm/s}$ und $v_2 = 1 \text{ mm/s}$, zwei Antastkräften $F_{a1} = 1 \text{ mN}$ und $F_{a2} = 5 \text{ mN}$ und zwei Profilkpunktaständen $P_1 = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ und $P_2 = 1 \text{ }\mu\text{m}$, siehe Tabelle 19, mit je ansteigender und abfallender Messrichtung. Ein Vergleich der Rauheitskennwerte für den Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ erfolgt mit den Referenzrauheitskennwerte bei $\alpha = 0^\circ$. Die Taststrecken lt der Normale sind in Tabelle 33 aufgeführt.

Tabelle 33: Taststrecken lt der untersuchten Normale

Normal	lt/ mm
R1 / R2 / Rk	5,6
S1 / S2 / S3	1,75

Die experimentellen Versuche bestätigen, dass die Messstrecke sich bei allen Normalen bei ansteigender Messrichtung verkürzt und bei abfallender Messrichtung verlängert. Bei den geschliffenen Normalen R1 und R2 werden je nach Messeinstellung, das heißt je nach Parameterkombination, sehr gute Rauheitskennwerte im Vergleich zu den Referenzkennwerten erhalten. Dabei sind die Ergebnisse des R2 Normals besser als die des R1 Normals. Die besten Ergebnisse bei beiden Normalen werden für die Messeinstellungen NME 1, 2, 3 und 4 erhalten, mit jeweils kleiner Vorschubgeschwindigkeit $v = 0,1$ mm/s. In Abbildung 24 sind für das R2 Normal bei NME 1 die P-Profile für 0° und 45° bei fallender Messrichtung dargestellt. Eine sehr gute Übereinstimmung der Profile ist erkennbar.

Abbildung 24: Normal R2, Rohprofile 0° und 45° abfallend

Für die Messeinstellungen NME 5 und 6 sind die Ergebnisse für eine abfallende und ansteigende Messrichtung insgesamt am schlechtesten, wobei die ansteigende Messrichtung besser als die abfallende ist. Die Messeinstellungen NME 5 und 6 haben bei unterschiedlichem Profilmittelpunktabstand P die gleiche Parameterkombination, große Vorschubgeschwindigkeit $v = 1$ mm/s und kleine Antastkraft $F_a = 1$ mN. Durch eine

Erhöhung der Antastkraft $F_a = 5 \text{ mN}$ bei den NME 7 und 8, bei gleichbleibenden Profilmittelpunktabständen P und Vorschubgeschwindigkeiten v , zeigen sich wiederum bessere Rauheitskennwerte. Beim Normal R1 sind die Rauheitskennwerte der abfallenden Messrichtung etwas besser, als bei ansteigender Messrichtung, beim Normal R2 sind beide Messrichtung gleich. Bei beiden Normalen ergibt die Auswertung mit der TLS Methode bessere Ergebnisse, als die LS Methode. Die Kennwerte Mr_1 und Mr_2 zeigen bis auf wenige Ausnahmen sehr gute Ergebnisse und sind von den Parameterkombinationen unabhängig. Dies ist damit zu begründen, dass Mr_1 und Mr_2 sich durch eine vertikale Skalierung durch ein zum Beispiel überhöhtes Profil nicht wesentlich ändern.

Bei den gedrehten superfeinen Raunormalen S1, S2, S3 und dem Rk Normal werden je nach Messeinstellung, das heißt je nach Parameterkombination, sehr gute Rauheitskennwerte im Vergleich zu den Referenzkennwerten erhalten. Die Rauheitskennwerte sind bei den superfeinen Normalen S1, S2 und S3 für eine ansteigende Messrichtung besser als für eine abfallende. Jedoch sind die Rauheitskennwerte für beide Messrichtungen bei S1 schlechter im Vergleich zu S2 und S3. Bei dem Rk Normal sind die Ergebnisse beider Messrichtungen gleich. Bei fallender Messrichtung werden bei allen vier Normalen S1, S2, S3 und Rk die schlechtesten Ergebnisse bei den Messeinstellungen NME 5 und 6 erhalten, das heißt bei hoher Vorschubgeschwindigkeit $v = 1 \text{ mm/s}$ und kleiner Antastkraft $F_a = 1 \text{ mN}$. Allerdings werden die Kennwerte durch eine Erhöhung der Antastkraft von $F_a = 5 \text{ mN}$ bei gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit, NME 7 und 8 wieder besser, aber nur bei den Normalen S2, S3 und Rk. Weiter ist die Auswertung mit der TLS Methode besser als mit der LS Methode. Die beiden Materialanteile Mr_1 und Mr_2 zeigen ebenso wie bei den geschliffenen Normalen sehr gute Ergebnisse und sind von den Parameterkombinationen unabhängig.

4.2.2 Technische Oberflächen

Bei den gewählten Normalen wurden für die Messungen für den ersten Überblick mit den Vorschubgeschwindigkeiten $v_{\min} = 0,1 \text{ mm/s}$ und $v_{\max} = 1 \text{ mm/s}$ und den Antastkräften $F_{a\min} = 1 \text{ mN}$ und $F_{a\max} = 5 \text{ mN}$ jeweils ein kleiner und großer Wert und bei den Profilmittelpunktabständen $P_{\min} = 0,5 \mu\text{m}$ und $P_{\max} = 1 \mu\text{m}$ ein mittlerer und großer Wert gewählt, siehe Tabelle 19. Bei den technischen Proben werden die Zwischenwerte $v_2 = 0,5 \text{ mm/s}$, $F_{a2} = 3 \text{ mN}$ und $P_1 = 0,1 \mu\text{m}$ eingefügt, siehe Tabelle 20. Vor allem, da bei technischen Oberflächen die Stochastik der Oberfläche wesentlich größer ist, als bei Normalen, sollte die Erweiterung der Messeinstellungen ein aussagekräftigeres Ergebnis liefern. Die Stichprobenuntersuchung erfolgte durch Messen der Messeinstellungen mit dreimaliger Wiederholung. Ausgewertet werden, wie bei den Normalen, die Oberflächenkennwerte R_a , R_q , R_z , R_k , R_{pk} , R_{vk} , Mr_1 und Mr_2 . Anhand der Ergebnisse können durch die Bewertung der Parameter Messeinstellungen für die Hauptuntersuchungen

eliminiert werden. Weiter kann festgestellt werden, welche Auswertemethode (A, B, C oder D) besser geeignet ist.

Zunächst werden die ausgewählten Rauheitskennwerte R_a , R_q , R_z , R_k , R_{pk} und R_{vk} der Proben 1 bis 9 für jede Messeinstellung TME bei jedem Neigungswinkel $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ und 45° und für jeweils ansteigende und abfallende Messrichtung mit dem Anderson-Darling-Test, dem Jarque-Bera-Test und dem Shapiro-Wilk-Test auf eine Normalverteilung untersucht. Der Anderson-Darling ist ein Anpassungstest, der die Hypothese prüft, ob die Stichprobe mit einer Zufallsvariablen nach einem speziellen Verteilungsmodell übereinstimmt. Dieser Test ist ein modifizierter Kolmogoroff-Smirnoff-Test, der aber eine stärkere Teststärke aufweist, da für kritische Werte spezielle Verteilungsmodelle angenommen werden [Sac06]. Der Jarque-Bera-Test ist ein sehr häufig genutzter Test, der über die Schiefe und Kurtosis der Stichprobe prüft, ob diese normalverteilt ist [Win10].

Der Shapiro-Wilk-Test prüft die Hypothese, ob die Stichprobe mit einer normalverteilten Zufallsvariablen übereinstimmt. Der Test ist für einen kleinen Stichprobenumfang geeignet $3 \leq n \leq 50$ und weist eine starke Teststärke auf. [Die09], [San99]

Alle Proben zeigen sehr ähnliche Ergebnisse. Unabhängig vom Fertigungsverfahren, der Rauheit und des Neigungswinkels α zeigen die drei angewendeten Tests ein eindeutiges Ergebnis. Während der Anderson-Darling-Test bei fast allen Messeinstellungen die Normalverteilung verneinte, zeigten umgekehrt der Jarque-Bera-Test und der Shapiro-Wilk-Test bis auf wenige Messeinstellungen eine Normalverteilung an. Es wird daher bei den Messergebnissen von einer Normalverteilung ausgegangen.

Da eine Normalverteilung vorliegt, kann über eine Varianzanalyse (ANOVA) eine Untersuchung der Messeinstellungen durchgeführt werden, um eine Übereinstimmung zu suchen. Als Bezugsmesseinstellungen sind die Messeinstellungen 2, 10 und 16 gewählt. Diese entsprechen mit dem Profilkpunkt Abstand von $P = 0,5 \mu\text{m}$ und der Antastkraft von $F_a = 1 \text{ mN}$ der Vorgabe der DIN EN ISO 3274 [DIN 3274]. Unterschiedlich sind nur die Vorschubgeschwindigkeiten der Messeinstellungen, bei TME 2 $v = 0,1 \text{ mm/s}$, bei TME 10 $v = 0,5 \text{ mm/s}$ und bei TME 16 $v = 1 \text{ mm/s}$. Es werden alle Messeinstellungen über alle Neigungswinkel α und alle Rauheitskennwerte überprüft. Dabei zeigte sich keine Abhängigkeit vom Neigungswinkel α oder den unterschiedlichen Rauheitskennwerten. In der Tabelle 34 sind die Messeinstellungen der einzelnen Proben vermerkt, die den meisten Unterschied zu der jeweiligen Bezugsmesseinstellung aufweisen. Wenn Messeinstellungen sich nur bis zu fünf Mal von der Bezugsmesseinstellung unterscheiden, wird dies in der Tabelle 34 mit „Keine“, das heißt keinem Unterschied vermerkt.

Tabelle 34: Unterschiede der Messeinstellungen zu den Bezugsmesseinstellungen

TME / Proben	Pr1	Pr2	Pr3	Pr4	Pr5	Pr6	Pr 7,8,9
TME 2	10,19	10,19	10,19	19	10,19	10,19	Keine
TME 10	2,14	Alle	Alle	Keine	Alle	Keine	Keine
TME 16	2	10,19	10,19	19	10,19	2	Keine

Bei den geschliffenen Proben waren die Rauheitskennwerte bei der TME 10 bei den Proben 2, 3 und 5 deutlich größer als die der anderen Messeinstellungen. Die anderen Messeinstellungen waren zudem unter sich sehr ähnlich. Es wird deutlich, dass viele Messeinstellungen ähnliche Ergebnisse liefern. Um keine unnötigen Messungen durchzuführen, wird mit den Ergebnissen aus der Tabelle 34 entschieden für die Hauptuntersuchungen nur noch die Messeinstellungen TME 2, 10, 16 und 19 zu verwenden. Weiter ist festzustellen, dass die Rauheitskennwerte der Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 20^\circ$ sehr ähnlich sind. Daher wird für die Hauptuntersuchungen der Neigungswinkel $\alpha = 20^\circ$ nicht mehr gemessen. Bei der Untersuchung der Kennwerte Mr1 und Mr2 kann die Parameterunabhängigkeit, wie bei den Normalen, aufgrund der Unabhängigkeit der vertikalen Skalierung bestätigt werden. Somit werden diese beiden Kennwerte nicht weiterbetrachtet. Der Vergleich der Auswertemethoden zeigt, dass die Methode A (LS und Spline) und B (LS und IpL), sowie C (TLS und Spline) und D (TLS und IpL) gleiche Ergebnisse liefern. Damit sind die Spline Interpolation und anschließende λ_s Filterung gleich zu dem vorgestellten interpolierenden Gaußfilter. In den Hauptuntersuchen werden demzufolge nur noch die Methoden B und D weitervergleichen.

Messstrecke

Es erfolgt eine Untersuchung der Messstrecken bei ansteigender und abfallender Messrichtung. Die Messstrecken der Auswertemethoden A (LS Methode und Spline) und B (LS Methode und IpL) sind gleich lang, genauso wie die Messstrecken der Auswertemethoden C (TLS Spline) und D (TLS und IpL). Beispielhaft werden daher nur die Methoden B und D für die Messstreckenbetrachtung weiter betrachtet.

An den Proben 8 und 9 konnte auf Grund der starken Steigung und der Tastergeometrie keine Messung für eine ansteigende Messung beim Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ erfolgen. Die Problematik der Steigung und der Tastergeometrie ist in Abbildung 25 dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Taster trotz maximaler Auslenkung nicht den gewählten Messbereich erreicht, ohne dass es beim Taster zu einer Kollision mit dem Werkstück kommt.

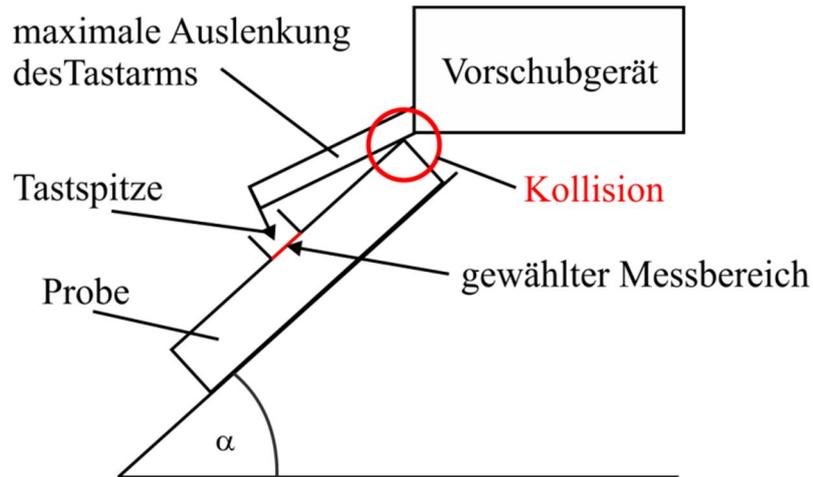


Abbildung 25: Kollision bei zu großem Neigungswinkel α

Es folgt ein Vergleich der Soll-Taststrecken l_t und den Ist-Messstrecken l_m^* für die Auswertemethoden B und D. Diese sind in Tabelle 35 beispielhaft für die Proben 1,2,5,6 und 9 dargestellt. Zudem haben die Proben 3 und 4 die gleiche Soll-Taststrecke wie Probe 2 und die Proben 7 und 8 die gleiche wie Probe 6. In der Tabelle 36 sind die prozentualen Unterschiede zwischen den Soll-Taststrecken l_t und den Ist-Messstrecken l_m^* aufgeführt. Ist-Messstrecken l_m^* , die kleiner als die Soll-Taststrecken l_t sind, werden rot markiert.

Tabelle 35: Soll-Taststrecken l_t und Ist-Messstrecken l_m^* , Proben 1, 2, 5, 6 und 9, beide Messrichtungen, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

	$\frac{l_t}{\text{mm}}$	$\frac{l_m^*}{\text{mm}}$					
		Ansteigend $\alpha=10^\circ$	Abfallend $\alpha=10^\circ$	Ansteigend $\alpha=30^\circ$	Abfallend $\alpha=30^\circ$	Ansteigend $\alpha=45^\circ$	Abfallend $\alpha=45^\circ$
		B / D	B / D	B / D	B / D	B / D	B / D
Pr1	0,56	0,73 / 0,74	0,78 / 0,79	0,62 / 0,70	0,88 / 1,00	0,53 / 0,75	0,89 / 1,26
Pr2	5,6	5,46 / 5,56	6,20 / 6,32	4,76 / 5,44	6,45 / 7,39	4,34 / 6,12	7,07 / 9,94
Pr5	5,6	5,57 / 5,65	5,98 / 6,09	4,87 / 5,53	6,35 / 7,23	4,23 / 5,94	6,99 / 9,88
Pr6	1,75	1,83 / 1,87	2,03 / 2,06	1,65 / 1,87	2,17 / 2,47	1,41 / 1,99	2,32 / 3,31
Pr9	5,6	5,50 / 5,60	6,08 / 6,19	4,76 / 5,41	6,57 / 7,49	x	7,00 / 9,97

Tabelle 36: Soll-Taststrecke l_t , Abweichung von Ist-Messtrecke zu Soll-Taststrecke l_m^*/l_t , Proben 1, 2, 5, 6 und 9, beide Messrichtungen, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

	$\frac{l_t}{\text{mm}}$	$\frac{l_m^*}{l_t} / \%$					
		Ansteigend $\alpha=10^\circ$	Abfallend $\alpha=10^\circ$	Ansteigend $\alpha=30^\circ$	Abfallend $\alpha=30^\circ$	Ansteigend $\alpha=45^\circ$	Abfallend $\alpha=45^\circ$
		B / D	B / D	B / D	B / D	B / D	B / D
Pr1	0,56	130 / 133	139 / 142	110 / 125	156 / 178	95 / 135	159 / 224
Pr2	5,6	98 / 99	111 / 113	85 / 97	115 / 132	78 / 109	126 / 178
Pr5	5,6	99 / 101	107 / 109	87 / 99	113 / 129	76 / 106	125 / 176
Pr6	1,75	105 / 107	116 / 118	94 / 107	124 / 141	81 / 114	133 / 189
Pr9	5,6	98 / 100	109 / 110	85 / 97	117 / 134	x	125 / 178

Bei steigendem Neigungswinkel α wird bei ansteigender Messrichtung die Taststrecke und damit die Messstrecke immer kürzer. Die maximale Verkürzung liegt für die LS Methode bei 24 %. Daher müssen die Taststrecken für die Hauptuntersuchungen erhöht werden. Allerdings ist zu beachten, dass die Verkürzung der Taststrecken beim TLS Verfahren nur bei maximal 3 % liegen.

4.3 Hauptuntersuchungen

Aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchungen an den Normalen und technischen Oberflächen werden für die Hauptuntersuchungen zusammenfassend folgende Änderungen vorgenommen. Es werden nur noch die Kennwerte R_a , R_q , R_z , R_k , R_{pk} , und R_{vk} untersucht. In den Voruntersuchungen wurde gezeigt, dass viele Messeinstellungen sich stark ähneln. Daher werden nur noch die Messeinstellungen verwendet, die sich signifikant voneinander unterscheiden. TME 1,2,3,4,5,6,7,8 und 9 sind sich sehr ähnlich. Es wird weiter mit TME 2 gemessen, da diese Messeinstellung mit $P = 0,5 \mu\text{m}$ und $F_a = 1 \text{ mN}$ der aktuellen Rauheitsnorm DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] entspricht. TME 11, 12, 13, 14,15 sind ähnlich zu TME 10 und TME 16, wobei die beiden Messeinstellungen sich deutlich unterscheiden. TME 10 und TME 16 werden, wie TME 2, aufgrund der Parameter $P = 0,5 \mu\text{m}$ und $F_a = 1 \text{ mN}$ gewählt. Die letzten TME 17, 18, 20 und 21 zeigten gemischt Übereinstimmungen zu TME 16 und TME 19, wobei die beiden Messeinstellungen TME 16 und 19 sich deutlich unterscheiden. Somit wird ebenso mit TME 19 gemessen. Es ergeben sich die folgenden Messeinstellungen (ME) für die Hauptuntersuchungen, die in Tabelle 37 aufgeführt sind. Dabei sind die Bezeichnungen der Voruntersuchungen in Klammern vermerkt.

Tabelle 37: Messeinstellungsübersicht (ME) für die Hauptuntersuchungen

	P0,5	P1
v0,1 und Fa1	ME 1 (TME 2)	
v0,5 und Fa1	ME 2 (TME 10)	
v1 und Fa1	ME 3 (TME 16)	
v1 und Fa3		ME 4 (TME 19)

Des Weiteren waren die Ergebnisse der Voruntersuchungen bei den Neigungswinkeln $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 20^\circ$ sehr ähnlich, weswegen bei den Hauptuntersuchungen die Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ$ und 45° , jeweils mit ansteigender und abfallender Messrichtung untersucht werden. Die Auswertung der Voruntersuchungen hat weiter gezeigt, dass Methode A und B identische Ergebnisse aufzeigten, genauso wie die Methode C und D. In Anbetracht dessen werden die Hauptuntersuchungen nur mit den Methoden B und D ausgewertet. Es zeigte sich weiter sehr deutlich, dass bei steigender Messrichtung eine größere Taststrecke l_t gewählt werden muss, um die Rauheitskennwerte normgerecht auswerten zu können. Es werden für die gesamten Hauptversuche längere Taststrecken l_{tneu} gewählt. Eine längere Messstrecke l_m ist für die Auswertung unproblematisch, da sie bei der Auswertung abgeschnitten werden kann. In Tabelle 38 sind die neuen Taststrecken l_{tneu} für die jeweiligen Proben eingetragen.

Tabelle 38: Neue Messstreckenwahl für die Hauptuntersuchungen

Probe	l_t / mm	l_{tneu} / mm
1	0,56	0,62
2-5,9	5,6	7,2*
6,7,8	1,75	2,2

*Die neue Messstrecke l_{tneu} wird für den Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ bei ansteigender Messrichtung auf 8 mm erhöht.

Bei den Untersuchungen werden auf allen Proben 12 unabhängige Messstrecken gemessen. Die Referenz sind 24 unabhängige Messstrecken bei einem Neigungswinkel $\alpha = 0^\circ$, die mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 0,5$ mm/s, einer Antastkraft von $F_a = 1$ mN und einem Profilpunktastand von $P = 0,5$ μ m gemessen wurden und bereits als Referenz für die Voruntersuchungen genutzt wurden. Für die Auswertung ergeben sich durch die Messrichtung und Auswertemethoden neue Abkürzungen, die in Tabelle 39 aufgeführt sind.

Tabelle 39: Abkürzung abhängig von Messrichtung und Auswertemethode

Messrichtung	Methode	Abkürzung
Ansteigend (S)	Least squares Methode (LS) mit interpolierendem Gaußfilter (IpL) (Methode B)	SB
Ansteigend (S)	Total least squares Methode (TLS) mit interpolierendem Gaußfilter (IpL) (Methode D)	SD
Abfallend (F)	Least squares Methode (LS) mit Interpolierendem Gaußfilter (IpL) (Methode B)	FB
Abfallend (F)	Total least squares Methode (TLS) mit Interpolierendem Gaußfilter (IpL) (Methode D)	FD

Es folgt zunächst eine Überprüfung auf Normalverteilung. Die ausgewählten Rauheitskennwerte R_a , R_q , R_z , R_k , R_{pk} und R_{vk} der Proben 1 bis 9 werden für jede Messeinstellung ME bei jedem Neigungswinkeln $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ$ und 45° und für jeweils ansteigende und abfallende Messrichtung mit dem Anderson-Darling-Test, dem Jarque-Bera-Test und dem Shapiro-Wilk-Test auf eine Normalverteilung untersucht.. Das Ergebnis bestätigt das Ergebnis aus den Voruntersuchungen. Alle Proben zeigen sehr ähnliche Ergebnisse, unabhängig vom Fertigungsverfahren, der Rauheit und des Neigungswinkels α . Wieder verneinte der Anderson-Darling-Test fast bei allen Messeinstellungen die Normalverteilung, während der Jarque-Bera-Test und der Shapiro-Wilk-Test häufig eine Normalverteilung bestätigten. Es wird daher bei den Messergebnissen der Hauptuntersuchungen von einer Normalverteilung ausgegangen.

Da eine Normalverteilung angenommen wird, kann für die statistische Analyse der Ergebnisse die 16 %-Regel angewendet werden. Die 16 %-Regel ist nach der DIN EN ISO 4288 [DIN 4288] eine Anforderung, die für eine Normalverteilung für die Festlegung des oberen Grenzwertes angenommen werden kann, um eine Oberfläche als annehmbar zu betrachten [DIN 4288]. Der Erwartungswert und die Standardabweichung legen den Grenzwert fest. Überschreiten nicht mehr als 16 % der gemessenen Werte den Grenzwert, so gilt die Oberfläche als annehmbar. Allerdings wird diese Regel nicht immer angewendet, in der VDA 2006 [VDA 06] ist die 16 %-Regel zum Beispiel nicht zulässig. Festzuhalten ist, dass die 16 %-Regel eine sehr gute und praktikable Prüfmöglichkeit ist, die sich bewährt hat und nicht zu großem Ausschuss von Werkstücken führt. In der neuen ISO Norm, ISO/TC 213/WG 16 für die Rauheitsmesstechnik wird die 16 %-Regel wegfallen und die Höchstwert-Regel angewendet. Dabei darf kein gemessener Wert den festgelegten Wert überschreiten. Der Wegfall der 16 %-Regel ist kritisch zu betrachten. Ein vollkommen funktionsfähiges Bauteil kann aufgrund eines Artefaktes ausgesondert werden. Die 16 %-Regel erlaubt dagegen bei Werkstücken sogar zum Beispiel 25 Messungen mit bis zu vier, den festgelegten Wert überschreitenden Werten [DIN 4288].

Da aufgrund von nur zwölf Wiederholmessungen eine aussagekräftige Standardabweichung nicht zu erwarten ist, wird für die Auswertung eine modifizierte 16 %-Regel angewendet. Es wird untersucht, ob die Rauheitskennwerte beim jeweiligen Neigungswinkel α , der Messrichtung und der Messeinstellung innerhalb von $\pm 16\%$ zu der Referenz liegen. Das heißt 16 % werden als direktes Toleranzmaß verwendet. Die Referenz ist der Rauheitskennwert, der bei dem Neigungswinkel $\alpha = 0^\circ$, der Vorschubgeschwindigkeit $v = 0,5$ mm/s, dem Profilkpunktastand $P = 0,5$ μm und der Antastkraft $F_a = 1$ mN mit zwölf Wiederholmessungen gemessen wurde. Dies ist die Parameterkombination der Messeinstellung ME 2.

4.3.1 Ergebnisse der Hauptuntersuchungen

Es folgen die Ergebnisse der Hauptuntersuchungen der technischen Oberflächen. Zunächst folgt ein Vergleich der LS und TLS Methode. Dabei zeigen die Kennwerte aller Proben, ob geschliffen oder gedreht, für jede Messrichtung, für alle Neigungswinkel α und für alle Parameterkombinationen folgendes Ergebnis: die Kennwerte der LS Methode sind im Vergleich zu TLS Methode immer erhöht. Dies ist durch die Unterschiede der Methoden bei der Ausgleichsrechnung begründbar. In Abbildung 26 sind beide Methoden ausgehend von einem Messpunkt eingezeichnet.

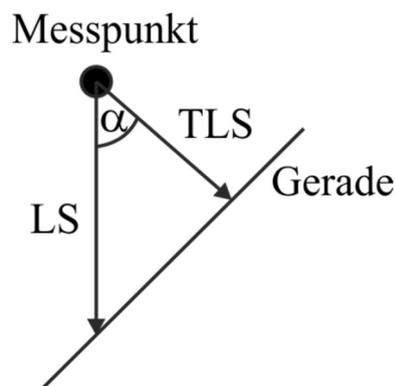


Abbildung 26: LS und TLS Methode

Bei beiden Methoden wird die Summe der quadrierten Abstände zu der Geraden minimiert. Allerdings werden bei der LS Methode die vertikalen Abstände und bei der TLS Methode die orthogonalen Abstände verwendet. Damit ergibt sich eine Erhöhung der Profilhöhe der LS Methode über:

$$\text{Profilhöhe LS} = \frac{\text{Profilhöhe TLS}}{\cos \alpha}. \quad (27)$$

Die Überhöhung der Profilhöhe nimmt mit ansteigendem Neigungswinkel α zu. Weiter wird untersucht, ob eine ansteigende oder abfallende Messrichtung bessere Rauheitskennwerte erzielen.

Geschliffene Proben

Für die geschliffene Probe 2 mit kleiner Rauheit, $R_z = 3 \mu\text{m}$ sind in Abbildung 27, Tabelle 28 und Abbildung 29 die Rauheitskennwerte R_a , R_z und R_k für die Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ dargestellt. Abweichungen sind aufgrund der Übersichtlichkeit nicht in den Abbildungen eingetragen. Diese sind aus den folgenden Tabellen und den Tabellen im Anhang B zu entnehmen.

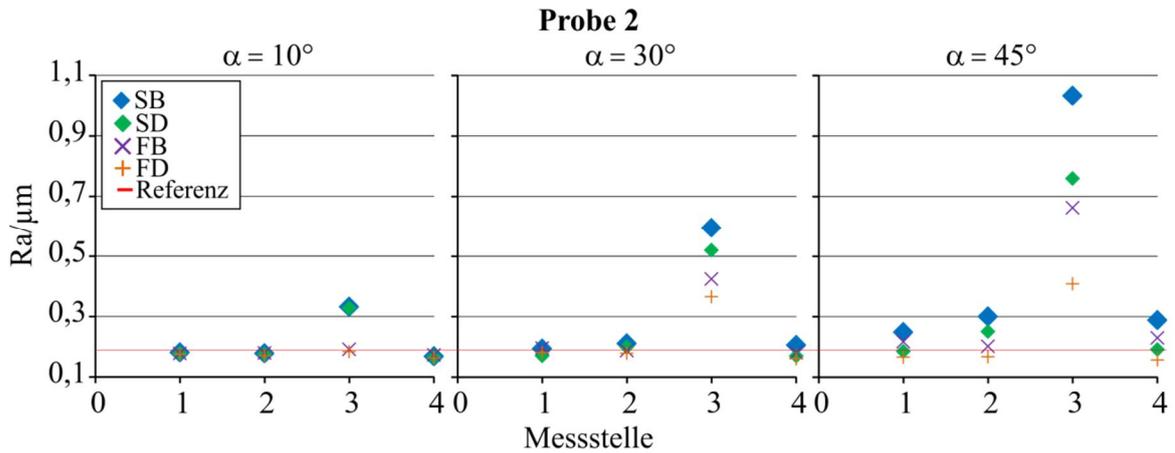


Abbildung 27: Probe 2, R_a für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

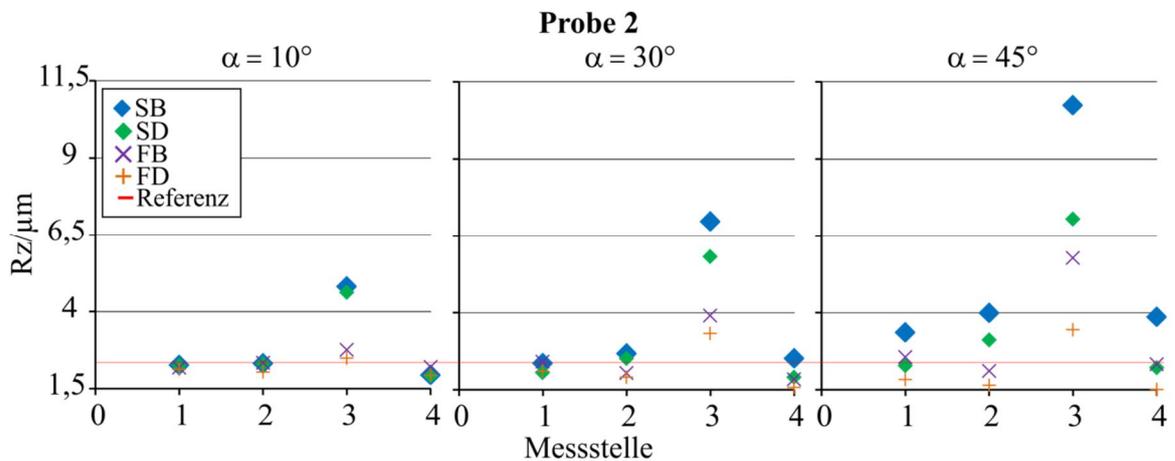


Abbildung 28: Probe 2, R_z für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

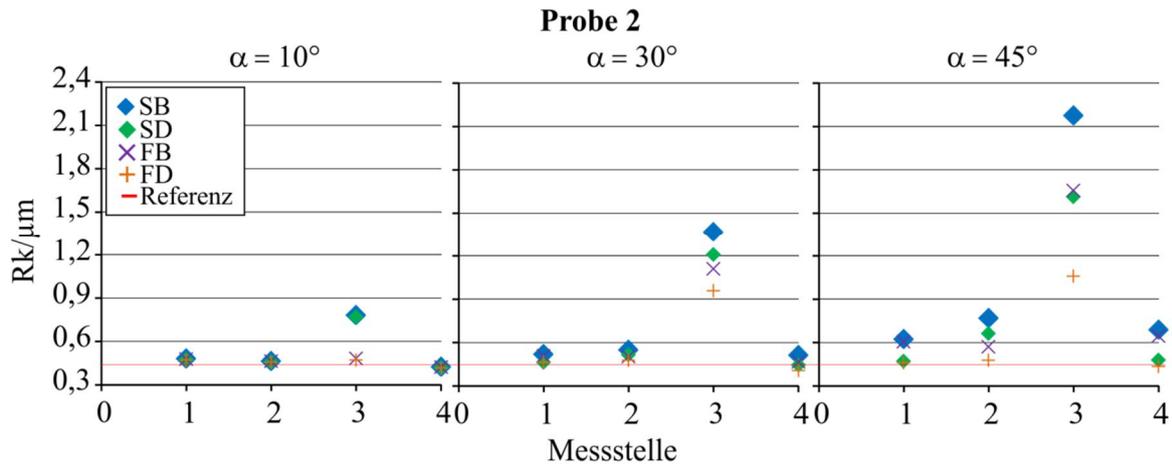


Abbildung 29: Probe 2, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

Die Rauheitskennwerte R_a , R_z und R_k verhalten sich für die Probe 2 sehr ähnlich. Zu erkennen ist die Überhöhung der Kennwerte der LS Methode gegenüber den Kennwerten der TLS Methode und die größer werdende Überhöhung mit ansteigendem Neigungswinkel α . Die Kennwerte der TLS Methode liegen für beide Messrichtungen näher an den Referenzkennwerten. Bei den ME 2, 3 und 4 sind die Kennwerte für die abfallende Messrichtung überwiegend besser als für eine ansteigende, während sie bei der ME 1 nahezu gleich sind. Auffällig ist die ME 3 mit $F_a = 1$ mN, $P = 0,5$ μm und $v = 1$ mm/s. Bei allen drei Rauheitskennwerten sind die Werte bei der ME 3 deutlich größer. Zwischen der ME 3 und 2 bestand der Unterschied nur in der Vorschubgeschwindigkeit, diese betrug bei ME 2 $v = 0,5$ mm/s. Daher ist festzustellen, dass bei einem größer werdendem Neigungswinkel α die Vorschubgeschwindigkeit eine wichtige Rolle spielt. Zu beachten ist die ME 4, die ebenso die Vorschubgeschwindigkeit der ME 3 hatte, aber dessen Antastkraft $F_a = 3$ mN und der Profilmittelpunkt $P = 1$ μm betragen. Die Rauheitskennwerte der ME 4 sind deutlich besser und die Werte entsprechen eher den ME 1 und 2. Eine Erhöhung der Antastkraft F_a ist somit bei ansteigendem Winkel α hilfreich. In Tabelle 40 sind die Referenzkennwerte der Probe 2 und in Tabelle 41, Tabelle 42, Tabelle 43 und Tabelle 44 jeweils die Kennwerte für $\alpha = 45^\circ$ für die Methoden B und D für jeweils ansteigende und abfallende Messrichtung aufgeführt. Dabei sind Kennwerte, die innerhalb $\pm 16\%$ zu den Referenzkennwerten liegen, grün hinterlegt.

Tabelle 40: Referenzkennwerte der Probe 2

Referenzkennwerte Probe 2					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
0,19 ± 0,08	0,32 ± 0,21	2,34 ± 1,17	0,44 ± 0,03	0,21 ± 0,03	0,65 ± 0,54

Tabelle 41: Probe 2, Methode B, $\alpha = 45^\circ$ ansteigend

Methode B, $\alpha = 45^\circ$ ansteigend			
ME	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm
1	0,248 ± 0,042	0,393 ± 0,094	3,352 ± 0,842
2	0,300 ± 0,064	0,457 ± 0,110	3,983 ± 1,072
3	1,033 ± 0,103	1,490 ± 0,157	10,732 ± 1,532
4	0,288 ± 0,028	0,469 ± 0,074	3,860 ± 0,627
ME	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
1	0,623 ± 0,089	0,308 ± 0,058	0,772 ± 0,245
2	0,769 ± 0,162	0,561 ± 0,131	0,824 ± 0,296
3	2,174 ± 0,365	3,053 ± 0,365	1,117 ± 0,329
4	0,688 ± 0,047	0,429 ± 0,081	0,951 ± 0,221

Tabelle 42: Probe 2, Methode D, $\alpha = 45^\circ$ ansteigend

Methode D, $\alpha = 45^\circ$ ansteigend			
ME	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm
1	0,19 ± 0,02	0,29 ± 0,06	2,27 ± 0,39
2	0,25 ± 0,02	0,37 ± 0,06	3,12 ± 0,47
3	0,76 ± 0,08	1,11 ± 0,13	7,06 ± 0,97
4	0,19 ± 0,03	0,30 ± 0,07	2,21 ± 0,38
ME	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
1	0,47 ± 0,03	0,24 ± 0,02	0,55 ± 0,19
2	0,66 ± 0,06	0,49 ± 0,08	0,60 ± 0,25
3	1,61 ± 0,32	2,26 ± 0,32	0,82 ± 0,36
4	0,48 ± 0,04	0,29 ± 0,05	0,57 ± 0,24

Tabelle 43: Probe 2, Methode B, $\alpha = 45^\circ$ abfallend

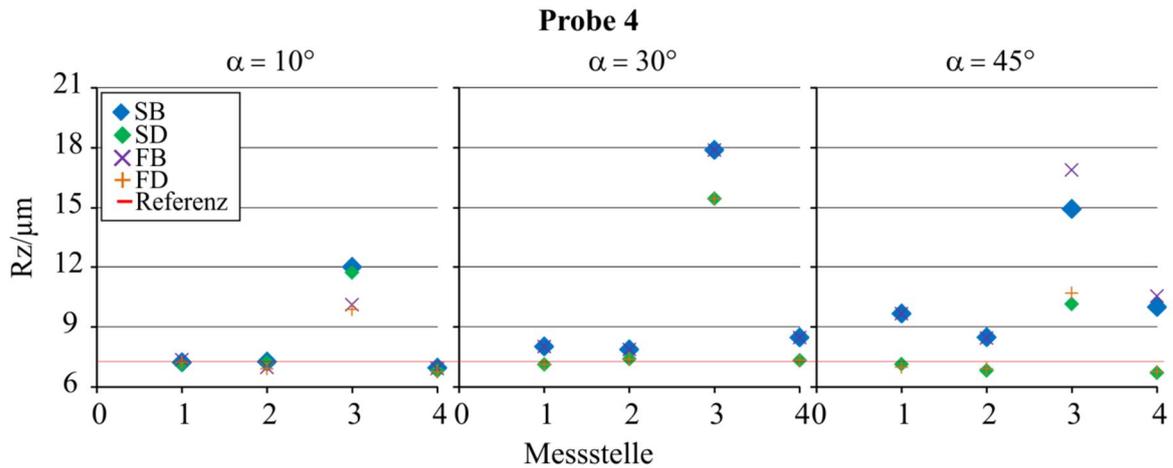
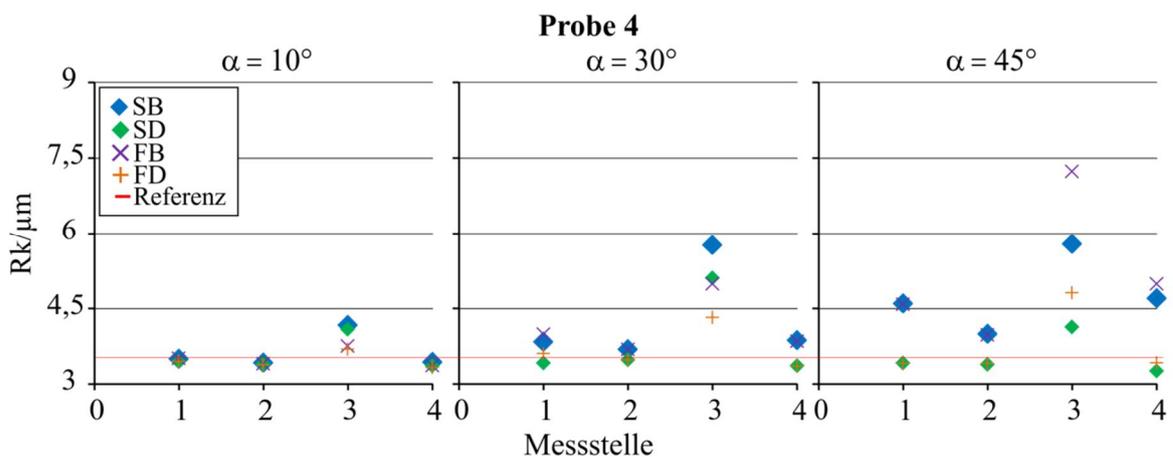
Methode B, $\alpha = 45^\circ$ abfallend			
ME	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm
1	0,22 \pm 0,04	0,31 \pm 0,07	2,56 \pm 0,64
2	0,20 \pm 0,03	0,28 \pm 0,04	2,10 \pm 0,44
3	0,66 \pm 0,04	0,91 \pm 0,05	5,78 \pm 0,47
4	0,23 \pm 0,02	0,32 \pm 0,02	2,32 \pm 0,22
Methode B, $\alpha = 45^\circ$ abfallend			
ME	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
1	0,61 \pm 0,11	0,29 \pm 0,05	0,54 \pm 0,19
2	0,57 \pm 0,10	0,32 \pm 0,08	0,45 \pm 0,09
3	1,66 \pm 0,12	1,69 \pm 0,12	0,57 \pm 0,09
4	0,64 \pm 0,06	0,37 \pm 0,06	0,51 \pm 0,07

Tabelle 44: Probe 2, Methode D, $\alpha = 45^\circ$ abfallend

Methode D, $\alpha = 45^\circ$ abfallend			
ME	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm
1	0,17 \pm 0,02	0,24 \pm 0,04	1,83 \pm 0,37
2	0,17 \pm 0,01	0,23 \pm 0,02	1,64 \pm 0,19
3	0,41 \pm 0,04	0,56 \pm 0,05	3,45 \pm 0,33
4	0,16 \pm 0,02	0,23 \pm 0,04	1,50 \pm 0,33
Methode D, $\alpha = 45^\circ$ abfallend			
ME	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
1	0,46 \pm 0,04	0,22 \pm 0,03	0,41 \pm 0,14
2	0,48 \pm 0,03	0,26 \pm 0,03	0,36 \pm 0,09
3	1,06 \pm 0,12	1,03 \pm 0,12	0,36 \pm 0,06
4	0,44 \pm 0,04	0,26 \pm 0,05	0,35 \pm 0,12

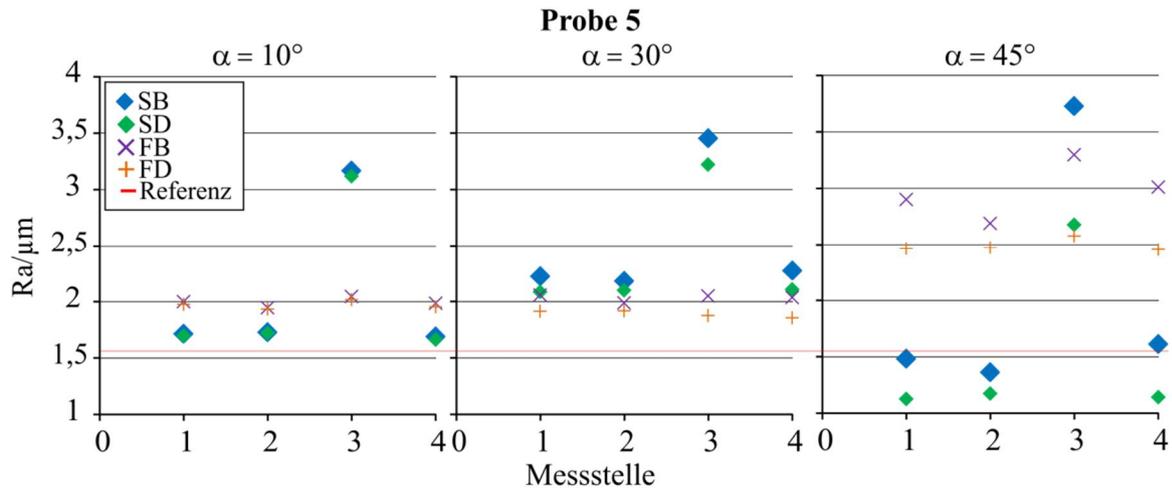
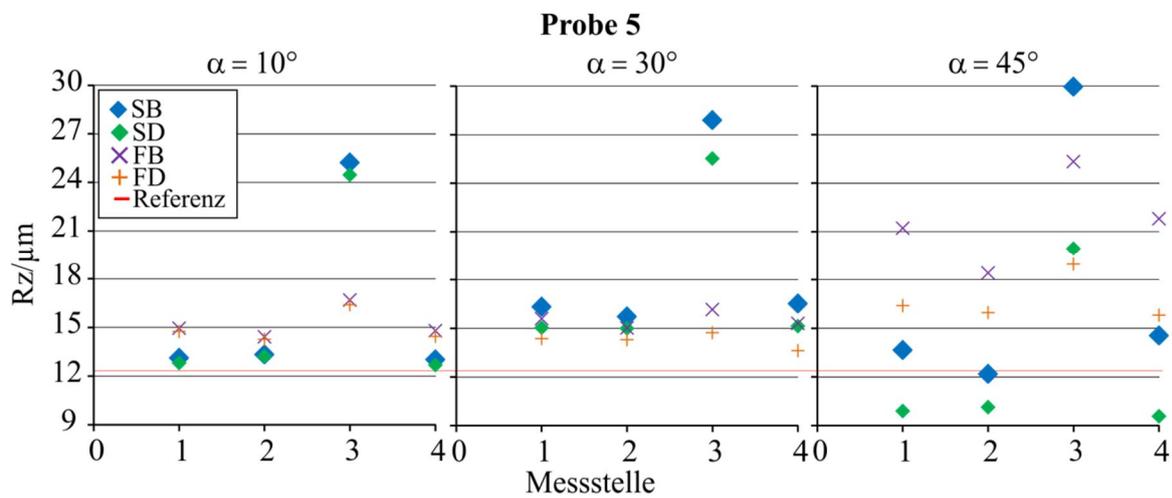
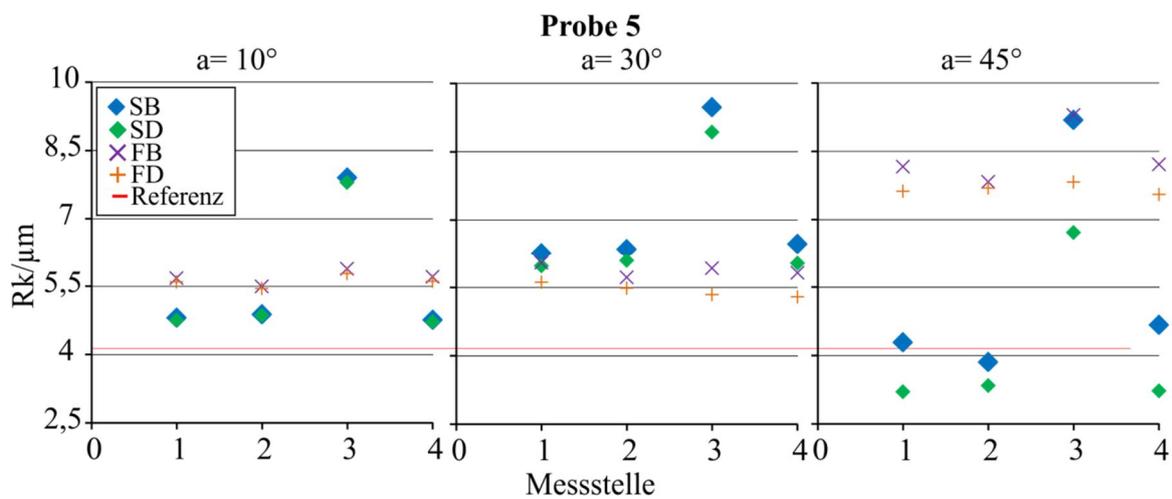
Bei ansteigender Messrichtung ist eine sehr gute Übereinstimmung der Kennwerte der TLS Methode mit den Referenzwerten zu erkennen. Bei fallender Messrichtung sind die Kennwerte etwas kleiner als bei ansteigender Messrichtung, weshalb sie teilweise nicht mehr in der Toleranz liegen. Dies ist auf die Stochastik der Oberfläche rückzuführen. Probe 1 verhält sich sehr ähnlich zu Probe 2. Allerdings sind Kennwerte der ME 3 nicht größer als die anderen ME.

Probe 3 weist ähnliche Ergebnisse wie Probe 4 auf, es folgt daher beispielhaft die geschliffene Probe 4. In der Abbildung 30 und Abbildung 31 sind die Rauheitskennwerte Rz und Rk aufgetragen. Abweichungen sind aufgrund der Übersichtlichkeit nicht in den Abbildungen eingetragen. Diese sind aus den folgenden Tabellen und den Tabellen im Anhang B zu entnehmen.

Abbildung 30: Probe 4, Rz für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ Abbildung 31: Probe 4, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

Die Rauheitskennwerte Rz und Rk verhalten sich, wie bei Probe 2 sehr ähnlich. Zu erkennen ist die Überhöhung der Kennwerte der LS Methode gegenüber den Kennwerten der TLS Methode und die größer werdende Überhöhung mit ansteigendem Neigungswinkel α . Die Kennwerte der TLS Methode liegen für beide Messrichtungen näher an den Referenzkennwerten. Die Kennwerte sind für ansteigende und abfallende Messrichtung überwiegend gleich. Wie bei Probe 2 sind die Kennwerte bei ME 3 größer.

Bei der rausten geschliffenen Probe 5 mit $Rz = 10 \mu\text{m}$ sind in Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34 die Rauheitskennwerte Ra, Rz und Rk aufgetragen. Abweichungen sind aufgrund der Übersichtlichkeit nicht in den Abbildungen eingetragen. Diese sind aus den folgenden Tabellen und den Tabellen im Anhang B zu entnehmen.

Abbildung 32: Probe 5, Ra für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ Abbildung 33: Probe 5, Rz für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ Abbildung 34: Probe 5, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

Die Überhöhung der Kennwerte der LS Methode gegenüber den Kennwerten der TLS Methode und die größer werdende Überhöhung mit ansteigendem Neigungswinkel α ist wieder sehr gut zu erkennen. Wie bei den Proben 2, 3 und 4 sind die Kennwerte der ME 3 im Vergleich zu den anderen Messeinstellungen größer. Die Kennwerte sind nicht eindeutig für eine ansteigende oder abfallende Messrichtung besser. Zu beobachten ist, dass die Kennwerte, anders als bei den Proben 2, 3 und 4, bereits ab einem Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ deutlich größer als die Referenz sind. Weiter liegen die Kennwerte der TLS Methode für $\alpha = 10^\circ$ und 30° für beide Messrichtungen näher an den Referenzkennwerten. Allerdings ist dies anders bei $\alpha = 45^\circ$. Die Kennwerte sind dabei, bis auf ME 3, für die steigende Messrichtung kleiner und für eine abfallende Messrichtung größer als die Referenz. Die Ursache kann die raue Oberfläche der Probe sein, so dass bei ansteigender Messrichtung für einen großen Neigungswinkel α das Profil flacher wiedergegeben wird, als es ist. Allerdings müsste dieser Effekt ebenso bei abfallender Messrichtung auftreten.

Zusammenfassend ist für die geschliffenen Proben festzustellen, dass die TLS Methode selbst für einen Neigungswinkel von $\alpha = 45^\circ$ sehr gute Rauheitswerte im Vergleich zu der Referenz liefert. Allerdings sind die Resultate abhängig von den eingestellten Messparametern, da eine große Vorschubgeschwindigkeit v bei kleiner Antastkraft F_a keine guten Rauheitskennwerte aufzeigen.

Gedrehte Proben

In Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37 sind für die Probe 6, $R_z = 1 \mu\text{m}$, R_a , R_z und R_k dargestellt. Abweichungen sind aufgrund der Übersichtlichkeit nicht in den Abbildungen eingetragen. Diese sind aus den folgenden Tabellen und den Tabellen im Anhang B zu entnehmen.

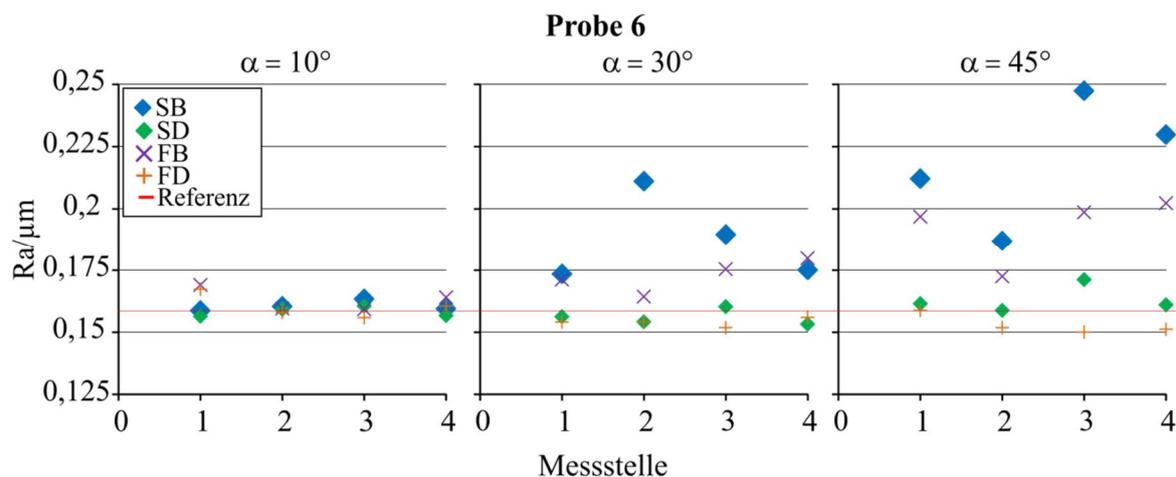
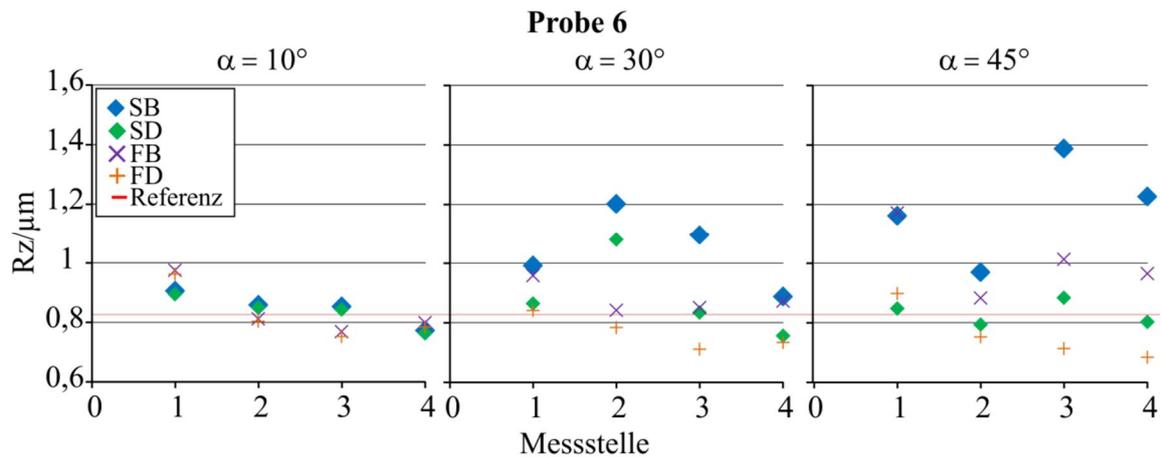
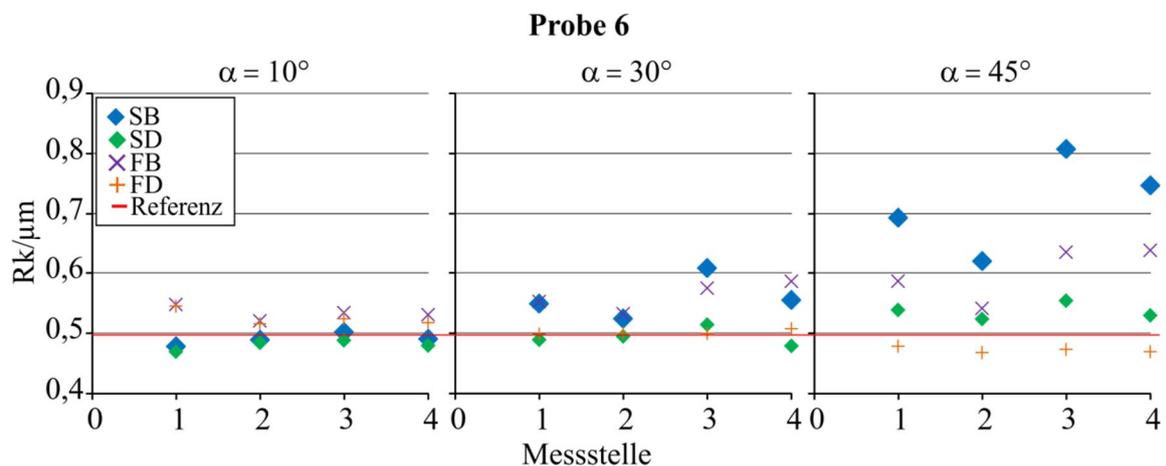


Abbildung 35: Probe 6, R_a für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

Abbildung 36: Probe 6, Rz für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ Abbildung 37: Probe 6, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

Zu erkennen ist die Überhöhung der Kennwerte der LS Methode gegenüber den Kennwerten der TLS Methode und die größer werdende Überhöhung mit ansteigendem Neigungswinkel α . Die Kennwerte der TLS Methode liegen für beide Messrichtungen näher an den Referenzkennwerten. Überwiegend zeigen alle drei Kennwerte für alle ME für eine ansteigende Messrichtung mit TLS Methode das bessere Ergebnis im Vergleich zu den Referenzwerten. Es werden bei einem großen Neigungswinkel α sehr gute Kennwerte mit der TLS Methode erzielt. Die Probe 7 zeigt ein ähnliches Ergebnis wie Probe 6 und Probe 8 ein ähnliches Ergebnis wie Probe 9. Es werden weiter nur die Ergebnisse der Probe 9 diskutiert. In Abbildung 38, Abbildung 39 und Abbildung 40 sind R_a , R_z und R_k für die gedrehte Probe 9, $R_z = 9 \mu\text{m}$, dargestellt. Abweichungen sind aufgrund der Übersichtlichkeit nicht in den Abbildungen eingetragen. Diese sind aus den folgenden Tabellen und den Tabellen im Anhang B zu entnehmen.

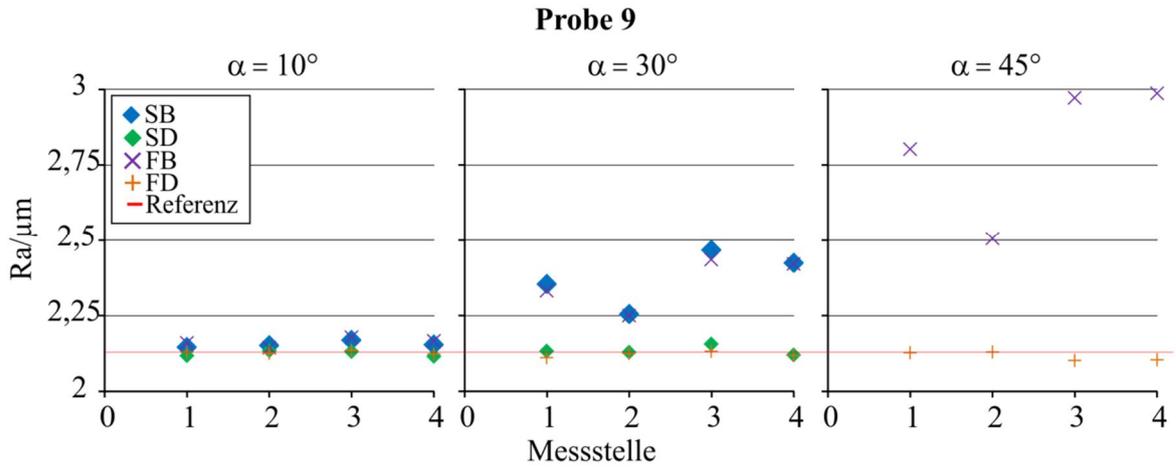


Abbildung 38: Probe 9, Ra für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

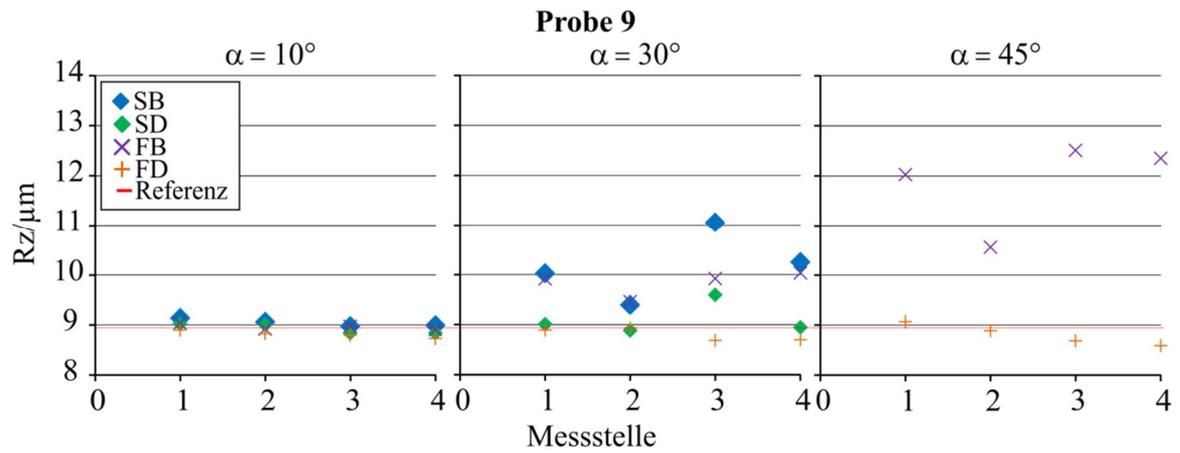


Abbildung 39: Probe 9, Rz für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

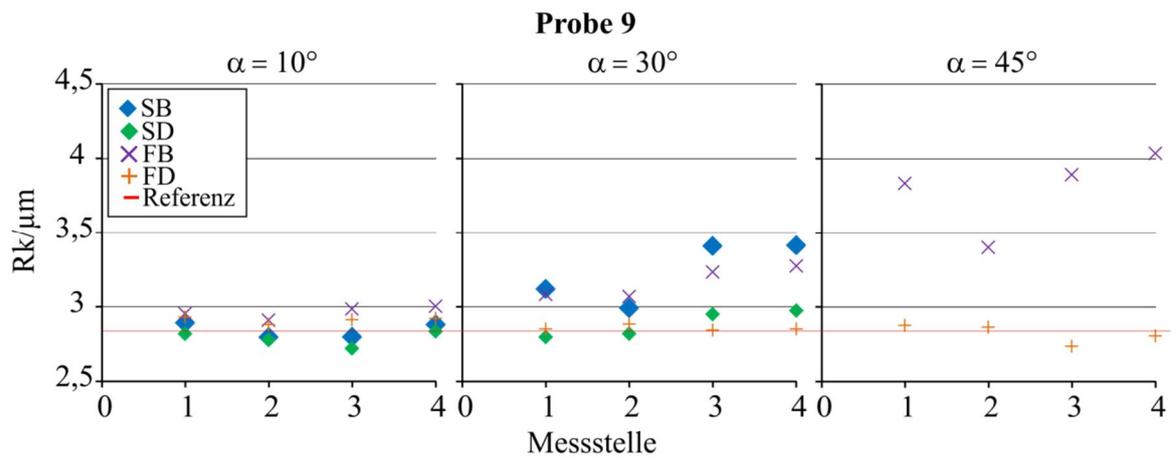


Abbildung 40: Probe 9, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

Aufgrund der erwähnten Geometrie des Tasters konnte keine ansteigende Messung bei $\alpha = 45^\circ$ erfolgen. Diese Messergebnisse fehlen in den Abbildungen. Wieder ist die Überhöhung der Kennwerte der LS Methode gegenüber der TLS Methode deutlich zu erkennen. Die TLS Methode zeigt die besseren Ergebnisse im Vergleich zu der Referenz. Für beide Messrichtungen werden ähnliche Ergebnisse erhalten und auch bei $\alpha = 45^\circ$ stimmen die Kennwerte sehr gut mit der Referenz überein. In Tabelle 45 sind die Referenzkennwerte der Probe 9 aufgeführt und in Tabelle 46 und Tabelle 47 jeweils die Kennwerte für $\alpha = 45^\circ$ für die Methoden B und D für eine abfallende Messrichtung. Dabei sind Kennwerte, die innerhalb $\pm 16\%$ der Referenzkennwerte liegen, grün hinterlegt.

Tabelle 45: Referenzkennwerte der Probe 9

Referenzkennwerte Probe 9					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
$2,13 \pm 0,02$	$2,50 \pm 0,02$	$8,95 \pm 0,17$	$2,84 \pm 0,14$	$5,39 \pm 0,09$	$0,55 \pm 0,15$

Tabelle 46: Probe 9, Methode B, $\alpha = 45^\circ$ abfallend

Methode B, $\alpha = 45^\circ$ abfallend			
ME	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm
1	$2,80 \pm 0,39$	$3,29 \pm 0,46$	$12,03 \pm 1,74$
2	$2,51 \pm 0,44$	$2,94 \pm 0,51$	$10,55 \pm 1,93$
3	$2,97 \pm 0,01$	$3,50 \pm 0,02$	$12,51 \pm 0,17$
4	$2,99 \pm 0,02$	$3,51 \pm 0,01$	$12,35 \pm 0,19$
ME	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
1	$3,83 \pm 0,57$	$7,04 \pm 0,97$	$0,76 \pm 0,19$
2	$3,40 \pm 0,57$	$6,34 \pm 1,12$	$0,70 \pm 0,24$
3	$3,89 \pm 0,08$	$7,66 \pm 0,08$	$0,67 \pm 0,13$
4	$4,04 \pm 0,13$	$7,59 \pm 0,06$	$0,66 \pm 0,18$

Tabelle 47: Probe 9, Methode D, $\alpha = 45^\circ$ abfallend

Methode D, $\alpha = 45^\circ$ abfallend			
ME	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm
1	2,127 \pm 0,021	2,498 \pm 0,022	9,067 \pm 0,151
2	2,129 \pm 0,017	2,500 \pm 0,020	8,887 \pm 0,174
3	2,102 \pm 0,008	2,474 \pm 0,009	8,685 \pm 0,129
4	2,104 \pm 0,015	2,476 \pm 0,015	8,590 \pm 0,139
ME	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
1	2,877 \pm 0,082	5,365 \pm 0,078	0,614 \pm 0,151
2	2,865 \pm 0,121	5,410 \pm 0,056	0,549 \pm 0,161
3	2,737 \pm 0,045	5,425 \pm 0,045	0,480 \pm 0,092
4	2,805 \pm 0,092	5,361 \pm 0,055	0,462 \pm 0,217

Bei abfallender Messrichtung gibt es bei der LS Methode keinen Kennwert der innerhalb von 16 % zu den Referenzkennwerten liegt, während bei der TLS Methode alle Kennwerte innerhalb von 16 % liegen.

Zusammenfassend ist für die gedrehten Proben, Proben 6 – 9, festzustellen, dass die TLS Methode selbst für einen Neigungswinkel von $\alpha = 45^\circ$ sehr gute Rauheitswerte für beide Messrichtungen im Vergleich zu der Referenz liefert. Allerdings sind die Resultate von den Parametereinstellung abhängig.

4.3.2 Profile

In den Profilen ist der Unterschied der verwendeten Methoden LS und TLS sehr gut zu erkennen. In Abbildung 41 sind die LS und TLS Rohprofile für die Probe 2 bei $\alpha = 5^\circ$ ansteigend dargestellt.

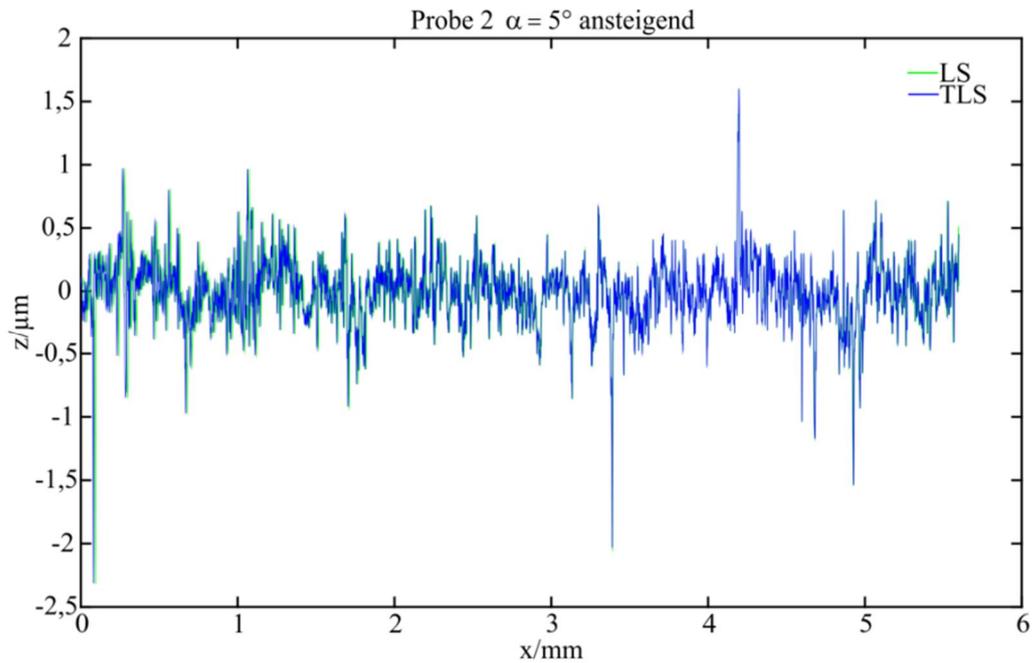


Abbildung 41: Rohprofile Probe 2 bei $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

Auf den ersten Blick sieht es aus, als ob die beiden Rohprofile identisch sind. Für einen besseren Überblick ist in Abbildung 42 ein Ausschnitt der Rohprofile dargestellt.

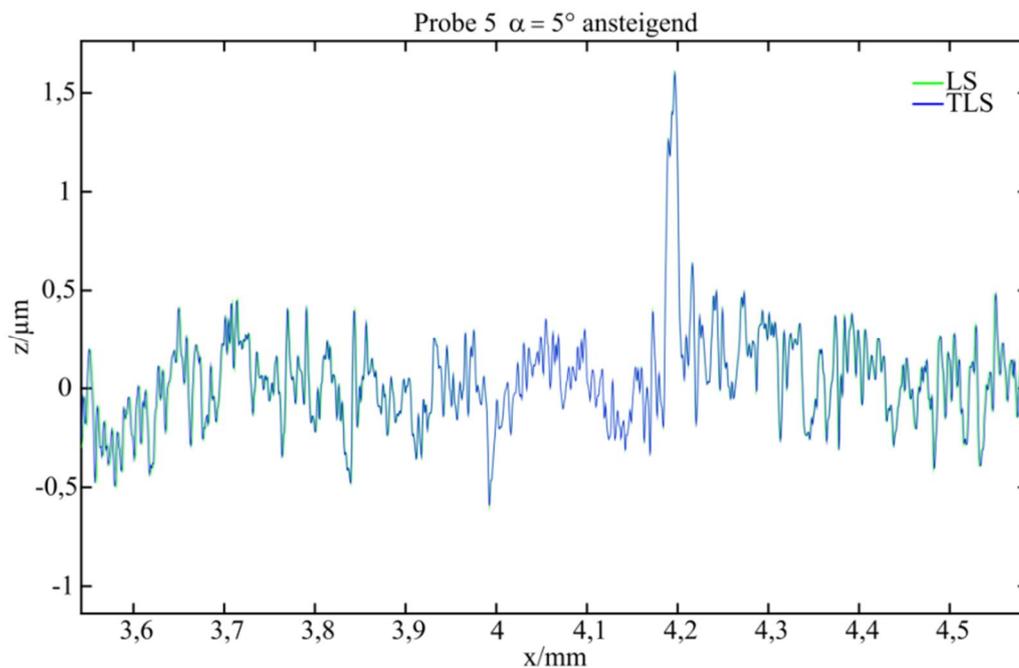


Abbildung 42: Ausschnitt der Rohprofile Probe 2 bei $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

Dabei ist zu erkennen, dass zunächst das LS Profil dem TLS Profil minimal vorausleitet. Im Bereich $x = 3,9$ mm und $x = 4,2$ mm sind beide gleich und liegen übereinander. Danach eilt das TLS Profil dem LS Profil voraus. Damit ist das TLS Profil länger als das LS Profil. Dieser Effekt wird mit größerem Winkel α immer stärker, dargestellt in der Abbildung 43 für $\alpha = 30^\circ$ ansteigend und in Abbildung 44 für $\alpha = 45^\circ$ abfallend.

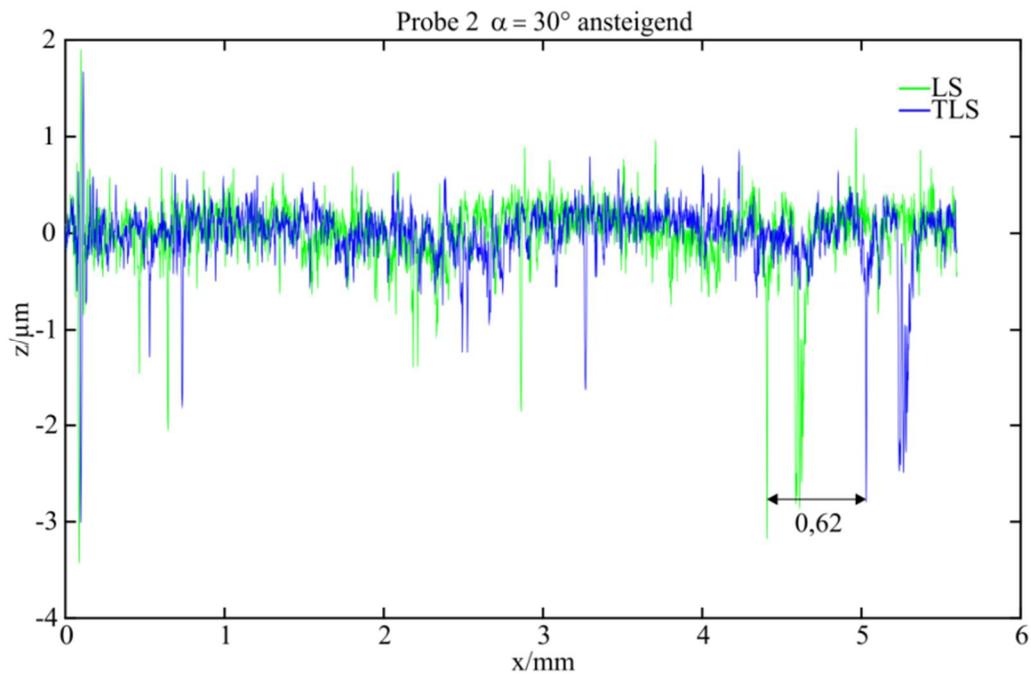


Abbildung 43: Rohprofile Probe 2 bei $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

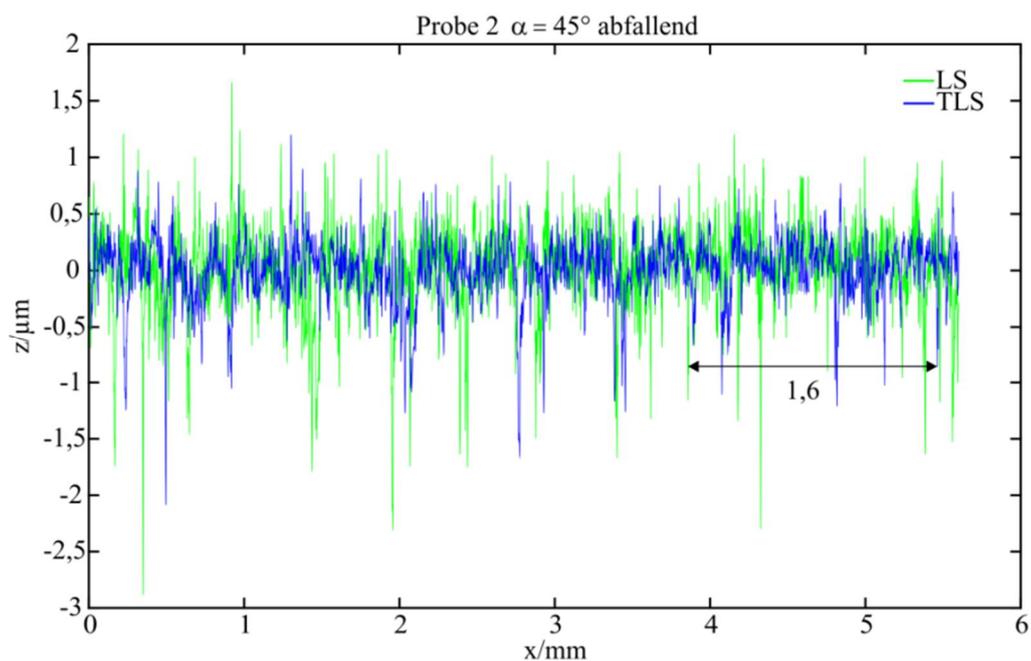


Abbildung 44: Rohprofile Probe 2 bei $\alpha = 45^\circ$ abfallend

Bei einem Winkel von $\alpha = 30^\circ$ bei ansteigender Messrichtung ist das TLS Profile um $x = 0,62$ mm länger als das LS Profil, ebenso bei $\alpha = 30^\circ$ bei abfallend Messrichtung. Bei einem Neigungswinkel von $\alpha = 45^\circ$ ist die Streckung des TLS Profils für eine abfallende Messrichtung mit $x = 1,6$ mm stärker, als bei einer ansteigenden Messrichtung mit $x = 1,4$ mm.

Ein zweiter Effekt ist zu erkennen: Das LS Profil hat eine größere Amplitude als das TLS Profil und die Amplitude nimmt mit steigendem Winkel α zu. Dabei ist kein Unterschied zwischen geschliffenen und gedrehten Proben zu erkennen. Bei allen Proben hatten die Amplituden der TLS Profile die gleiche Größe, wie die zugehörige Amplitude bei $\alpha = 0^\circ$. Beispielhaft ist dies an bei Probe 9 gezeigt. In Abbildung 45, Abbildung 46, Abbildung 47, Abbildung 48 und Abbildung 49 sind die Rohprofile der Probe 9 für die Neigungswinkel $\alpha = 0^\circ$ und für $\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ$ und 45° für eine fallende Messrichtung abgebildet.

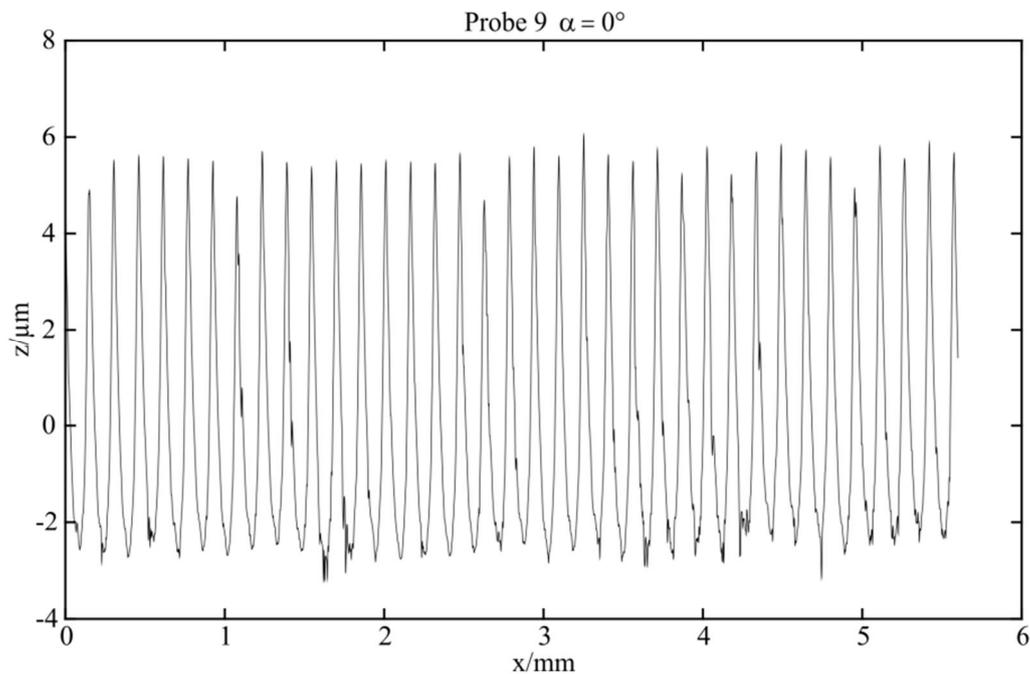
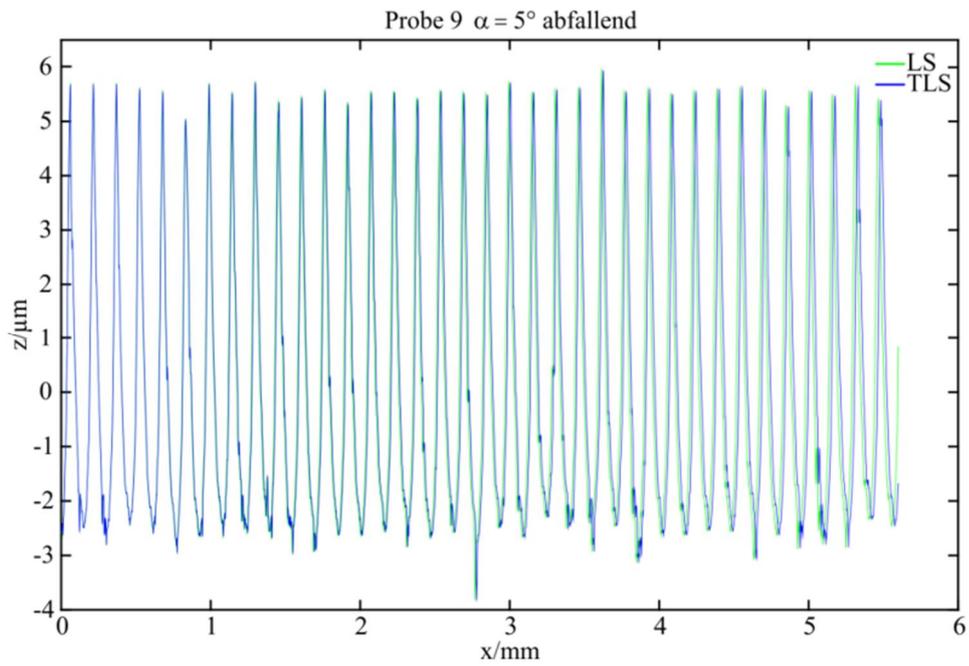
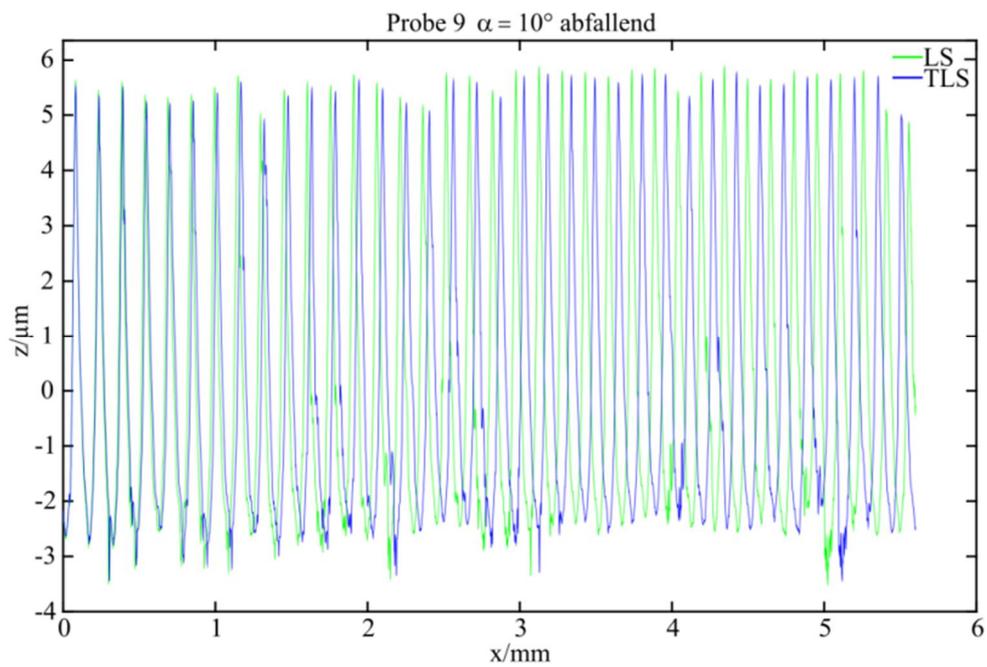


Abbildung 45: Rohprofil Probe 9 bei $\alpha = 0^\circ$

Bei dem Winkel $\alpha = 0^\circ$ erstreckt sich das Profil von $z = -3,5$ μm bis $z = 6$ μm . Bei $\alpha = 5^\circ$ liegen das LS und das TLS Profil fast übereinander, jedoch ist zu erkennen, dass zum einen das TLS Profil etwas länger ist, als das LS Profil und zum anderen die Amplitude des LS Profils etwas größer ist, als die des TLS Profils. In der nächsten Abbildung bei einem Neigungswinkel von $\alpha = 10^\circ$ ist das TLS noch länger und die Amplitude des LS Profils noch größer. Beide Effekte nehmen bei $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ weiter zu. Das TLS Profil ist stark gedehnt, aber in der Amplitude entspricht es dem Rohprofil bei $\alpha = 0^\circ$. Dagegen ist die Amplitude LS Profil stark erhöht und das Profil erstreckt sich von $z = -5$ μm bis $z = 8,5$ μm , die entspricht einer Dehnung von 42 % gegenüber dem Rohprofil bei $\alpha = 0^\circ$.

Abbildung 46: Rohprofile Probe 9 bei $\alpha = 5^\circ$ abfallendAbbildung 47: Rohprofile Probe 9 bei $\alpha = 10^\circ$ abfallend

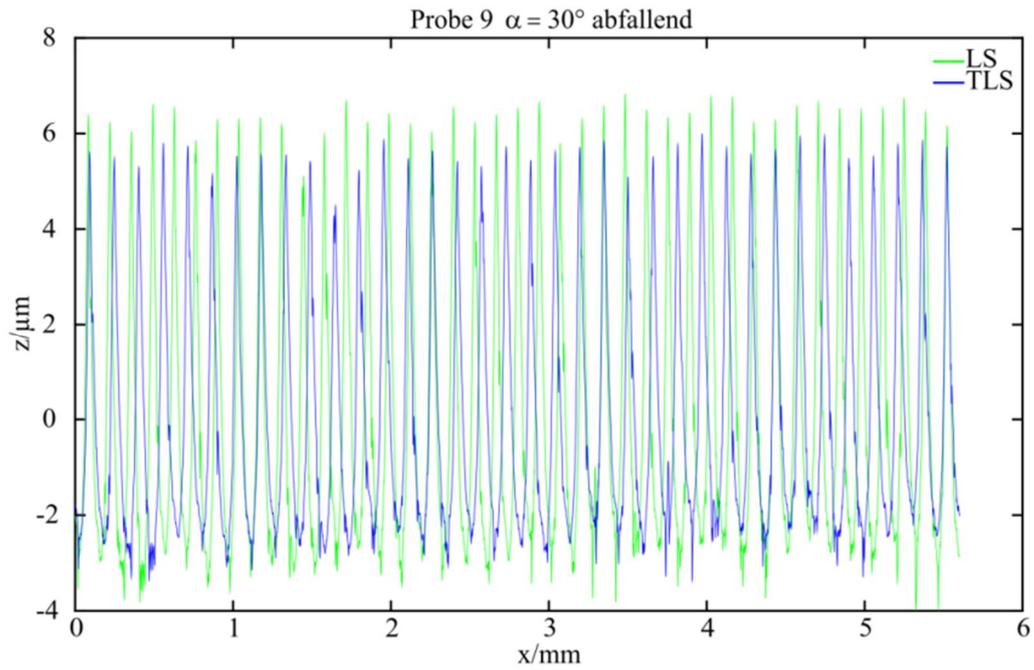


Abbildung 48: Rohprofile Probe 9 bei $\alpha = 30^\circ$ abfallend

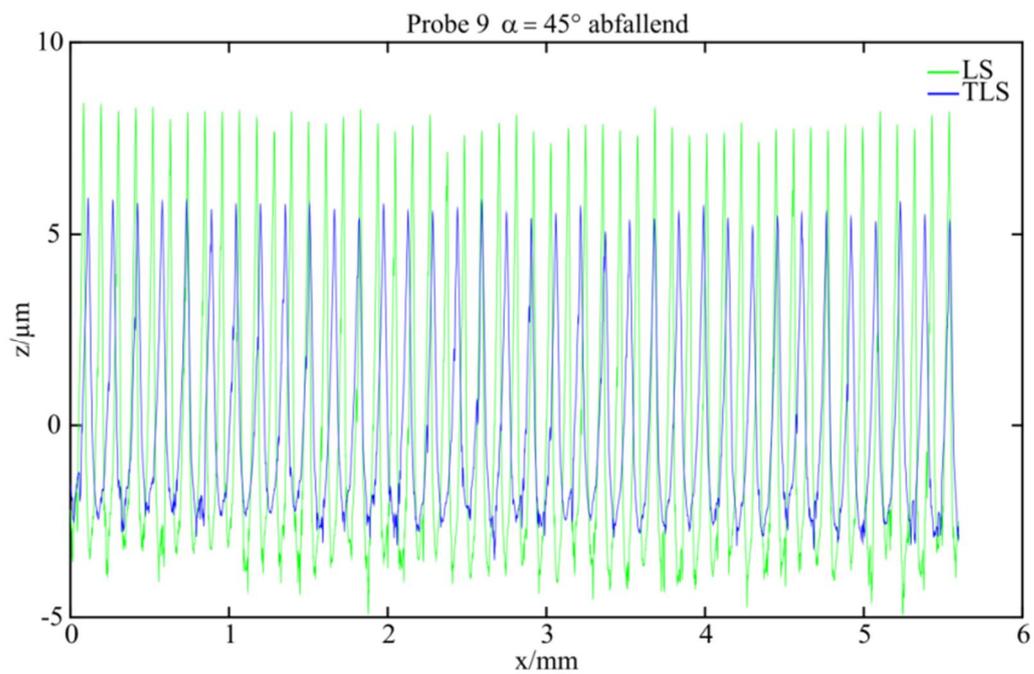


Abbildung 49: Rohprofile Probe 9 bei $\alpha = 45^\circ$ abfallend

Bei jeder Auswertung treten diese Effekte auf. Dies wird in der Abbildung 50 deutlich. Abgebildet sind die LS und TLS Methode und die Auswirkungen der jeweiligen Methode.

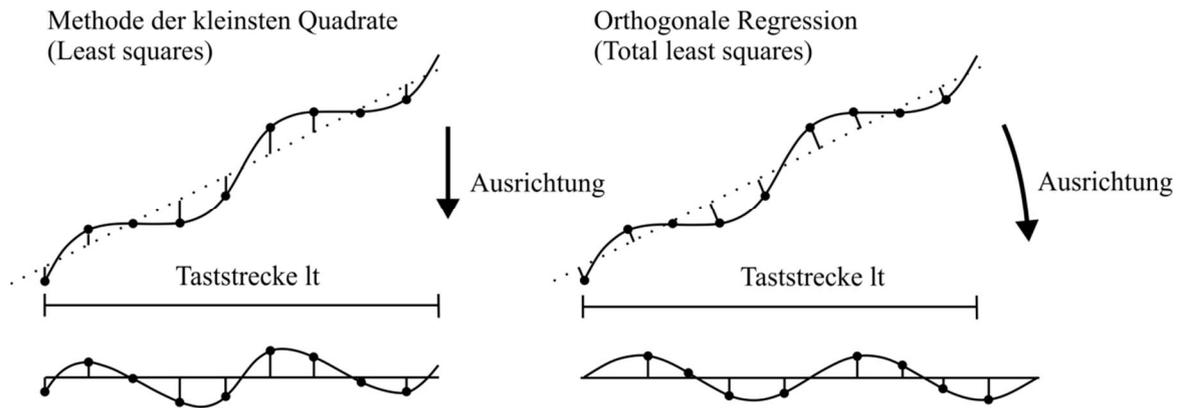


Abbildung 50: LS und TLS Methode im Vergleich nach Püschmann [Püs08]

Bei der LS Methode bleibt die Taststrecke erhalten, aber es entsteht eine falsche Amplitude und eine verzerrte Geometrie. Es kommt bei den LS Kennwerte zu einer Erhöhung der Werte zu den TLS Kennwerten, wie in Abbildung 26 und Gleichung 27 gezeigt. Bei der TLS Methode bleibt die Taststrecke nicht erhalten, sie wird länger, dafür bleiben aber die Amplitude und die Geometrie erhalten. Die mathematischen Unterschiede der beiden Methoden bestätigen die experimentellen Untersuchungen.

Zusammenfassend können die Einflüsse der Parameter, welche für die Rauheitsmessung auf Konturen relevant sind, untereinander in der Tabelle 48 eingetragen werden. Dabei kennzeichnet ++ starken Einfluss, + schwachen Einfluss und o sehr geringen oder keinen Einfluss.

Tabelle 48: Einflüsse der Parameter, vollständig

	(N)	(V)	(P)	(M)	(Fa)	(FV)	(R)
Neigung (N)		+	o	+	+	++	++
Vorschub (V)			++	++	++	o	o
Profilpunktastand (P)				o	o	o	o
Messrichtung (M)					+	++	++
Antastkraft (Fa)						+	o
Fertigungsverfahren (FV)							o
Rauheit (R)							

Die meisten Parameter hängen nicht nur paarweise voneinander ab. Einen starken Einfluss hat die Vorschubgeschwindigkeit v in Abhängigkeit von, zum einen dem Profilpunktastand P , da nicht alle Kombinationen wählbar sind. Zum anderen der Messrichtung, da durch eine fallende Messrichtung die relative Tastergeschwindigkeit zunimmt und damit die Abhebeweite, -höhe und -zeit größer werden. Weiter hat die Vorschubgeschwindigkeit v in

Abhängigkeit der Antastkraft F_a einen starken Einfluss, da eine Erhöhung bei höherer Vorschubgeschwindigkeit bessere Rauheitswerte im Vergleich zu den Referenzkennwerten aufweist. Dies ist bei den geschliffenen Proben sehr gut zu sehen. Einen starken Einfluss hat weiter der Neigungswinkel α in Abhängigkeit von, zum einen dem Fertigungsverfahren und zum anderen der Rauheit. In Bezug auf die Rauheitskennwerte, spielt eine ansteigende Rauheit für die gedrehten Proben keine Rolle, während bei den geschliffenen Proben die Rauheitswerte mit steigendem Winkel α größer als die Referenzkennwerte sind.

Die Messrichtung hat in Bezug auf das Fertigungsverfahren und die Rauheit ebenso einen starken Einfluss. Während bei den gedrehten Proben die Messrichtung bei jeder Rauheit unabhängig ist, ist bei den geschliffenen Proben je nach Winkel α mal die ansteigende, mal die abfallende Messrichtung besser. Somit hat der Neigungswinkel α in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v , der Messrichtung und der Antastkraft F_a ohne die Berücksichtigung des Fertigungsverfahrens und der Rauheit einen schwachen Einfluss.

Keinen oder einen sehr geringen Einfluss haben der Neigungswinkel α in Abhängigkeit des Profilkpunktabstandes P , die Vorschubgeschwindigkeit v in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens und der Rauheit und der Profilkpunktabstand P in Abhängigkeit der Messrichtung, der Antastkraft F_a , des Fertigungsverfahrens und der Rauheit.

Das Fertigungsverfahren hat auf die Rauheit keinen direkten Einfluss, sondern die gewünscht eingestellten Fertigungsparameter. Die Antastkraft F_a und die Rauheit haben keinen direkten Einfluss untereinander, sondern sie sind immer abhängig von weiteren Parametern, wie der Messrichtung, der Vorschubgeschwindigkeit v und dem Neigungswinkel α .

5 Messunsicherheit

Ein vollständiges Messergebnis besteht aus dem Messwert und der erweiterten Messunsicherheit. Damit kann die Qualität eines Messergebnisses beurteilt werden [Kry12]. Zunächst müssen die Messaufgabe, das Messprinzip und das Messverfahren ausführlich beschrieben sein. Weiter muss ein Modell der Messung und Auswertung erstellt und alle Einflussfaktoren gefunden werden. Anschließend kann eine Messunsicherheitsbestimmung nach GUM [DIN 13005] durchgeführt werden.

Es wird eine Unsicherheitsbilanz für die Hauptuntersuchungen für jeden Kennwert für jeden Neigungswinkel α angefertigt. Um eine Unsicherheitsbilanz aufzustellen, müssen zunächst die Messaufgabe, das Messprinzip und das Messverfahren erläutert werden. Die Beschreibung der Messaufgabe, des Messprinzips und des Messverfahrens samt Messgeräts und Auswertestrategie ist ausführlich in Kapitel 2 und Kapitel 3 aufgeführt. Weiter müssen Einflussgrößen ermittelt und deren Wirkung auf die Messgröße analysiert werden. Die Einflussgrößen und Gegenmaßnahmen wurden in Kapitel 2 vorgestellt und in Tabelle 6 aufgeführt.

Es folgen die Einflussgrößen und deren Bestimmung für die Unsicherheitsbilanz nach Volk [Vol13]. Messgeräteseitige Unsicherheiten wie Verformung des Tasters und Formabweichungen werden vernachlässigt.

Das Grundrauschen wird mit

$$u(A1) = \frac{30 \text{ nm}}{\sqrt{2}} \quad (28)$$

(U-verteilt) abgeschätzt. Der Unsicherheitsbeitrag für die Tasterumkehrspanne und Auflösung ergibt sich mit der Auflösung des Messgerätes von 0,6 nm zu

$$u(A2) = \frac{0,6 \text{ nm}}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

(rechteckverteilt) und Führungsabweichungen (rechteckverteilt) zu

$$u(B1) = \frac{10 \text{ nm}}{\sqrt{3}} \quad (30)$$

Die sehr geringen aber doch vorhandenen unbekannt systematischen Abweichungen durch Einflussgrößen wie Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und plastische Verformung der Tastspitze werden mit $u_s = 20 \text{ nm}$ abgeschätzt. Die Rückführunsicherheit wird in der Regel auf Normale zurückgeführt. Da die gemessenen Proben mit den Referenzmessungen der Proben selbst verglichen wurden, wird die Unsicherheit der Referenzmessungen verwendet. In Tabelle 49 sind alle Unsicherheiten, abhängig vom Kennwert (KN) und Probe (P) $u(B2KNP)$ aufgeführt.

Tabelle 49: $u(B2KNP)$ für alle Kennwerte und Proben

$u(B2KNP)$ Probe	$\frac{u(B2RaP)}{\text{nm}}$	$\frac{u(B2RaP)}{\text{nm}}$	$\frac{u(B2RaP)}{\text{nm}}$	$\frac{u(B2RaP)}{\text{nm}}$	$\frac{u(B2RaP)}{\text{nm}}$	$\frac{u(B2RaP)}{\text{nm}}$
1	0,4	1,6	6,0	1,0	3,6	2,2
2	22,0	60,0	338,8	9,2	8,9	156,1
3	14,1	19,8	162,6	64,5	50,2	59,1
4	22,9	36,7	179,3	94,1	131,9	76,2
5	187,2	238,5	1136,2	515,2	168,2	420,8
6	1,8	2,9	25,5	16,8	8,8	11,1
7	4,4	5,0	35,3	22,1	21,2	45,0
8	6,7	8,0	60,5	44,5	24,9	71,0
9	4,9	5,4	48,2	41,0	24,6	41,9

Weiter wird der Unsicherheitsanteil der Linearitätsabweichung mit $u(B3)=1,5$ nm abgeschätzt. Zunächst kann die Unsicherheit des einzelnen Profilpunktes $u(P_i)$ berechnet werden. Dazu müssen die Einflussgrößen mit dem Verteilungsfaktor V und dem Filterfaktor c multipliziert werden. Der Verteilungsfaktor ist bei einer Normalverteilung $V = 1$, bei einer U-Verteilung $V = 0,707$ und bei einer Rechteckverteilung $V = 0,577$. Der Filterfaktor c berechnet sich über den Profilpunktabstand P , der Konstante $a = 0,4697$ und dem verwendeten Filter λ_s , der bei allen Proben $\lambda_s = 2,5$ ist, über:

$$c = \sqrt{\frac{P}{a \cdot \lambda_s \cdot \sqrt{2}}} \quad (31)$$

Es werden drei verschiedene Profilpunktabstände P verwendet $P_1 = 0,1 \mu\text{m}$, $P_2 = 0,5 \mu\text{m}$ und $P_3 = 1 \mu\text{m}$. Somit ergeben sich drei Filterfaktoren, $c_1 = 0,25$, $c_2 = 0,55$ und $c_3 = 0,78$. Die sich ergebenden Unsicherheiten $u(y)$ der einzelnen Einflussgrößen sind in Tabelle 50 aufgeführt.

Tabelle 50: Unsicherheiten der Einflussgrößen

Größe u()	u(x) / nm	V	c	u(y) / nm
A1	30	0,707	0,25/0,55/0,78	2,7/5,8/8,2
A2	0,35	0,577	0,25/0,55/0,78	0,05/0,1/0,2
B1	5,8	0,577	1	3,3
B2KNP	Tabelle 49	1	1	Tabelle 49
B3	1,5	1	1	1,5

Weiter kann mit den Unsicherheiten aus der Tabelle 50 die Unsicherheit des einzelnen Profilpunktes, abhängig vom Kennwert $u(\text{KNP})$ berechnet werden mit:

$$u(\text{KNP}) = \sqrt{c \cdot \sum_{n=1}^k u(\text{Ai})^2 + \sum_{n=1}^m u(\text{Bi})^2} \quad (32)$$

Daraus ergeben sich für jeweils drei vom Profilpunktastand P abhängige Unsicherheiten des Profilpunktes für alle Proben. Da aus der Gleichung (32) ersichtlich wird, dass der Filterfaktor einen sehr geringen Einfluss hat, werden die Unsicherheiten der Profilpunkte gemittelt. Die gemittelten Unsicherheiten $u(\text{KNP})$ sind in Tabelle 51 aufgeführt.

Tabelle 51: $u(\text{KNP})$ für alle Kennwerte und Proben

$u(\text{KNP})$ Probe	$\frac{u(\text{RaP})}{\text{nm}}$	$\frac{u(\text{RqP})}{\text{nm}}$	$\frac{u(\text{RzP})}{\text{nm}}$	$\frac{u(\text{RkP})}{\text{nm}}$	$\frac{u(\text{RpKp})}{\text{nm}}$	$\frac{u(\text{RvKp})}{\text{nm}}$
1	10,9	11,6	14,9	13,0	13,0	12,1
2	29,1	66,1	344,3	17,3	17,3	161,7
3	21,8	27,0	168,2	56,5	56,5	65,2
4	30,0	43,2	184,9	137,6	137,6	82,2
5	192,8	244,1	1141,6	173,8	173,8	426,3
6	11,7	12,6	32,5	17,2	17,2	19,1
7	13,7	14,1	41,8	28,3	28,3	51,4
8	15,4	16,5	66,6	31,9	31,9	77,0
9	14,0	14,4	54,5	31,6	31,6	48,3

Für jeden Kennwert (KN) kann mit der Unsicherheit des einzelnen Profilpunktes, der unbekannt systematischen Abweichung u_s und dem Unsicherheitsbeitrag der Streuung des

Mittelwertes jedes Kennwertes $s(\text{KN})$ die kombinierte Standardunsicherheit des jeweiligen Kennwertes $u_k(\text{KN})$ berechnet werden mit:

$$u_k(\text{KN}) = \sqrt{(2 \cdot u(\text{KNP}))^2 + \left(\frac{s(\text{KN})}{\sqrt{2}}\right)^2 + u_s^2} . \quad (33)$$

Der Unsicherheitsbeitrag für die Streuung des Mittelwertes $s(\text{KN})$ wird über die vier Messeinstellungen beider Auswertemethoden B und D gemittelt. Die Ergebnisse sind beispielhaft für die raueste geschliffene Probe 5 in Tabelle 52 und für die raueste gedrehte Probe 9 in Tabelle 53 jeweils für alle Winkel α mit ansteigender und abfallender Messrichtung dargestellt. Die zugehörigen ermittelten kombinierten Standardunsicherheiten sind für Probe 5 in Tabelle 54 und für Probe 9 in Tabelle 55 dargestellt.

Tabelle 52: $s(\text{KN})$ bei jedem Winkel für Probe 5

$s(\text{KN})$ Winkel	$s(\text{Ra})/\text{nm}$	$s(\text{Rq})/\text{nm}$	$s(\text{Rz})/\text{nm}$	$s(\text{Rk})/\text{nm}$	$s(\text{Rpk})/\text{nm}$	$s(\text{Rvk})/\text{nm}$
5s	234,9	304,7	1435,1	617,2	216,2	515,6
5f	258,5	334,2	1500,6	626,6	208,4	723,5
10s	216,7	274,8	1268,4	602,1	212,2	476,8
10f	238,3	305,7	1423,4	616,2	204,9	611,3
30s	271,4	350,2	1545,1	730,7	269,6	658,0
30f	264,0	347,5	1718,1	676,4	286,5	688,9
45s	39,6	57,8	410,1	151,0	119,3	156,4
45f	79,6	104,8	693,9	227,2	174,5	233,3

Tabelle 53: s(KN) bei jedem Winkel für Probe 9

s(KN) Winkel	s(Ra)/nm	s(Rq)/nm	s(Rz)/nm	s(Rk)/nm	s(Rpk)/nm	s(Rvk)/nm
5s	3,9	4,4	59,9	32,2	25,4	58,4
5f	43,5	51,2	216,0	83,4	160,9	70,5
10s	5,7	6,2	50,5	31,8	25,8	38,4
10f	6,0	6,9	56,5	32,7	24,2	44,5
30s	13,9	16,7	112,5	46,1	42,6	55,9
30f	13,1	15,2	78,9	38,9	42,4	46,0
45s	-	-	-	-	-	-
45f	33,1	38,4	166,7	60,9	88,9	49,0

Tabelle 54: uk(KN) bei jedem Winkel für Probe 5

u(KN) Winkel	u(Ra)/nm	u(Rq)/nm	u(Rz)/nm	u(Rk)/nm	u(Rpk)/nm	u(Rvk)/nm
5s	451,9	575,7	2696,9	708,6	409,8	996,6
5f	464,6	591,9	2732,3	716,9	405,8	1118,4
10s	442,7	560,5	2612,0	695,5	407,8	977,1
10f	453,7	576,3	2690,7	707,8	404,0	1049,3
30s	471,9	601,1	2757,0	809,4	440,4	1077,2
30f	467,7	599,5	2857,5	760,7	450,9	1096,4
45s	388,1	491,9	2319,9	379,5	368,1	867,1
45f	394,2	499,7	2386,5	415,7	389,5	884,2

Tabelle 55: $u_k(KN)$ bei jedem Winkel für Probe 9

s(KN) Winkel	u(Ra)/nm	u(Rq)/nm	u(Rz)/nm	u(Rk)/nm	u(Rpk)/nm	u(Rvk)/nm
5s	34,6	35,3	126,0	73,6	71,0	114,6
5f	55,5	62,0	242,8	106,5	174,0	121,2
10s	34,9	35,6	121,8	73,5	71,1	105,8
10f	34,9	35,7	124,4	73,8	70,5	108,2
30s	37,1	38,8	157,9	80,7	78,7	113,4
30f	36,8	38,2	136,0	76,8	78,7	108,8
45s	-	-	-	-	-	-
45f	47,7	52,0	200,1	90,0	110,8	110,1

Zusammenfassend für alle Proben und an den Beispielen der Probe 5 und Probe 9 dargestellt kann festgehalten werden, dass die Unsicherheit der Kennwerte $s(KN)$, bei vergleichbarer Rauheit, der geschliffenen Proben wesentlich größer als bei den gedrehten Proben ist. Dementsprechend ist ebenfalls die kombinierte Standardunsicherheit der geschliffenen Proben größer als der gedrehten Proben.

Weiter folgt die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit U :

$$U(KN) = k \cdot u_k(KN) \quad (34)$$

Dabei wird der Erweiterungsfaktor $k = 2$ für ein 95 % -Vertrauensintervall verwendet. Die erweiterte Messunsicherheit ist für Probe 5 in Tabelle 56 und für Probe 9 in Tabelle 57 aufgeführt.

Tabelle 56: $U(KN)$ bei jedem Winkel für Probe 5

U(KN) Winkel	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
5s	0,90	1,15	5,39	1,42	0,82	1,99
5f	0,93	1,18	5,46	1,43	0,81	2,24
10s	0,89	1,12	5,22	1,39	0,82	1,95
10f	0,91	1,15	5,38	1,42	0,81	2,10
30s	0,94	1,20	5,51	1,62	0,88	2,15
30f	0,94	1,20	5,72	1,52	0,90	2,19
45s	0,78	0,98	4,64	0,76	0,74	1,73
45f	0,79	1,00	4,77	0,83	0,78	1,77

Tabelle 57: U(KN) bei jedem Winkel für Probe 9

U(KN) Winkel	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
5s	0,07	0,07	0,25	0,15	0,14	0,23
5f	0,11	0,12	0,49	0,21	0,35	0,24
10s	0,07	0,07	0,24	0,15	0,14	0,21
10f	0,07	0,07	0,25	0,15	0,14	0,22
30s	0,07	0,08	0,32	0,16	0,16	0,23
30f	0,07	0,08	0,27	0,15	0,16	0,22
45s	-	-	-	-	-	-
45f	0,10	0,10	0,40	0,18	0,22	0,22

Wie zu erwarten war, ist die erweiterte Standardmessunsicherheit bei den gedrehten Proben, bei vergleichbarer Rauheit, kleiner als bei den geschliffenen. Für die gedrehten und die geschliffenen Proben bleiben die Unsicherheiten mit ansteigenden Neigungswinkel α nahezu gleich. Beispielhaft sind die vollständigen Messergebnisse für die Probe 5 in Tabelle 58 und für Probe 9 in Tabelle 59 für $\alpha = 45^\circ$ mit abfallender Messrichtung, der Auswertemethode D (TLS und IpL) für ME 1-4 aufgeführt.

Die vollständigen Messergebnisse aller Proben befinden sich im Anhang B. Diese sind für alle vier Messeinstellungen der Methode D für alle Neigungswinkel α aufgeführt.

Tabelle 58: Vollständiges Messergebnis Probe 5, $\alpha = 45^\circ$ abfallend, Methode D

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,46 \pm 0,79	3,15 \pm 1,00	16,38 \pm 4,77	7,62 \pm 0,83	2,65 \pm 0,78	4,13 \pm 1,77
2	2,47 \pm 0,79	3,15 \pm 1,00	15,95 \pm 4,77	7,69 \pm 0,83	2,64 \pm 0,78	4,05 \pm 1,77
3	2,58 \pm 0,79	3,34 \pm 1,00	18,95 \pm 4,77	7,82 \pm 0,83	3,25 \pm 0,78	4,40 \pm 1,77
4	2,45 \pm 0,79	3,14 \pm 1,00	15,80 \pm 4,77	7,56 \pm 0,83	2,73 \pm 0,78	4,20 \pm 1,77

Tabelle 59: Vollständiges Messergebnis Probe 9, $\alpha = 45^\circ$ abfallend, Methode D

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,13 \pm 0,10	2,50 \pm 0,10	9,07 \pm 0,40	2,88 \pm 0,18	5,36 \pm 0,22	0,61 \pm 0,22
2	2,13 \pm 0,10	2,50 \pm 0,10	8,89 \pm 0,40	2,86 \pm 0,18	5,41 \pm 0,22	0,55 \pm 0,22
3	2,10 \pm 0,10	2,47 \pm 0,10	8,69 \pm 0,40	2,74 \pm 0,18	5,42 \pm 0,22	0,48 \pm 0,22
4	2,10 \pm 0,10	2,48 \pm 0,10	8,59 \pm 0,40	2,81 \pm 0,18	5,36 \pm 0,22	0,46 \pm 0,22

Zusammenfassend ist für alle Proben festzuhalten. Der Kennwert mit der größten Unsicherheit ist bei den Proben 2 bis 9 der Kennwert Rvk.

Die hochglanzpolierte Probe 1 weist eine sehr große Unsicherheit auf. Das vollständige Messergebnis ist in Tabelle 60 aufgeführt.

Tabelle 60: Vollständiges Messergebnis Probe 1, $\alpha = 45^\circ$ abfallend, Methode D

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,053 \pm 0,060	0,065 \pm 0,063	0,301 \pm 0,083	0,170 \pm 0,066	0,071 \pm 0,066	0,037 \pm 0,064
2	0,014 \pm 0,060	0,018 \pm 0,063	0,078 \pm 0,083	0,047 \pm 0,066	0,012 \pm 0,066	0,021 \pm 0,064
3	0,111 \pm 0,060	0,130 \pm 0,063	0,435 \pm 0,083	0,379 \pm 0,066	0,064 \pm 0,066	0,052 \pm 0,064
4	0,016 \pm 0,060	0,020 \pm 0,063	0,084 \pm 0,083	0,049 \pm 0,066	0,016 \pm 0,066	0,024 \pm 0,064

Da die Oberfläche sehr glatt ist, hätte die Gefahr bestanden, dass der Taster vor allem in abfallender Messrichtung auf der Oberfläche „wegrutscht“. Allerdings treten die großen Unsicherheiten unabhängig vom Neigungswinkel α auf. Die Ursachen müssen daher an anderen Gründen liegen, zum Beispiel an der Wahl der Tastspitze von statt $r = 2 \mu\text{m}$ $r = 5 \mu\text{m}$, die nicht normgerecht war. Dies kann ebenso der Grund für große Messunsicherheit der glatten geschliffenen Probe 2, $Rz = 3 \mu\text{m}$, im Vergleich zu den anderen geschliffenen Proben 3 bis 5, sein, die normgerecht mit $r = 2 \mu\text{m}$ abgetastet werden müsste. Die glatte gedrehte Probe 6, $Rz = 1 \mu\text{m}$, hat im Vergleich zu den anderen gedrehten Proben 7 bis 9 ebenso eine viel größere Unsicherheit und hätte normgerecht mit einer Tastspitze von $r = 2 \mu\text{m}$ abgetastet werden müssen. Somit ist die morphologische Filterwirkung bei den Proben 1, 2 und Probe 6 größer als bei den anderen Proben.

6 Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Grundlagenuntersuchungen zur taktilen 2D Rauheitsmessung auf Konturen, die eine gleichzeitige Messung und Auswertung von Rauheit und Konturen von Werkstücken ermöglichen. Die taktile 2D Rauheitsmessung ist sehr gut erforscht, genormt und dient für andere Messprinzipien, wie optische Messverfahren, als Referenz. Allerdings ist die Rauheitsmessung auf Konturen nicht ausreichend untersucht oder genormt. Unterschiede bei der Rauheits- und Konturenmessung sind zum einen die Abtastung der Oberfläche und zum anderen die Auswertung. Bei der Rauheitsmesstechnik erfolgt eine senkrechte Abtastung der Oberfläche, worauf ebenso die anschließende gesamte Auswertung basiert. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Konturenmessung durch den Messhub zu einer vertikalen Auslenkung des Tastelements im Millimeterbereich. Für die Auswertung wird bei der Rauheitsmesstechnik das Mittelpunktprofil und für die Konturenmesstechnik das Berührprofil verwendet. Für eine kombinierte Rauheitsmessung auf Konturen müssen daher neue Ansätze für die Messstrategie und Auswertung gefunden werden. Diese Arbeit beantwortet grundlegende Fragen zur Messstrategie und Auswertung und welche Einflüsse und Parameter einen starken und schwachen Einfluss auf die kombinierte Rauheitsmessung auf Konturen haben.

Die verwendeten Proben waren ausgewählte Normale und gedrehte und geschliffene technische Oberflächen mit verschiedenen Rauheiten. Beim Vergleich zwischen dem Mittelpunktprofil und dem Berührprofil wurden die technischen Oberflächen verwendet. Es wurden die zwei Profile, Mittelpunkt- und Berührprofil, und die sich aus den Profilen ergebenden Rauheitskennwerte R_a , R_q , R_z , R_k , R_{pk} und R_{vk} untersucht. Dabei wurde der Profilter λ_s vor und nach der Erosion durch morphologische Filterung angewendet. Gezeigt wurde, dass bei den Kennwerten R_a , R_q , R_z und R_k Unterschiede zwischen den Profilen bis $<\pm 5\%$, bei den Kennwerten R_{pk} und R_{vk} Unterschiede bis zu $\pm 11\%$ auftreten. Sehr kleine Unterschiede zeigten sich zudem bei der Reihenfolge der Anwendung des Profilters λ_s vor oder nach der Anwendung der Erosion.

Für die Rauheitsmessung auf Konturen wurden an einer schiefen Ebene verschiedene Neigungswinkel α mit jeweils ansteigender und abfallender Messrichtung untersucht. Weiter wurden die Messparameter Vorschubgeschwindigkeit v , Antastkraft F_a und Profilpunktastand P variiert. Vier unterschiedliche Auswertemethoden wurden vorgestellt und angewendet und acht Rauheitskennwerte, R_a , R_q , R_z , R_k , R_{pk} , R_{vk} , Mr_1 und Mr_2 , ausgewertet. Die Rauheitskennwerte wurden mit den gemessenen Referenzkennwerten bei dem Neigungswinkel $\alpha = 0^\circ$ verglichen. Nach der Messung mussten die Daten ausgerichtet und interpoliert werden. Für die Ausrichtung wurden die vorgestellten Auswertemethoden, die Methode der kleinsten Quadrate (least squares Methode) und die Methode einer orthogonalen Regression (total least squares Methode) und für die Interpolation ein

interpolierender Gaußfilter und Spline verglichen. Es wurde gezeigt, dass der Spline und interpolierender Gaußfilter gleiche Ergebnisse aufweisen. Weiter wurde dargestellt, dass sich die Tast- und damit die Messtrecke bei allen Proben bei ansteigender Messrichtung verkürzt und bei abfallender Messrichtung verlängert. Zum einen aufgrund des Neigungswinkels α des Werkstückes und zum anderen aufgrund des Winkels κ zwischen Tastelement und Vorschubgerät, der sich beim Messvorgang ändert. Zudem ändert sich durch den Neigungswinkel die relative Tastergeschwindigkeit beim Messvorgang. Sie wird bei ansteigender Messrichtung kleiner und bei abfallender Messrichtung größer. Eine schnellere Geschwindigkeit erhöht die Abhebezeit, -höhe und -weite des Tasters. Dies führt zu einer schlechteren Abtastung und zum anderen kann es bei einer großen Vorschubgeschwindigkeit v zu Stößen des Tasters auf der Oberfläche führen. Diese Stöße können die Tastspitze und die Oberfläche beschädigen oder zerstören.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Rauheitsmessung auf Konturen sogar bei steilen Neigungswinkeln von $\alpha = 45^\circ$ möglich ist und dabei sehr gute Rauheitskennwerte erhalten werden. Dabei muss beachtet werden, dass je nach Geometrie des Werkstückes der Taster bei steilen Neigungswinkeln α die ausgewählte Taststrecke nicht erreichen kann. Wichtig ist die angewendete Auswertemethode, die Kennwerte der least squares Methode sind immer erhöht gegenüber der total least squares Methode. Zudem wird die Überhöhung mit ansteigendem Neigungswinkel α größer. Nur die total least squares Methode eignet sich zum Auswerten von Rauheitskennwerten auf Konturen. Weiter haben die vorgestellten Parameter unterschiedlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Die Rauheitskennwerte der gedrehten Profile sind unabhängig vom Neigungswinkel α , der Messrichtung, der Antastkraft F_a und der Rauheit sehr gut mit den Referenzkennwerten vergleichbar. Ein anderes Verhalten zeigen die geschliffenen Proben. Je nach Rauheit, Neigungswinkel α und Messeinstellung ist die Messrichtung mal ansteigend, mal abfallend besser. Bei vergleichbarer Rauheit sind die Rauheitskennwerte der geschliffenen Proben bei steigender Rauheit im Vergleich zu den gedrehten Proben höher als die Referenzkennwerte. Zudem ist die empirische Standardabweichung bei vergleichbarer Rauheit bei den geschliffenen Proben höher als bei den gedrehten Proben. Festzustellen ist, dass eine hohe Vorschubgeschwindigkeit $v = 1 \text{ mm/s}$ bei kleiner Antastkraft $F_a = 1 \text{ mN}$ zu schlechten Rauheitswerten im Vergleich zu den Referenzkennwerten führt. Wiederum führt eine Erhöhung der Antastkraft $F_a = 3 \text{ mN}$ bei gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit $v = 1 \text{ mm/s}$ wieder zu sehr guten Rauheitskennwerten. Die beiden Parameter Vorschubgeschwindigkeit v und Antastkraft F_a müssen abhängig von einander eingestellt werden. Allerdings können keine sehr hohen Antastkräfte F_a gewählt werden, da dies immer die Gefahr der Beschädigung und Zerstörung von Oberfläche und Tastnadel birgt.

Anhand einer Profilanalyse der gedrehten und geschliffenen Proben wurden die Stärken der total least squares Methode gegenüber der least squares Methode anschaulich aufgezeigt.

Zusammenfassend wurden die Parameter, die einen starken und schwachen Einfluss auf die Rauheitsmessung auf Konturen haben, herausgestellt und deren Abhängigkeit untereinander aufgezeigt. Einen starken Einfluss hat die Vorschubgeschwindigkeit v in Abhängigkeit von dem Profilkpunktstand P und der Antastkraft F_a . Weiter haben der Neigungswinkel α und die Messrichtung, beide in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens und der Rauheit einen starken Einfluss. Einen schwachen Einfluss hat Neigungswinkel α in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v , der Messrichtung und der Antastkraft F_a . Keinen oder einen sehr geringen Einfluss haben der Neigungswinkel α in Abhängigkeit des Profilkpunktstandes P , die Vorschubgeschwindigkeit v in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens und der Rauheit und der Profilkpunktstand P in Abhängigkeit der Messrichtung, der Antastkraft F_a , des Fertigungsverfahrens und der Rauheit.

Für das vollständige Messergebnis wurde die Messunsicherheit bestimmt. Bei der ermittelten Messunsicherheit zeigen sich Unterschiede zwischen den periodischen und aperiodischen Oberflächen und bei den glatten und rauen Proben. Bei den gedrehten und geschliffenen Proben sind die Unsicherheiten für alle Neigungswinkel α ähnlich, jedoch sind die Unsicherheiten bei vergleichbarer Rauheit bei den gedrehten Proben kleiner als bei den geschliffenen. Bei den sehr glatten Proben sind die Unsicherheiten, sowohl für die gedrehten als auch für die geschliffenen Proben, im Vergleich zu den rauerer Proben wesentlich höher.

Grundsätzlich birgt die Möglichkeit Rauheit und Konturen in einem Schritt messen und auswerten zu können großes Potential. Es bringt eine hohe Zeitersparnis, da zum einen ein langes Ausrichten von Werkstücken entfällt und zum anderen nur einmal gemessen werden muss. Allerdings müssen die Mess- und Auswertestrategie sorgfältig ausgewählt werden, um sinnvolle und zuverlässige Ergebnisse mit kleiner Messunsicherheit zu erhalten.

7 Ausblick

In der vorgestellten Forschungsarbeit wurden Grundlagenuntersuchungen zur Rauheitsmessung auf Konturen an der schiefen Ebene durchgeführt. Es können weitere Arbeiten an der schiefen Ebene folgen, mit zum einen rauen Proben, $R_z > 10 \mu\text{m}$, und zum anderen glatten Oberflächen, die mit einem Tastspitzenradius von $r = 2 \mu\text{m}$ untersucht werden können. Weiter können experimentelle Untersuchungen mit ausgewählte Proben nicht nur mit einem sich änderndem Neigungswinkel α , sondern mit sich ändernden Winkeln $\beta \neq 0$ und $\gamma \neq 0$ durchgeführt werden. Nach der schiefen Ebene ist die Kugel der nächste Schritt. Wie bei der schiefen Ebene müssen Lösungen zur Messstrategie und Auswertung gefunden werden. Beim Messvorgang werden keine äquidistanten Daten erhalten, die Messstrecke und die relative Tastergeschwindigkeit ändern sich durch den vertikalen An- oder Abstieg. Um Rauheitskenngrößen der aufgenommenen Messdaten einer Kugeloberfläche normgerecht auswerten zu können, müssen ausgerichtete, äquidistante Daten vorliegen. Dafür können grundsätzlich drei verschiedene Projektionen verwendet werden: die Projektion in die Ebene (azimutale Projektionen), die Projektion auf einen Kegel (Kegelprojektion) und die Projektion auf einen Zylinder (Zylinderprojektion). Bei allen drei Projektionen kann zwischen einem flächen-, abstands- und winkeltreuen Entwurf unterschieden werden. Dabei hat jede Projektion ihre Vor- und Nachteile, die untersucht und für eine Eignung für die Rauheitsmessung auf Konturen bewertet werden müssen. Der nächste Schritt wären Untersuchungen an Freiformflächen und die damit verbundene Erarbeitung neuer Auswertalgorithmen. Für die Kalibrierung von taktilen Messgeräten kann ein Normal für die Rauheitsmessung auf Konturen entwickelt werden. Dabei müssen Faktoren wie unterschiedliche Fertigungsverfahren, Rauheiten, Neigungswinkel und Messrichtungen bei der Konzipierung und Herstellung des Normals berücksichtigt werden. Ein optimierter Messvorgang kann zudem über eine adaptive Steuerung erreicht werden. Durch ein automatisches Erkennen von steilen Flanken kann die Vorschubgeschwindigkeit dynamisch angepasst werden. Dies wird bereits bei einigen Konturenmessgeräten und kombinierten Rauheits- und Konturenmessgeräten in der Industrie angewendet. Abschließend ist zu sagen, dass mit den Ergebnissen und Erkenntnissen aus dieser Arbeit und vorgeschlagenen weiteren Forschungsaufgaben die Richtlinie „Rauheit auf Konturen“ weiterentwickelt werden und eine neue ISO Norm entstehen kann, um damit die Normlücke Rauheit auf Konturen zu schließen.

8 Leitfaden für eine Messung von Rauheit auf Konturen

Für eine rückführbare Messung und zuverlässige Kennwerte bei der Messung von Rauheit auf Konturen sollten folgende Punkte vor, während und nach der Messung beachtet werden.

Vor der Messung sollte die nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] gewählte Taststrecke l_t um 5 % erhöht werden, um für die Auswertung eine ausreichend lange Messstrecke l_m zur Verfügung zu haben. Ebenso muss nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] die richtige Auswahl der Tastspitze erfolgen. Weiter muss geprüft werden, ob die Vorschubeinheit beim Messvorgang keine Kollision mit dem Werkstück fährt und das für die Tastspitze während des gesamten Messvorganges ausreichend Hub vorhanden ist, damit diese nicht vom Werkstück abhebt. Überdies müssen die Messparameter, Vorschubgeschwindigkeit v , Profilkpunktastand P und Antastkraft F_a sinnvoll, der Messaufgabe entsprechend ausgewählt werden. Kombinationen, mit einer schnellen Vorschubgeschwindigkeit $v = 1 \text{ mm/s}$ und kleiner Antastkraft $F_a = 1 \text{ mN}$ oder zu hohe Antastkräfte $F_a = 5 \text{ mN}$ sind zu vermeiden. Die Vorschubeinheit sollte beim Beginn der Messung so nah wie möglich an der Oberfläche positioniert werden. Dies ist besonders für eine abfallende Messung wichtig, damit die reale Geschwindigkeit v_{real} nicht zu groß wird.

Während der Messung sollte darauf geachtet werden Ursachen für Störgrößen zu vermeiden oder zu minimieren.

Nach der Messung sollte die Auswertemethode sorgfältig gewählt werden. Zum Ausrichten muss die orthogonale Regression (total least squares Methode) angewendet werden. Die nicht äquidistanten Messdaten können dann zum einen mit einem Spline interpoliert und anschließend λ_s gefiltert werden, oder mit dem vorgestellten interpolierenden Gaußfilter gleichzeitig interpoliert und gefiltert werden. Im Anschluss können die gewünschten Kennwerte normgerecht ausgewertet werden.

Anhang

Anhang A: Interpolierender Gaußfilter (IpL)

Wenn nicht äquidistante Messdaten vorhanden sind, die gefiltert werden sollen, müssen diese zunächst interpoliert werden, da das Gaußfilter nicht angewendet werden kann. Das Filter ist zwar kontinuierlich definiert, die üblichen Implementierungen sind aber diskret und benötigen ein äquidistantes Messraster. Ein neuer Ansatz zeigt, dass es möglich ist das Gaußfilter für nicht äquidistante Messdaten zu implementieren und es gleichzeitig für die Interpolation zu nutzen.

Für ein äquidistantes offenes Profil $z(x)$ ist die Gewichtsfunktion $s(x)$ in DIN EN ISO 16610-21 [DIN 16610-21] gegeben mit:

$$s(x) = \frac{1}{\lambda s \cdot \alpha} \cdot e^{-\pi \left(\frac{x}{\lambda s \cdot \alpha} \right)^2}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}}. \quad (35)$$

Die Filterlinie $wk(x)$ kann über das Faltungsintegral

$$wk(x) = s(x) \otimes z(x) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau - x) \cdot z(\tau) d\tau \quad (36)$$

beschrieben werden. Für diskrete Punkte x_i gilt für die Filterlinie $wd(x_i)$:

$$wd(x_i) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(xk - x_i) \cdot z(x_i) \cdot \Delta x. \quad (37)$$

Zunächst kann die Filterlinie $wk(x)$ aus Gleichung 36 für die kontinuierliche Funktion $z(\tau)$ mit der kontinuierlichen Variable τ und der Gewichtsfunktion $s(x)$ aufgrund der Symmetrie der Gaußfunktion $s(y)=s(-y)$ wie folgt beschreiben werden:

$$wk(x) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau - x) \cdot z(\tau) \cdot d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} s(x - \tau) \cdot z(\tau) \cdot d\tau. \quad (38)$$

Die Abtastung erfolgt unendlich fein und kann für $\Delta\tau_k \rightarrow 0$ dargestellt werden mit:

$$wk(x) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau - x) \cdot z(\tau) \cdot d\tau = \lim_{\Delta\tau_k \rightarrow 0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(\tau_k - x) \cdot z(\tau_k) \cdot \Delta\tau_k. \quad (39)$$

Für endlich große und nicht äquidistante Abtastschrittweiten $\Delta\tau_k$ wird der zentrale Differenzquotient verwendet. Es gilt:

$$\Delta\tau_k = \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_{k-1}}{2} \right). \quad (40)$$

Damit ergibt sich:

$$wk(x) = \lim_{\Delta\tau_k \rightarrow 0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(\tau_k - x) \cdot z(\tau_k) \cdot \Delta\tau_k \cong \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(\tau_k - x) \cdot z(\tau_k) \cdot \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_{k-1}}{2} \right) = w\tilde{k}(x). \quad (41)$$

Die Position x der Auswertung kann frei gewählt werden. Damit kann die Filterung zur Interpolation gewählt werden. Die diskrete Filterlinie $w\tilde{d}(x)$ ergibt sich dann zu:

$$w\tilde{d}(xi) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(\tau_k - xi) \cdot z(\tau_k) \cdot \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_{k-1}}{2} \right). \quad (42)$$

Zusammenfassend erfüllt die Filterlinie $w\tilde{d}(x)$ aus Gleichung 42 zwei Funktionen: Zum einen werden die Messdaten λs gefiltert und zum anderen gleichzeitig interpoliert. Somit ist eine Kombination von λs Filterung und Interpolation möglich.

Anhang B: Messdaten

Mittelpunkt- und Berührprofile der Proben 1 – 9 für Ansatz 1 und Ansatz 2

Tabelle 61: Mittelpunktprofile nach Ansatz 1 (λ_s nach Erosion)

	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
Pr1	0,01±0,00	0,01±0,01	0,06±0,02	0,03±0,00	0,01±0,02	0,01±0,01
Pr2	0,19±0,08	0,32±0,21	2,34±1,17	0,44±0,03	0,21±0,03	0,65±0,54
Pr3	0,71±0,05	0,90±0,07	4,78±0,56	2,19±0,22	0,78±0,17	1,07±0,20
Pr4	1,10±0,08	1,39±0,13	7,26±0,62	3,52±0,33	1,41±0,46	1,34±0,26
Pr5	1,56±0,65	2,12±0,83	12,32±3,94	4,13±1,78	1,94±0,58	3,71±1,46
Pr6	0,16±0,01	0,19±0,01	0,85±0,12	0,50±0,05	0,16±0,02	0,14±0,06
Pr7	0,57±0,02	0,69±0,02	2,83±0,20	1,39±0,08	1,07±0,05	0,41±0,20
Pr8	1,16±0,03	1,39±0,04	5,23±0,25	1,96±0,16	2,90±0,10	0,38±0,25
Pr9	2,13±0,02	2,50±0,02	8,95±0,17	2,84±0,14	5,39±0,08	0,55±0,15

Tabelle 62: Mittelpunktprofile nach Ansatz 2 (λ_s vor Erosion)

	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
Pr1	0,01±0,00	0,01±0,01	0,06±0,02	0,03±0,00	0,01±0,01	0,01±0,01
Pr2	0,19±0,08	0,32±0,21	2,35±1,14	0,44±0,03	0,21±0,03	0,66±0,55
Pr3	0,71±0,05	0,90±0,07	4,83±0,57	2,18±0,21	0,79±0,17	1,08±0,21
Pr4	1,10±0,07	1,39±0,12	7,25±0,69	3,52±0,29	1,40±0,46	1,34±0,26
Pr5	1,57±0,66	2,14±0,83	12,32±3,81	4,21±1,91	1,94±0,57	3,66±1,36
Pr6	0,16±0,01	0,19±0,01	0,85±0,12	0,50±0,05	0,16±0,02	0,14±0,06
Pr7	0,57±0,02	0,69±0,02	2,82±0,20	1,39±0,08	1,07±0,05	0,41±0,20
Pr8	1,16±0,03	1,39±0,04	5,23±0,26	1,96±0,16	2,90±0,10	0,38±0,25
Pr9	2,13±0,02	2,50±0,02	8,95±0,17	2,35±0,16	5,10±0,13	0,53±0,26

Tabelle 63: Berührprofile nach Ansatz 1 (λ_s nach Erosion)

	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
Pr1	0,01±0,00	0,01±0,00	0,06±0,02	0,03±0,00	0,01±0,01	0,01±0,01
Pr2	0,19±0,08	0,34±0,23	2,32±1,18	0,44±0,03	0,20±0,03	0,70±0,58
Pr3	0,70±0,05	0,89±0,07	4,70±0,55	2,16±0,22	0,74±0,16	1,07±0,22
Pr4	1,08±0,08	1,37±0,12	7,17±0,60	3,46±0,32	1,35±0,43	1,33±0,27
Pr5	1,58±0,65	2,13±0,82	12,14±3,95	4,10±1,75	1,83±0,65	3,73±1,39
Pr6	0,16±0,01	0,19±0,01	0,85±0,12	0,50±0,05	0,16±0,02	0,15±0,07
Pr7	0,56±0,02	0,68±0,02	2,83±0,20	1,40±0,08	1,04±0,06	0,43±0,21
Pr8	1,13±0,03	1,37±0,04	5,22±0,25	1,97±0,17	2,81±0,10	0,40±0,25
Pr9	2,09±0,02	2,46±0,02	8,93±0,17	2,84±0,14	5,28±0,08	0,57±0,15

Tabelle 64: Berührprofile nach Ansatz 2 (λ_s vor Erosion)

	Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
Pr1	0,01±0,00	0,01±0,00	0,06±0,02	0,03±0,00	0,01±0,01	0,01±0,00
Pr2	0,19±0,08	0,34±0,23	2,34±1,18	0,44±0,03	0,20±0,03	0,71±0,59
Pr3	0,70±0,05	0,89±0,07	4,79±0,56	2,15±0,21	0,75±0,16	1,09±0,22
Pr4	1,08±0,07	1,37±0,12	7,20±0,69	3,47±0,28	1,35±0,44	1,33±0,27
Pr5	1,59±0,66	2,14±0,83	12,24±3,83	4,18±1,88	1,83±0,63	3,68±1,30
Pr6	0,16±0,01	0,19±0,01	0,84±0,12	0,50±0,05	0,16±0,02	0,15±0,07
Pr7	0,56±0,02	0,68±0,02	2,82±0,20	1,39±0,08	1,04±0,06	0,43±0,21
Pr8	1,13±0,03	1,37±0,04	5,23±0,26	1,96±0,17	2,81±0,10	0,40±0,26
Pr9	2,09±0,02	2,46±0,02	8,94±0,17	2,35±0,17	5,00±0,13	0,55±0,26

Tabelle 65: Mittelpunktprofile nach Ansatz 1 zu Mittelpunktprofilen nach Ansatz 2

	$\frac{Ra_{MP1}}{Ra_{MP2}} / \%$	$\frac{Rq_{MP1}}{Rq_{MP2}} / \%$	$\frac{Rz_{MP1}}{Rz_{MP2}} / \%$	$\frac{Rk_{MP1}}{Rk_{MP2}} / \%$	$\frac{Rpk_{MP1}}{Rpk_{MP2}} / \%$	$\frac{Rvk_{MP1}}{Rvk_{MP2}} / \%$
Pr1	+0,83	-0,01	+0,77	+2,29	+9,57	-3,53
Pr2	-0,10	-0,12	-0,14	+0,04	-0,28	-0,55
Pr3	+0,07	+0,01	-1,01	+0,58	-0,23	-1,14
Pr4	+0,11	+0,18	+0,25	-0,04	+0,49	-0,19
Pr5	-0,85	-0,58	-0,00	-2,00	-0,07	+1,33
Pr6	-0,00	-0,00	-0,00	-0,01	-0,02	+0,21
Pr7	+0,11	+0,11	+0,20	+0,28	-0,05	-0,16
Pr8	+0,01	+0,01	+0,06	-0,17	+0,06	+0,20
Pr9	-0,00	-0,00	-0,00	-20,74	+5,74	+2,89

Dabei sind prozentuale Unterschiede ab 5 % rot gekennzeichnet.

Tabelle 66: Berührprofile nach Ansatz 1 zu Berührprofilen nach Ansatz 2

	$\frac{Ra_{BP1}}{Ra_{BP2}} / \%$	$\frac{Rq_{BP1}}{Rq_{BP2}} / \%$	$\frac{Rz_{BP1}}{Rz_{BP2}} / \%$	$\frac{Rk_{BP1}}{Rk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rpk_{BP1}}{Rpk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rvk_{BP1}}{Rvk_{BP2}} / \%$
Pr1	+0,72	-0,44	-0,09	+2,38	+6,17	-2,56
Pr2	+0,05	+0,05	+1,27	+0,06	+1,90	+0,49
Pr3	+0,02	+0,10	+1,90	-0,55	+0,78	+1,28
Pr4	-0,01	-0,06	+0,50	+0,28	-0,20	-0,22
Pr5	+0,81	+0,54	+0,80	+1,89	+0,14	-1,27
Pr6	+0,01	-0,03	-0,10	-0,03	+0,09	-0,76
Pr7	-0,12	-0,11	-0,23	-0,19	+0,09	-1,16
Pr8	+0,01	+0,02	+0,27	-0,07	+0,02	+0,07
Pr9	+0,00	+0,01	+0,15	-20,74	-5,55	-3,25

Dabei sind prozentuale Unterschiede ab 5 % rot gekennzeichnet.

Tabelle 67: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 1

	$\frac{Ra_{MP1}}{Ra_{BP1}} / \%$	$\frac{Rq_{MP1}}{Rq_{BP1}} / \%$	$\frac{Rz_{MP1}}{Rz_{BP1}} / \%$	$\frac{Rk_{MP1}}{Rk_{BP1}} / \%$	$\frac{Rpk_{MP1}}{Rpk_{BP1}} / \%$	$\frac{Rvk_{MP1}}{Rvk_{BP1}} / \%$
Pr1	+1,02	+2,45	+1,15	+0,17	+11,16	+4,64
Pr2	-2,72	-4,40	+1,17	+0,30	+9,27	-6,89
Pr3	+1,20	+1,19	+1,68	+1,43	+5,74	-0,25
Pr4	+1,76	+1,89	+1,36	+1,74	+4,34	+0,70
Pr5	-0,99	-0,26	+1,50	+0,58	+5,90	-0,50
Pr6	-0,03	-0,35	-0,03	+0,18	+0,05	-6,80
Pr7	+1,15	+0,97	+0,01	-0,22	+3,12	-6,04
Pr8	+2,26	+2,07	+0,33	-0,35	+3,36	-3,21
Pr9	+1,85	+1,57	+0,18	+0,12	+2,05	-4,41

Dabei sind prozentuale Unterschiede ab 5 % rot gekennzeichnet.

Tabelle 68: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 2

	$\frac{Ra_{MP2}}{Ra_{BP2}} / \%$	$\frac{Rq_{MP2}}{Rq_{BP2}} / \%$	$\frac{Rz_{MP2}}{Rz_{BP2}} / \%$	$\frac{Rk_{MP2}}{Rk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rpk_{MP2}}{Rpk_{BP2}} / \%$	$\frac{Rvk_{MP2}}{Rvk_{BP2}} / \%$
Pr1	+0,90	+2,01	+0,28	+0,25	+7,71	+5,69
Pr2	-2,68	-4,34	+0,03	+0,19	+7,49	-6,83
Pr3	+1,10	+1,08	+0,76	+1,40	+5,74	-0,39
Pr4	+1,65	+1,77	+0,60	+1,50	+4,34	+1,12
Pr5	-0,94	-0,22	+0,69	+0,70	+5,90	-0,56
Pr6	-0,03	-0,32	+0,07	+0,21	-0,01	-6,29
Pr7	+1,16	+0,97	+0,04	-0,31	+3,08	-4,80
Pr8	+2,24	+2,04	+0,00	-0,11	+3,28	-3,46
Pr9	+1,85	+1,53	+0,03	-0,10	+1,87	-4,07

Dabei sind prozentuale Unterschiede ab 5 % rot gekennzeichnet.

Referenzkennwerte und Messergebnisse der Proben 1 – 9 für die Methode D für die Messeinstellungen ME 1 – ME 4.

Tabelle 69: Referenzkennwerte Probe 1

Referenzkennwerte Probe 1					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
0,009 \pm 0,001	0,013 \pm 0,005	0,058 \pm 0,021	0,029 \pm 0,003	0,014 \pm 0,012	0,013 \pm 0,008

Tabelle 70: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,007 \pm 0,059	0,009 \pm 0,062	0,047 \pm 0,073	0,021 \pm 0,066	0,009 \pm 0,067	0,012 \pm 0,063
2	0,013 \pm 0,059	0,022 \pm 0,062	0,085 \pm 0,073	0,035 \pm 0,066	0,038 \pm 0,067	0,027 \pm 0,063
3	0,011 \pm 0,059	0,014 \pm 0,062	0,060 \pm 0,073	0,036 \pm 0,066	0,014 \pm 0,067	0,013 \pm 0,063
4	0,011 \pm 0,059	0,013 \pm 0,062	0,055 \pm 0,073	0,036 \pm 0,066	0,009 \pm 0,067	0,012 \pm 0,063

Tabelle 71: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,009 \pm 0,064	0,011 \pm 0,069	0,054 \pm 0,134	0,026 \pm 0,084	0,009 \pm 0,067	0,015 \pm 0,106
2	0,100 \pm 0,064	0,130 \pm 0,069	0,486 \pm 0,134	0,228 \pm 0,084	0,059 \pm 0,067	0,345 \pm 0,106
3	0,007 \pm 0,064	0,009 \pm 0,069	0,039 \pm 0,134	0,023 \pm 0,084	0,007 \pm 0,067	0,010 \pm 0,106
4	0,007 \pm 0,064	0,009 \pm 0,069	0,038 \pm 0,134	0,021 \pm 0,084	0,008 \pm 0,067	0,010 \pm 0,106

Tabelle 72: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,007 \pm 0,059	0,009 \pm 0,061	0,048 \pm 0,072	0,021 \pm 0,066	0,011 \pm 0,066	0,011 \pm 0,063
2	0,010 \pm 0,059	0,012 \pm 0,061	0,054 \pm 0,072	0,034 \pm 0,066	0,011 \pm 0,066	0,009 \pm 0,063
3	0,009 \pm 0,059	0,011 \pm 0,061	0,046 \pm 0,072	0,030 \pm 0,066	0,008 \pm 0,066	0,010 \pm 0,063
4	0,009 \pm 0,059	0,011 \pm 0,061	0,045 \pm 0,072	0,031 \pm 0,066	0,007 \pm 0,066	0,009 \pm 0,063

Tabelle 73: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,010 \pm 0,059	0,012 \pm 0,061	0,058 \pm 0,072	0,032 \pm 0,066	0,010 \pm 0,066	0,014 \pm 0,063
2	0,007 \pm 0,059	0,009 \pm 0,061	0,041 \pm 0,072	0,024 \pm 0,066	0,007 \pm 0,066	0,009 \pm 0,063
3	0,008 \pm 0,059	0,010 \pm 0,061	0,044 \pm 0,072	0,026 \pm 0,066	0,008 \pm 0,066	0,011 \pm 0,063
4	0,008 \pm 0,059	0,010 \pm 0,061	0,044 \pm 0,072	0,025 \pm 0,066	0,007 \pm 0,066	0,012 \pm 0,063

Tabelle 74: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,010 \pm 0,059	0,013 \pm 0,061	0,065 \pm 0,072	0,029 \pm 0,066	0,018 \pm 0,066	0,010 \pm 0,063
2	0,015 \pm 0,059	0,018 \pm 0,061	0,083 \pm 0,072	0,049 \pm 0,066	0,020 \pm 0,066	0,011 \pm 0,063
3	0,014 \pm 0,059	0,019 \pm 0,061	0,071 \pm 0,072	0,043 \pm 0,066	0,019 \pm 0,066	0,020 \pm 0,063
4	0,012 \pm 0,059	0,014 \pm 0,061	0,059 \pm 0,072	0,041 \pm 0,066	0,008 \pm 0,066	0,010 \pm 0,063

Tabelle 75: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,017 \pm 0,059	0,022 \pm 0,061	0,096 \pm 0,072	0,056 \pm 0,066	0,017 \pm 0,066	0,022 \pm 0,063
2	0,009 \pm 0,059	0,011 \pm 0,061	0,050 \pm 0,072	0,030 \pm 0,066	0,012 \pm 0,066	0,010 \pm 0,063
3	0,009 \pm 0,059	0,012 \pm 0,061	0,050 \pm 0,072	0,029 \pm 0,066	0,011 \pm 0,066	0,011 \pm 0,063
4	0,009 \pm 0,059	0,011 \pm 0,061	0,050 \pm 0,072	0,030 \pm 0,066	0,010 \pm 0,066	0,011 \pm 0,063

Tabelle 76: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,019 \pm 0,059	0,024 \pm 0,061	0,110 \pm 0,072	0,058 \pm 0,066	0,031 \pm 0,066	0,017 \pm 0,063
2	0,025 \pm 0,059	0,031 \pm 0,061	0,135 \pm 0,072	0,082 \pm 0,066	0,035 \pm 0,066	0,016 \pm 0,063
3	0,014 \pm 0,059	0,018 \pm 0,061	0,079 \pm 0,072	0,045 \pm 0,066	0,017 \pm 0,066	0,016 \pm 0,063
4	0,016 \pm 0,059	0,019 \pm 0,061	0,083 \pm 0,072	0,053 \pm 0,066	0,015 \pm 0,066	0,017 \pm 0,063

Tabelle 77: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,053 \pm 0,060	0,065 \pm 0,063	0,301 \pm 0,083	0,170 \pm 0,066	0,071 \pm 0,066	0,037 \pm 0,064
2	0,014 \pm 0,060	0,018 \pm 0,063	0,078 \pm 0,083	0,047 \pm 0,066	0,012 \pm 0,066	0,021 \pm 0,064
3	0,111 \pm 0,060	0,130 \pm 0,063	0,435 \pm 0,083	0,379 \pm 0,066	0,064 \pm 0,066	0,052 \pm 0,064
4	0,016 \pm 0,060	0,020 \pm 0,063	0,084 \pm 0,083	0,049 \pm 0,066	0,016 \pm 0,066	0,024 \pm 0,064

Tabelle 78: Referenzkennwerte Probe 2

Referenzkennwert Probe 2					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
0,19 \pm 0,08	0,32 \pm 0,21	2,34 \pm 1,17	0,44 \pm 0,03	0,21 \pm 0,03	0,65 \pm 0,54

Tabelle 79: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,17 \pm 0,12	0,27 \pm 0,27	2,17 \pm 1,42	0,46 \pm 0,09	0,25 \pm 0,09	0,47 \pm 0,65
2	0,17 \pm 0,12	0,26 \pm 0,27	2,00 \pm 1,42	0,45 \pm 0,09	0,23 \pm 0,09	0,45 \pm 0,65
3	0,25 \pm 0,12	0,41 \pm 0,27	3,34 \pm 1,42	0,62 \pm 0,09	0,70 \pm 0,09	0,45 \pm 0,65
4	0,16 \pm 0,12	0,26 \pm 0,27	1,90 \pm 1,42	0,42 \pm 0,09	0,20 \pm 0,09	0,47 \pm 0,65

Tabelle 80: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,18 \pm 0,12	0,27 \pm 0,27	2,12 \pm 1,40	0,47 \pm 0,08	0,23 \pm 0,08	0,47 \pm 0,65
2	0,17 \pm 0,12	0,26 \pm 0,27	1,99 \pm 1,40	0,46 \pm 0,08	0,21 \pm 0,08	0,47 \pm 0,65
3	0,18 \pm 0,12	0,27 \pm 0,27	2,15 \pm 1,40	0,47 \pm 0,08	0,35 \pm 0,08	0,40 \pm 0,65
4	0,16 \pm 0,12	0,24 \pm 0,27	1,72 \pm 1,40	0,40 \pm 0,08	0,17 \pm 0,08	0,44 \pm 0,65

Tabelle 81: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,18 \pm 0,12	0,28 \pm 0,27	2,25 \pm 1,43	0,48 \pm 0,09	0,23 \pm 0,09	0,50 \pm 0,66
2	0,18 \pm 0,12	0,28 \pm 0,27	2,31 \pm 1,43	0,46 \pm 0,09	0,24 \pm 0,09	0,50 \pm 0,66
3	0,33 \pm 0,12	0,55 \pm 0,27	4,63 \pm 1,43	0,77 \pm 0,09	1,00 \pm 0,09	0,55 \pm 0,66
4	0,17 \pm 0,12	0,51 \pm 0,27	1,92 \pm 1,43	0,42 \pm 0,09	0,20 \pm 0,09	0,49 \pm 0,66

Tabelle 82: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,17 \pm 0,12	0,27 \pm 0,27	2,12 \pm 1,42	0,47 \pm 0,08	0,23 \pm 0,09	0,45 \pm 0,66
2	0,17 \pm 0,12	0,27 \pm 0,27	2,03 \pm 1,42	0,46 \pm 0,08	0,22 \pm 0,09	0,47 \pm 0,66
3	0,18 \pm 0,12	0,31 \pm 0,27	2,49 \pm 1,42	0,47 \pm 0,08	0,40 \pm 0,09	0,48 \pm 0,66
4	0,16 \pm 0,12	0,28 \pm 0,27	1,93 \pm 1,42	0,42 \pm 0,08	0,20 \pm 0,09	0,48 \pm 0,66

Tabelle 83: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,17 \pm 0,13	0,25 \pm 0,27	2,05 \pm 1,45	0,46 \pm 0,11	0,23 \pm 0,11	0,43 \pm 0,66
2	0,20 \pm 0,10	0,32 \pm 0,25	2,51 \pm 1,36	0,52 \pm 0,07	0,35 \pm 0,07	0,52 \pm 0,63
3	0,52 \pm 0,10	0,80 \pm 0,25	5,82 \pm 1,36	1,21 \pm 0,07	1,56 \pm 0,07	0,68 \pm 0,63
4	0,17 \pm 0,10	0,26 \pm 0,25	1,91 \pm 1,36	0,44 \pm 0,07	0,24 \pm 0,07	0,49 \pm 0,63

Tabelle 84: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,18 \pm 0,13	0,28 \pm 0,27	2,10 \pm 1,43	0,46 \pm 0,12	0,23 \pm 0,12	0,53 \pm 0,66
2	0,18 \pm 0,13	0,27 \pm 0,27	1,90 \pm 1,43	0,48 \pm 0,12	0,22 \pm 0,12	0,51 \pm 0,66
3	0,37 \pm 0,13	0,51 \pm 0,27	3,33 \pm 1,43	0,96 \pm 0,12	0,90 \pm 0,12	0,51 \pm 0,66
4	0,16 \pm 0,13	0,24 \pm 0,27	1,57 \pm 1,43	0,41 \pm 0,12	0,20 \pm 0,12	0,48 \pm 0,66

Tabelle 85: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,19 \pm 0,13	0,29 \pm 0,27	2,27 \pm 1,45	0,47 \pm 0,11	0,24 \pm 0,11	0,55 \pm 0,67
2	0,25 \pm 0,13	0,37 \pm 0,27	3,12 \pm 1,45	0,66 \pm 0,11	0,49 \pm 0,11	0,60 \pm 0,67
3	0,76 \pm 0,13	1,11 \pm 0,27	7,06 \pm 1,45	1,61 \pm 0,11	2,26 \pm 0,11	0,82 \pm 0,67
4	0,19 \pm 0,13	0,30 \pm 0,27	2,21 \pm 1,45	0,48 \pm 0,11	0,29 \pm 0,11	0,57 \pm 0,67

Tabelle 86: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,17 \pm 0,12	0,24 \pm 0,27	1,83 \pm 1,39	0,46 \pm 0,09	0,22 \pm 0,09	0,41 \pm 0,65
2	0,17 \pm 0,12	0,23 \pm 0,27	1,64 \pm 1,39	0,48 \pm 0,09	0,26 \pm 0,09	0,36 \pm 0,65
3	0,41 \pm 0,12	0,56 \pm 0,27	3,45 \pm 1,39	1,06 \pm 0,09	1,03 \pm 0,09	0,36 \pm 0,65
4	0,16 \pm 0,12	0,23 \pm 0,27	1,50 \pm 1,39	0,44 \pm 0,09	0,26 \pm 0,09	0,35 \pm 0,65

Tabelle 87: Referenzkennwerte Probe 3

Referenzkennwerte Probe 3					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
0,71 \pm 0,05	0,90 \pm 0,07	4,78 \pm 0,56	2,20 \pm 0,22	0,78 \pm 0,17	1,07 \pm 0,20

Tabelle 88: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,69 \pm 0,10	0,87 \pm 0,13	4,65 \pm 0,73	2,19 \pm 0,27	0,70 \pm 0,25	1,07 \pm 0,28
2	0,69 \pm 0,10	0,87 \pm 0,13	4,59 \pm 0,73	2,20 \pm 0,27	0,68 \pm 0,25	1,06 \pm 0,28
3	0,78 \pm 0,10	1,02 \pm 0,13	6,29 \pm 0,73	2,41 \pm 0,27	1,35 \pm 0,25	1,07 \pm 0,28
4	0,68 \pm 0,10	0,86 \pm 0,13	4,45 \pm 0,73	2,13 \pm 0,27	0,71 \pm 0,25	1,05 \pm 0,28

Tabelle 89: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,69 \pm 0,10	0,88 \pm 0,13	4,74 \pm 0,80	2,11 \pm 0,28	0,74 \pm 0,26	1,09 \pm 0,30
2	0,69 \pm 0,10	0,89 \pm 0,13	4,77 \pm 0,80	2,10 \pm 0,28	0,77 \pm 0,26	1,15 \pm 0,30
3	0,85 \pm 0,10	1,15 \pm 0,13	7,14 \pm 0,80	2,44 \pm 0,28	1,79 \pm 0,26	1,22 \pm 0,30
4	0,68 \pm 0,10	0,87 \pm 0,13	4,44 \pm 0,80	2,04 \pm 0,28	0,76 \pm 0,26	1,14 \pm 0,30

Tabelle 90: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,70 \pm 0,11	0,89 \pm 0,13	4,69 \pm 0,78	2,22 \pm 0,27	0,74 \pm 0,27	1,06 \pm 0,28
2	0,71 \pm 0,11	0,91 \pm 0,13	4,93 \pm 0,78	2,24 \pm 0,27	0,80 \pm 0,27	1,10 \pm 0,28
3	0,98 \pm 0,11	1,38 \pm 0,13	9,00 \pm 0,78	2,77 \pm 0,27	2,51 \pm 0,27	1,16 \pm 0,28
4	0,69 \pm 0,11	1,35 \pm 0,13	4,51 \pm 0,78	2,17 \pm 0,27	0,69 \pm 0,27	1,11 \pm 0,28

Tabelle 91: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,70 \pm 0,10	0,88 \pm 0,12	4,63 \pm 0,71	2,17 \pm 0,26	0,74 \pm 0,25	1,07 \pm 0,28
2	0,70 \pm 0,10	0,89 \pm 0,12	4,65 \pm 0,71	2,23 \pm 0,26	0,73 \pm 0,25	1,05 \pm 0,28
3	0,74 \pm 0,10	0,94 \pm 0,12	5,26 \pm 0,71	2,34 \pm 0,26	1,01 \pm 0,25	1,03 \pm 0,28
4	0,69 \pm 0,10	0,86 \pm 0,12	4,33 \pm 0,71	2,18 \pm 0,26	0,69 \pm 0,25	1,03 \pm 0,28

Tabelle 92: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,70 \pm 0,11	0,89 \pm 0,13	4,65 \pm 0,77	2,18 \pm 0,28	0,72 \pm 0,26	1,08 \pm 0,30
2	0,72 \pm 0,11	0,91 \pm 0,13	5,11 \pm 0,77	2,26 \pm 0,28	0,85 \pm 0,26	1,06 \pm 0,30
3	1,19 \pm 0,11	1,70 \pm 0,13	10,44 \pm 0,77	3,22 \pm 0,28	3,23 \pm 0,26	1,13 \pm 0,30
4	0,70 \pm 0,11	0,89 \pm 0,13	4,65 \pm 0,77	2,20 \pm 0,28	0,81 \pm 0,26	1,10 \pm 0,30

Tabelle 93: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,72 \pm 0,11	0,91 \pm 0,14	4,77 \pm 0,78	2,25 \pm 0,28	0,78 \pm 0,27	1,05 \pm 0,29
2	0,72 \pm 0,11	0,90 \pm 0,14	4,59 \pm 0,78	2,25 \pm 0,28	0,77 \pm 0,27	1,09 \pm 0,29
3	0,96 \pm 0,11	1,24 \pm 0,14	6,94 \pm 0,78	2,83 \pm 0,28	1,64 \pm 0,27	1,22 \pm 0,29
4	0,71 \pm 0,11	0,89 \pm 0,14	4,38 \pm 0,78	2,22 \pm 0,28	0,72 \pm 0,27	1,08 \pm 0,29

Tabelle 94: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,69 \pm 0,12	0,86 \pm 0,15	4,55 \pm 0,88	2,13 \pm 0,31	0,80 \pm 0,31	1,00 \pm 0,33
2	0,73 \pm 0,12	0,94 \pm 0,15	5,34 \pm 0,88	2,27 \pm 0,31	0,98 \pm 0,31	1,04 \pm 0,33
3	1,52 \pm 0,12	2,06 \pm 0,15	11,05 \pm 0,88	3,81 \pm 0,31	3,85 \pm 0,31	1,18 \pm 0,33
4	0,69 \pm 0,12	0,86 \pm 0,15	4,35 \pm 0,88	2,14 \pm 0,31	0,77 \pm 0,31	1,01 \pm 0,33

Tabelle 95: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,71 \pm 0,10	0,89 \pm 0,13	4,60 \pm 0,80	2,31 \pm 0,28	0,76 \pm 0,26	0,93 \pm 0,30
2	0,71 \pm 0,10	0,89 \pm 0,13	4,50 \pm 0,80	2,31 \pm 0,28	0,75 \pm 0,26	0,99 \pm 0,30
3	1,00 \pm 0,10	1,29 \pm 0,13	6,81 \pm 0,80	3,09 \pm 0,28	1,76 \pm 0,26	1,09 \pm 0,30
4	0,71 \pm 0,10	0,90 \pm 0,13	4,30 \pm 0,80	2,27 \pm 0,28	0,72 \pm 0,26	1,06 \pm 0,30

Tabelle 96: Referenzkennwerte Probe 4

Referenzkennwerte Probe 4					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
1,10 \pm 0,08	1,39 \pm 0,13	7,26 \pm 0,62	3,52 \pm 0,33	1,41 \pm 0,46	1,34 \pm 0,26

Tabelle 97: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,08 \pm 0,13	1,38 \pm 0,18	7,41 \pm 0,87	3,43 \pm 0,57	1,51 \pm 0,59	1,39 \pm 0,36
2	1,06 \pm 0,13	1,34 \pm 0,18	7,28 \pm 0,87	3,46 \pm 0,57	1,39 \pm 0,59	1,25 \pm 0,36
3	1,29 \pm 0,13	1,71 \pm 0,18	10,79 \pm 0,87	3,92 \pm 0,57	2,68 \pm 0,59	1,35 \pm 0,36
4	1,05 \pm 0,13	1,32 \pm 0,18	6,90 \pm 0,87	3,37 \pm 0,57	1,27 \pm 0,59	1,25 \pm 0,36

Tabelle 98: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,07 \pm 0,13	1,33 \pm 0,19	6,99 \pm 0,83	3,52 \pm 0,58	1,22 \pm 0,58	1,28 \pm 0,35
2	1,05 \pm 0,13	1,31 \pm 0,19	6,80 \pm 0,81	3,41 \pm 0,58	1,24 \pm 0,58	1,24 \pm 0,35
3	1,31 \pm 0,13	1,78 \pm 0,19	10,95 \pm 0,81	3,96 \pm 0,58	2,92 \pm 0,58	1,34 \pm 0,35
4	1,05 \pm 0,13	1,32 \pm 0,19	6,80 \pm 0,81	3,42 \pm 0,58	1,31 \pm 0,58	1,25 \pm 0,35

Tabelle 99: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,06 \pm 0,13	1,34 \pm 0,19	7,12 \pm 0,81	3,45 \pm 0,57	1,30 \pm 0,59	1,32 \pm 0,36
2	1,08 \pm 0,13	1,38 \pm 0,19	7,23 \pm 0,81	3,40 \pm 0,57	1,58 \pm 0,59	1,37 \pm 0,36
3	1,36 \pm 0,13	1,84 \pm 0,19	11,73 \pm 0,81	4,09 \pm 0,57	2,93 \pm 0,59	1,39 \pm 0,36
4	1,04 \pm 0,13	1,80 \pm 0,19	6,80 \pm 0,81	3,36 \pm 0,57	1,26 \pm 0,59	1,28 \pm 0,36

Tabelle 100: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,07 \pm 0,13	1,36 \pm 0,18	7,25 \pm 0,84	3,45 \pm 0,57	1,33 \pm 0,59	1,33 \pm 0,35
2	1,04 \pm 0,13	1,31 \pm 0,18	6,90 \pm 0,84	3,38 \pm 0,57	1,28 \pm 0,59	1,28 \pm 0,35
3	1,20 \pm 0,13	1,59 \pm 0,18	9,88 \pm 0,84	3,69 \pm 0,57	2,49 \pm 0,59	1,27 \pm 0,35
4	1,03 \pm 0,13	1,30 \pm 0,18	6,75 \pm 0,84	3,33 \pm 0,57	1,35 \pm 0,59	1,24 \pm 0,35

Tabelle 101: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,07 \pm 0,14	1,34 \pm 0,20	7,12 \pm 0,96	3,42 \pm 0,61	1,29 \pm 0,60	1,27 \pm 0,36
2	1,09 \pm 0,14	1,37 \pm 0,20	7,40 \pm 0,96	3,48 \pm 0,61	1,35 \pm 0,60	1,30 \pm 0,36
3	1,89 \pm 0,14	2,62 \pm 0,20	15,45 \pm 0,96	5,11 \pm 0,61	4,89 \pm 0,60	1,62 \pm 0,36
4	1,06 \pm 0,14	1,35 \pm 0,20	7,33 \pm 0,96	3,36 \pm 0,61	1,42 \pm 0,60	1,34 \pm 0,36

Tabelle 102: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,08 \pm 0,14	1,35 \pm 0,19	7,05 \pm 0,87	3,61 \pm 0,60	1,31 \pm 0,58	1,20 \pm 0,36
2	1,06 \pm 0,14	1,33 \pm 0,19	6,97 \pm 0,87	3,48 \pm 0,60	1,29 \pm 0,58	1,26 \pm 0,36
3	1,47 \pm 0,14	1,95 \pm 0,19	10,67 \pm 0,87	4,33 \pm 0,60	2,97 \pm 0,58	1,47 \pm 0,36
4	1,04 \pm 0,14	1,31 \pm 0,19	6,68 \pm 0,87	3,35 \pm 0,60	1,34 \pm 0,58	1,22 \pm 0,36

Tabelle 103: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,06 \pm 0,14	1,35 \pm 0,20	7,14 \pm 0,95	3,42 \pm 0,60	1,43 \pm 0,59	1,23 \pm 0,35
2	1,06 \pm 0,14	1,33 \pm 0,20	6,81 \pm 0,95	3,39 \pm 0,60	1,35 \pm 0,59	1,23 \pm 0,35
3	1,34 \pm 0,14	1,74 \pm 0,20	10,14 \pm 0,95	4,13 \pm 0,60	2,49 \pm 0,59	1,26 \pm 0,35
4	1,04 \pm 0,14	1,31 \pm 0,20	6,70 \pm 0,95	3,26 \pm 0,60	1,22 \pm 0,59	1,28 \pm 0,35

Tabelle 104: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,07 \pm 0,14	1,34 \pm 0,20	6,99 \pm 0,93	3,41 \pm 0,61	1,34 \pm 0,60	1,29 \pm 0,37
2	1,08 \pm 0,14	1,36 \pm 0,20	6,90 \pm 0,93	3,41 \pm 0,61	1,25 \pm 0,60	1,42 \pm 0,37
3	1,61 \pm 0,14	2,07 \pm 0,20	10,69 \pm 0,93	4,81 \pm 0,61	2,91 \pm 0,60	1,49 \pm 0,37
4	1,06 \pm 0,14	1,33 \pm 0,20	6,76 \pm 0,93	3,42 \pm 0,61	1,33 \pm 0,60	1,23 \pm 0,37

Tabelle 105: Referenzkennwerte Probe 5

Referenzkennwerte Probe 5					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
1,56 \pm 0,65	2,12 \pm 0,83	12,32 \pm 3,94	4,13 \pm 1,79	1,94 \pm 0,58	3,71 \pm 1,46

Tabelle 106: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,93 \pm 0,90	2,60 \pm 1,15	14,43 \pm 5,39	5,41 \pm 1,42	2,22 \pm 0,82	4,35 \pm 1,99
2	1,92 \pm 0,90	2,59 \pm 1,15	14,55 \pm 5,39	5,49 \pm 1,42	2,23 \pm 0,82	4,40 \pm 1,99
3	1,93 \pm 0,90	2,61 \pm 1,15	15,14 \pm 5,39	5,51 \pm 1,42	2,38 \pm 0,82	4,35 \pm 1,99
4	1,90 \pm 0,90	2,55 \pm 1,15	14,29 \pm 5,39	5,44 \pm 1,42	1,98 \pm 0,82	4,25 \pm 1,99

Tabelle 107: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,11 \pm 0,93	2,80 \pm 1,18	15,07 \pm 5,46	5,91 \pm 1,43	2,49 \pm 0,81	4,61 \pm 2,24
2	2,11 \pm 0,93	2,80 \pm 1,18	15,16 \pm 5,46	5,86 \pm 1,43	2,57 \pm 0,81	4,59 \pm 2,24
3	2,13 \pm 0,93	2,86 \pm 1,18	16,07 \pm 5,46	5,98 \pm 1,43	2,83 \pm 0,81	4,71 \pm 2,24
4	2,11 \pm 0,93	2,83 \pm 1,18	15,09 \pm 5,46	5,84 \pm 1,43	2,40 \pm 0,81	4,80 \pm 2,24

Tabelle 108: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,70 \pm 0,89	2,27 \pm 1,12	12,81 \pm 5,22	4,76 \pm 1,39	2,11 \pm 0,82	3,68 \pm 1,95
2	1,72 \pm 0,89	2,31 \pm 1,12	13,21 \pm 5,22	4,86 \pm 1,39	2,23 \pm 0,82	3,75 \pm 1,95
3	3,12 \pm 0,89	4,36 \pm 1,12	24,46 \pm 5,22	7,79 \pm 1,39	7,98 \pm 0,82	4,00 \pm 1,95
4	1,66 \pm 0,89	4,19 \pm 1,12	12,68 \pm 5,22	4,72 \pm 1,39	2,08 \pm 0,82	3,66 \pm 1,95

Tabelle 109: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,97 \pm 0,91	2,65 \pm 1,15	14,74 \pm 5,38	5,60 \pm 1,42	2,25 \pm 0,81	4,45 \pm 2,10
2	1,93 \pm 0,91	2,60 \pm 1,15	14,26 \pm 5,38	5,45 \pm 1,42	2,25 \pm 0,81	4,41 \pm 2,10
3	2,02 \pm 0,91	2,74 \pm 1,15	16,38 \pm 5,38	5,78 \pm 1,42	3,07 \pm 0,81	4,27 \pm 2,10
4	1,95 \pm 0,91	2,63 \pm 1,15	14,45 \pm 5,38	5,60 \pm 1,42	2,33 \pm 0,81	4,36 \pm 2,10

Tabelle 110: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,09 \pm 0,94	2,76 \pm 1,20	15,04 \pm 5,51	5,97 \pm 1,62	2,28 \pm 0,88	4,62 \pm 2,15
2	2,10 \pm 0,94	2,78 \pm 1,20	14,99 \pm 5,51	6,09 \pm 1,62	2,29 \pm 0,88	4,61 \pm 2,15
3	3,22 \pm 0,94	4,40 \pm 1,20	25,53 \pm 5,51	8,93 \pm 1,62	6,84 \pm 0,88	4,62 \pm 2,15
4	2,11 \pm 0,94	2,80 \pm 1,20	15,12 \pm 5,51	6,03 \pm 1,62	2,45 \pm 0,88	4,64 \pm 2,15

Tabelle 111: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,91 \pm 0,94	2,54 \pm 1,20	14,36 \pm 5,72	5,62 \pm 1,52	2,32 \pm 0,90	4,10 \pm 2,19
2	1,92 \pm 0,94	2,56 \pm 1,20	14,29 \pm 5,72	5,48 \pm 1,52	2,37 \pm 0,90	4,18 \pm 2,19
3	1,87 \pm 0,94	2,53 \pm 1,20	14,72 \pm 5,72	5,34 \pm 1,52	2,62 \pm 0,90	4,09 \pm 2,19
4	1,86 \pm 0,94	2,48 \pm 1,20	13,61 \pm 5,72	5,29 \pm 1,52	2,16 \pm 0,90	4,17 \pm 2,19

Tabelle 112: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,13 \pm 0,84	1,55 \pm 1,07	9,90 \pm 5,09	3,20 \pm 2,31	1,63 \pm 0,76	2,51 \pm 1,88
2	1,17 \pm 0,84	1,60 \pm 1,07	10,14 \pm 5,09	3,34 \pm 2,31	1,62 \pm 0,76	2,52 \pm 1,88
3	2,68 \pm 0,84	3,59 \pm 1,07	19,94 \pm 5,09	6,72 \pm 2,31	6,08 \pm 0,76	3,09 \pm 1,88
4	1,14 \pm 0,84	1,56 \pm 1,07	9,57 \pm 5,09	3,23 \pm 2,31	1,52 \pm 0,76	2,59 \pm 1,88

Tabelle 113: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,46 \pm 0,79	3,15 \pm 1,00	16,38 \pm 4,77	7,62 \pm 0,83	2,65 \pm 0,78	4,13 \pm 1,77
2	2,47 \pm 0,79	3,15 \pm 1,00	15,95 \pm 4,77	7,69 \pm 0,83	2,64 \pm 0,78	4,05 \pm 1,77
3	2,58 \pm 0,79	3,34 \pm 1,00	18,95 \pm 4,77	7,82 \pm 0,83	3,25 \pm 0,78	4,40 \pm 1,77
4	2,45 \pm 0,79	3,14 \pm 1,00	15,80 \pm 4,77	7,56 \pm 0,83	2,73 \pm 0,78	4,20 \pm 1,77

Tabelle 114: Referenzkennwerte Probe 6

Referenzkennwerte Probe 6					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
0,16 \pm 0,01	0,19 \pm 0,01	0,83 \pm 0,09	0,50 \pm 0,06	0,17 \pm 0,03	0,11 \pm 0,04

Tabelle 115: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,92 \pm 0,16	0,47 \pm 0,08	0,15 \pm 0,08	0,18 \pm 0,10
2	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,89 \pm 0,16	0,47 \pm 0,08	0,17 \pm 0,08	0,16 \pm 0,10
3	0,15 \pm 0,06	0,18 \pm 0,06	0,75 \pm 0,16	0,47 \pm 0,08	0,14 \pm 0,08	0,18 \pm 0,10
4	0,15 \pm 0,06	0,18 \pm 0,06	0,74 \pm 0,16	0,48 \pm 0,08	0,13 \pm 0,08	0,13 \pm 0,10

Tabelle 116: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,83 \pm 0,15	0,52 \pm 0,08	0,14 \pm 0,08	0,13 \pm 0,09
2	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,81 \pm 0,15	0,52 \pm 0,08	0,15 \pm 0,08	0,14 \pm 0,09
3	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,78 \pm 0,15	0,51 \pm 0,08	0,14 \pm 0,08	0,13 \pm 0,09
4	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,75 \pm 0,15	0,51 \pm 0,08	0,13 \pm 0,08	0,13 \pm 0,09

Tabelle 117: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,89 \pm 0,15	0,47 \pm 0,08	0,16 \pm 0,08	0,15 \pm 0,09
2	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,85 \pm 0,15	0,48 \pm 0,08	0,17 \pm 0,08	0,14 \pm 0,09
3	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,84 \pm 0,15	0,49 \pm 0,08	0,15 \pm 0,08	0,18 \pm 0,09
4	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,76 \pm 0,15	0,48 \pm 0,08	0,15 \pm 0,08	0,13 \pm 0,09

Tabelle 118: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,17 \pm 0,06	0,21 \pm 0,07	0,96 \pm 0,15	0,54 \pm 0,08	0,20 \pm 0,08	0,18 \pm 0,10
2	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,07	0,80 \pm 0,15	0,52 \pm 0,08	0,14 \pm 0,08	0,14 \pm 0,10
3	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,07	0,75 \pm 0,15	0,52 \pm 0,08	0,13 \pm 0,08	0,12 \pm 0,10
4	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,07	0,78 \pm 0,15	0,52 \pm 0,08	0,15 \pm 0,08	0,14 \pm 0,10

Tabelle 119: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,16 \pm 0,07	0,19 \pm 0,10	0,86 \pm 0,26	0,49 \pm 0,09	0,16 \pm 0,22	0,13 \pm 0,29
2	0,15 \pm 0,07	0,18 \pm 0,10	0,79 \pm 0,26	0,46 \pm 0,09	0,14 \pm 0,22	0,10 \pm 0,29
3	0,16 \pm 0,07	0,19 \pm 0,10	0,83 \pm 0,26	0,51 \pm 0,09	0,18 \pm 0,22	0,10 \pm 0,29
4	0,15 \pm 0,07	0,18 \pm 0,10	0,76 \pm 0,26	0,48 \pm 0,09	0,14 \pm 0,22	0,14 \pm 0,29

Tabelle 120: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,15 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,84 \pm 0,14	0,50 \pm 0,08	0,14 \pm 0,08	0,15 \pm 0,09
2	0,15 \pm 0,06	0,18 \pm 0,06	0,78 \pm 0,14	0,50 \pm 0,08	0,14 \pm 0,08	0,13 \pm 0,09
3	0,15 \pm 0,06	0,18 \pm 0,06	0,71 \pm 0,14	0,50 \pm 0,08	0,12 \pm 0,08	0,12 \pm 0,09
4	0,16 \pm 0,06	0,18 \pm 0,06	0,73 \pm 0,14	0,51 \pm 0,08	0,13 \pm 0,08	0,12 \pm 0,09

Tabelle 121: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,16 \pm 0,06	0,20 \pm 0,07	0,85 \pm 0,16	0,54 \pm 0,09	0,13 \pm 0,08	0,16 \pm 0,10
2	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,07	0,79 \pm 0,16	0,52 \pm 0,09	0,15 \pm 0,08	0,11 \pm 0,10
3	0,17 \pm 0,06	0,21 \pm 0,07	0,88 \pm 0,16	0,55 \pm 0,09	0,19 \pm 0,08	0,10 \pm 0,10
4	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,07	0,80 \pm 0,16	0,53 \pm 0,09	0,13 \pm 0,08	0,15 \pm 0,10

Tabelle 122: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,16 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	0,90 \pm 0,15	0,48 \pm 0,09	0,17 \pm 0,08	0,19 \pm 0,09
2	0,15 \pm 0,06	0,18 \pm 0,06	0,75 \pm 0,15	0,47 \pm 0,09	0,14 \pm 0,08	0,12 \pm 0,09
3	0,15 \pm 0,06	0,18 \pm 0,06	0,71 \pm 0,15	0,47 \pm 0,09	0,13 \pm 0,08	0,12 \pm 0,09
4	0,15 \pm 0,06	0,18 \pm 0,06	0,68 \pm 0,15	0,47 \pm 0,09	0,13 \pm 0,08	0,09 \pm 0,09

Tabelle 123: Referenzkennwerte Probe 7

Referenzkennwerte Probe 7					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
0,57 \pm 0,02	0,69 \pm 0,02	2,81 \pm 0,12	1,41 \pm 0,08	1,05 \pm 0,07	0,40 \pm 0,16

Tabelle 124: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,56 \pm 0,07	0,68 \pm 0,07	2,79 \pm 0,19	1,42 \pm 0,13	1,03 \pm 0,13	0,33 \pm 0,23
2	0,56 \pm 0,07	0,68 \pm 0,07	2,79 \pm 0,19	1,42 \pm 0,13	1,03 \pm 0,13	0,38 \pm 0,23
3	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,07	2,75 \pm 0,19	1,33 \pm 0,13	1,12 \pm 0,13	0,39 \pm 0,23
4	0,57 \pm 0,07	0,68 \pm 0,07	2,63 \pm 0,19	1,40 \pm 0,13	1,06 \pm 0,13	0,31 \pm 0,23

Tabelle 125: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,07	2,82 \pm 0,20	1,35 \pm 0,13	1,08 \pm 0,13	0,53 \pm 0,26
2	0,58 \pm 0,07	0,70 \pm 0,07	2,90 \pm 0,20	1,46 \pm 0,13	1,04 \pm 0,13	0,47 \pm 0,26
3	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,07	2,66 \pm 0,20	1,45 \pm 0,13	1,02 \pm 0,13	0,38 \pm 0,26
4	0,58 \pm 0,07	0,70 \pm 0,07	2,71 \pm 0,20	1,49 \pm 0,13	1,00 \pm 0,13	0,37 \pm 0,26

Tabelle 126: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,56 \pm 0,07	0,68 \pm 0,07	2,88 \pm 0,20	1,43 \pm 0,13	1,02 \pm 0,13	0,45 \pm 0,23
2	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,07	2,79 \pm 0,20	1,42 \pm 0,13	1,06 \pm 0,13	0,37 \pm 0,23
3	0,58 \pm 0,07	0,70 \pm 0,07	2,77 \pm 0,20	1,46 \pm 0,13	1,04 \pm 0,13	0,35 \pm 0,23
4	0,57 \pm 0,07	0,70 \pm 0,07	2,70 \pm 0,20	1,44 \pm 0,13	1,03 \pm 0,13	0,38 \pm 0,23

Tabelle 127: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,07	2,83 \pm 0,19	1,46 \pm 0,13	1,03 \pm 0,13	0,43 \pm 0,23
2	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,07	2,76 \pm 0,19	1,42 \pm 0,13	1,02 \pm 0,13	0,43 \pm 0,23
3	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,07	2,65 \pm 0,19	1,41 \pm 0,13	1,06 \pm 0,13	0,37 \pm 0,23
4	0,57 \pm 0,07	0,68 \pm 0,07	2,58 \pm 0,19	1,38 \pm 0,13	1,07 \pm 0,13	0,27 \pm 0,23

Tabelle 128: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,10	2,86 \pm 0,32	1,36 \pm 0,14	1,05 \pm 0,13	0,42 \pm 0,55
2	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,10	2,81 \pm 0,32	1,41 \pm 0,14	1,04 \pm 0,13	0,35 \pm 0,55
3	0,58 \pm 0,07	0,70 \pm 0,10	2,92 \pm 0,32	1,49 \pm 0,14	0,99 \pm 0,13	0,43 \pm 0,55
4	0,60 \pm 0,07	0,80 \pm 0,10	3,01 \pm 0,32	1,43 \pm 0,14	1,06 \pm 0,13	1,28 \pm 0,55

Tabelle 129: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,07	2,90 \pm 0,20	1,45 \pm 0,13	1,01 \pm 0,13	0,39 \pm 0,23
2	0,56 \pm 0,07	0,68 \pm 0,07	2,69 \pm 0,20	1,42 \pm 0,13	1,03 \pm 0,13	0,33 \pm 0,23
3	0,56 \pm 0,07	0,68 \pm 0,07	2,57 \pm 0,20	1,42 \pm 0,13	1,03 \pm 0,13	0,26 \pm 0,23
4	0,56 \pm 0,07	0,68 \pm 0,07	2,59 \pm 0,20	1,42 \pm 0,13	1,04 \pm 0,13	0,30 \pm 0,23

Tabelle 130: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,54 \pm 0,07	0,66 \pm 0,08	2,74 \pm 0,28	1,46 \pm 0,14	0,94 \pm 0,14	0,34 \pm 0,24
2	0,56 \pm 0,07	0,68 \pm 0,08	2,83 \pm 0,28	1,52 \pm 0,14	0,93 \pm 0,14	0,44 \pm 0,24
3	0,59 \pm 0,07	0,73 \pm 0,08	3,26 \pm 0,28	1,56 \pm 0,14	1,06 \pm 0,14	0,34 \pm 0,24
4	0,55 \pm 0,07	0,67 \pm 0,08	2,67 \pm 0,28	1,49 \pm 0,14	0,94 \pm 0,14	0,33 \pm 0,24

Tabelle 131: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	0,57 \pm 0,07	0,70 \pm 0,08	2,93 \pm 0,24	1,45 \pm 0,15	1,01 \pm 0,14	0,39 \pm 0,22
2	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,08	2,78 \pm 0,24	1,38 \pm 0,15	1,05 \pm 0,14	0,37 \pm 0,22
3	0,57 \pm 0,07	0,68 \pm 0,08	2,65 \pm 0,24	1,42 \pm 0,15	1,02 \pm 0,14	0,32 \pm 0,22
4	0,57 \pm 0,07	0,69 \pm 0,08	2,54 \pm 0,24	1,45 \pm 0,15	1,03 \pm 0,14	0,33 \pm 0,22

Tabelle 132: Referenzkennwerte Probe 8

Referenzkennwerte Probe 8					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
1,16 \pm 0,02	1,40 \pm 0,03	5,25 \pm 0,21	1,97 \pm 0,15	2,91 \pm 0,09	0,40 \pm 0,25

Tabelle 133: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,16 \pm 0,07	1,40 \pm 0,07	5,30 \pm 0,25	1,93 \pm 0,15	2,91 \pm 0,14	0,47 \pm 0,23
2	1,16 \pm 0,07	1,40 \pm 0,07	5,25 \pm 0,25	1,94 \pm 0,15	2,90 \pm 0,14	0,38 \pm 0,23
3	1,16 \pm 0,07	1,40 \pm 0,07	5,15 \pm 0,25	1,98 \pm 0,15	2,90 \pm 0,14	0,44 \pm 0,23
4	1,15 \pm 0,07	1,40 \pm 0,07	5,08 \pm 0,25	1,92 \pm 0,15	2,87 \pm 0,14	0,48 \pm 0,23

Tabelle 134: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,15 \pm 0,11	1,38 \pm 0,12	5,19 \pm 0,49	1,83 \pm 0,21	2,94 \pm 0,35	0,41 \pm 0,24
2	1,16 \pm 0,11	1,39 \pm 0,12	5,30 \pm 0,49	1,92 \pm 0,21	2,89 \pm 0,35	0,54 \pm 0,24
3	1,15 \pm 0,11	1,39 \pm 0,12	5,06 \pm 0,49	1,93 \pm 0,21	2,87 \pm 0,35	0,45 \pm 0,24
4	1,15 \pm 0,11	1,39 \pm 0,12	5,11 \pm 0,49	1,96 \pm 0,21	2,88 \pm 0,35	0,54 \pm 0,24

Tabelle 135: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,15 \pm 0,07	1,38 \pm 0,07	5,29 \pm 0,24	1,99 \pm 0,15	2,85 \pm 0,14	0,32 \pm 0,21
2	0,97 \pm 0,07	1,17 \pm 0,07	4,52 \pm 0,24	1,73 \pm 0,15	2,36 \pm 0,14	0,39 \pm 0,21
3	1,16 \pm 0,07	1,40 \pm 0,07	5,35 \pm 0,24	2,07 \pm 0,15	2,83 \pm 0,14	0,39 \pm 0,21
4	1,15 \pm 0,07	1,38 \pm 0,07	5,13 \pm 0,24	1,95 \pm 0,15	2,82 \pm 0,14	0,51 \pm 0,21

Tabelle 136: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,15 \pm 0,07	1,39 \pm 0,07	5,38 \pm 0,25	1,90 \pm 0,15	2,88 \pm 0,14	0,64 \pm 0,22
2	1,14 \pm 0,07	1,37 \pm 0,07	5,19 \pm 0,25	1,92 \pm 0,15	2,84 \pm 0,14	0,48 \pm 0,22
3	1,14 \pm 0,07	1,37 \pm 0,07	4,98 \pm 0,25	1,98 \pm 0,15	2,79 \pm 0,14	0,38 \pm 0,22
4	1,14 \pm 0,07	1,37 \pm 0,07	4,95 \pm 0,25	1,93 \pm 0,15	2,80 \pm 0,14	0,36 \pm 0,22

Tabelle 137: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,15 \pm 0,07	1,38 \pm 0,08	5,29 \pm 0,32	1,99 \pm 0,16	2,85 \pm 0,16	0,32 \pm 0,23
2	0,97 \pm 0,07	1,17 \pm 0,08	4,52 \pm 0,32	1,73 \pm 0,16	2,36 \pm 0,16	0,39 \pm 0,23
3	1,16 \pm 0,07	1,40 \pm 0,08	5,35 \pm 0,32	2,07 \pm 0,16	2,83 \pm 0,16	0,39 \pm 0,23
4	1,15 \pm 0,07	1,38 \pm 0,08	5,13 \pm 0,32	1,95 \pm 0,16	2,82 \pm 0,16	0,51 \pm 0,23

Tabelle 138: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,13 \pm 0,08	1,36 \pm 0,08	5,11 \pm 0,32	2,08 \pm 0,17	2,69 \pm 0,18	0,54 \pm 0,35
2	1,15 \pm 0,08	1,38 \pm 0,08	5,18 \pm 0,32	2,01 \pm 0,17	2,84 \pm 0,18	0,42 \pm 0,35
3	1,13 \pm 0,08	1,37 \pm 0,08	5,03 \pm 0,32	1,92 \pm 0,17	2,90 \pm 0,18	0,34 \pm 0,35
4	1,15 \pm 0,08	1,38 \pm 0,08	4,96 \pm 0,32	1,94 \pm 0,17	2,84 \pm 0,18	0,31 \pm 0,35

Tabelle 139: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	1,13 \pm 0,09	1,36 \pm 0,10	5,11 \pm 0,39	2,08 \pm 0,22	2,69 \pm 0,24	0,54 \pm 0,39
2	1,15 \pm 0,09	1,38 \pm 0,10	5,18 \pm 0,39	2,01 \pm 0,22	2,84 \pm 0,24	0,42 \pm 0,39
3	1,13 \pm 0,09	1,37 \pm 0,10	5,03 \pm 0,39	1,92 \pm 0,22	2,90 \pm 0,24	0,34 \pm 0,39
4	1,15 \pm 0,09	1,38 \pm 0,10	4,96 \pm 0,39	1,94 \pm 0,22	2,84 \pm 0,24	0,31 \pm 0,39

Tabelle 140: Referenzkennwerte Probe 9

Referenzkennwerte Probe 9					
Ra / μm	Rq / μm	Rz / μm	Rk / μm	Rpk / μm	Rvk / μm
2,13 \pm 0,02	2,50 \pm 0,02	8,95 \pm 0,17	2,84 \pm 0,14	5,39 \pm 0,09	0,55 \pm 0,15

Tabelle 141: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,07	9,08 \pm 0,25	2,82 \pm 0,15	5,39 \pm 0,14	0,65 \pm 0,23
2	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,07	8,97 \pm 0,25	2,87 \pm 0,15	5,36 \pm 0,14	0,52 \pm 0,23
3	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,07	8,78 \pm 0,25	2,84 \pm 0,15	5,38 \pm 0,14	0,46 \pm 0,23
4	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,07	8,82 \pm 0,25	2,85 \pm 0,15	5,40 \pm 0,14	0,51 \pm 0,23

Tabelle 142: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,14 \pm 0,11	2,51 \pm 0,12	8,96 \pm 0,49	2,84 \pm 0,21	5,41 \pm 0,35	0,56 \pm 0,24
2	1,89 \pm 0,11	2,21 \pm 0,12	7,75 \pm 0,49	2,44 \pm 0,21	4,54 \pm 0,35	0,66 \pm 0,24
3	2,14 \pm 0,11	2,51 \pm 0,12	8,75 \pm 0,49	2,76 \pm 0,21	5,48 \pm 0,35	0,51 \pm 0,24
4	2,13 \pm 0,11	2,50 \pm 0,12	8,73 \pm 0,49	2,83 \pm 0,21	5,40 \pm 0,35	0,45 \pm 0,24

Tabelle 143: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,12 \pm 0,07	2,49 \pm 0,07	9,02 \pm 0,24	2,82 \pm 0,15	5,36 \pm 0,14	0,53 \pm 0,21
2	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,07	9,00 \pm 0,24	2,78 \pm 0,15	5,44 \pm 0,14	0,51 \pm 0,21
3	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,07	8,83 \pm 0,24	2,72 \pm 0,15	5,48 \pm 0,14	0,46 \pm 0,21
4	2,12 \pm 0,07	2,50 \pm 0,07	8,83 \pm 0,24	2,83 \pm 0,15	5,36 \pm 0,14	0,53 \pm 0,21

Tabelle 144: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,07	8,89 \pm 0,25	2,93 \pm 0,15	5,33 \pm 0,14	0,49 \pm 0,22
2	2,13 \pm 0,07	2,49 \pm 0,07	8,82 \pm 0,25	2,88 \pm 0,15	5,33 \pm 0,14	0,60 \pm 0,22
3	2,14 \pm 0,07	2,50 \pm 0,07	8,79 \pm 0,25	2,91 \pm 0,15	5,35 \pm 0,14	0,58 \pm 0,22
4	2,12 \pm 0,07	2,49 \pm 0,07	8,73 \pm 0,25	2,92 \pm 0,15	5,32 \pm 0,14	0,48 \pm 0,22

Tabelle 145: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,08	9,01 \pm 0,32	2,80 \pm 0,16	5,44 \pm 0,16	0,53 \pm 0,23
2	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,08	8,88 \pm 0,32	2,82 \pm 0,16	5,40 \pm 0,16	0,52 \pm 0,23
3	2,16 \pm 0,07	2,54 \pm 0,08	9,59 \pm 0,32	2,95 \pm 0,16	5,41 \pm 0,16	0,56 \pm 0,23
4	2,12 \pm 0,07	2,49 \pm 0,08	8,94 \pm 0,32	2,97 \pm 0,16	5,28 \pm 0,16	0,59 \pm 0,23

Tabelle 146: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,11 \pm 0,07	2,48 \pm 0,08	8,89 \pm 0,27	2,85 \pm 0,15	5,32 \pm 0,16	0,43 \pm 0,22
2	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,08	8,93 \pm 0,27	2,88 \pm 0,15	5,35 \pm 0,16	0,56 \pm 0,20
3	2,13 \pm 0,07	2,50 \pm 0,08	8,69 \pm 0,27	2,84 \pm 0,15	5,38 \pm 0,16	0,45 \pm 0,20
4	2,12 \pm 0,07	2,49 \pm 0,08	8,70 \pm 0,27	2,85 \pm 0,15	5,35 \pm 0,16	0,53 \pm 0,20

Tabelle 147: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend

ME	U(Ra)/ μm	U(Rq)/ μm	U(Rz)/ μm	U(Rk)/ μm	U(Rpk)/ μm	U(Rvk)/ μm
1	2,13 \pm 0,10	2,50 \pm 0,10	9,07 \pm 0,40	2,88 \pm 0,18	5,36 \pm 0,22	0,61 \pm 0,22
2	2,13 \pm 0,10	2,50 \pm 0,10	8,89 \pm 0,40	2,86 \pm 0,18	5,41 \pm 0,22	0,55 \pm 0,22
3	2,10 \pm 0,10	2,47 \pm 0,10	8,69 \pm 0,40	2,74 \pm 0,18	5,42 \pm 0,22	0,48 \pm 0,22
4	2,10 \pm 0,10	2,48 \pm 0,10	8,59 \pm 0,40	2,81 \pm 0,18	5,36 \pm 0,22	0,46 \pm 0,22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: a) Bezugsflächentastsystem b) Pendeltastsystem c) Einkufentastsystem	6
Abbildung 2: Aufbau eines Tastschnittgeräts nach VDI 2602-2 [VDI 2602-2]	7
Abbildung 3: Komponenten und Messkreis eines Tastschnittgerätes nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274]	10
Abbildung 4: Normen von Messbedingungen bis zu den Kenngrößen	12
Abbildung 5: Profil einer Oberfläche und deren Spiegelbild nach [Bod92]	14
Abbildung 6: Konturenmessplatz mit Messkreis	15
Abbildung 7: Düsenkörper, Präzisionslager und Knieprothese [Mah15]	20
Abbildung 8: Reale Oberfläche – Mittelpunktprofil und Berührprofil	27
Abbildung 9: Bogenbewegung des Tasters	28
Abbildung 10: Darstellung der Neigungswinkel	29
Abbildung 11: Abtastung einer Stufe mit der Höhe Rz1 max nach Kranz [Kra80]	32
Abbildung 12: Darstellung der Verformungen für verschiedene Zustände	37
Abbildung 13: Taster auf schiefer Ebene im Soll- und Istzustand	42
Abbildung 14: Soll-Taststrecke l_t und Ist-Taststrecke l_t^*	44
Abbildung 15: Winkeländerung zwischen Tastelement und Vorschubgerät	45
Abbildung 16: Fallunterscheidung Taster auf Ebene; links Fall 1, rechts Fall 2	47
Abbildung 17: Geschwindigkeitsverlauf 10° fallend	49
Abbildung 18: Geschwindigkeitsverlauf 30° fallend	49
Abbildung 19: Geschwindigkeitsverlauf 45° fallend	50
Abbildung 20: Auswerteschema	52
Abbildung 21: Ansatz 1 und Ansatz 2	54
Abbildung 22: Probe 2, Mittelpunktprofil und Berührprofil, Ansatz 2	57
Abbildung 23: Probe 7, Mittelpunktprofil und Berührprofil, Ansatz 2	58
Abbildung 24: Normal R2, Rohprofile 0° und 45° abfallend	60
Abbildung 25: Kollision bei zu großem Neigungswinkel α	64
Abbildung 26: LS und TLS Methode	68
Abbildung 27: Probe 2, Ra für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	69

Abbildung 28: Probe 2, Rz für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	69
Abbildung 29: Probe 2, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	70
Abbildung 30: Probe 4, Rz für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	73
Abbildung 31: Probe 4, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	73
Abbildung 32: Probe 5, Ra für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	74
Abbildung 33: Probe 5, Rz für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	74
Abbildung 34: Probe 5, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	74
Abbildung 35: Probe 6, Ra für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	75
Abbildung 36: Probe 6, Rz für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	76
Abbildung 37: Probe 6, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	76
Abbildung 38: Probe 9, Ra für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	77
Abbildung 39: Probe 9, Rz für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	77
Abbildung 40: Probe 9, Rk für $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	77
Abbildung 41: Rohprofile Probe 2 bei $\alpha = 5^\circ$ ansteigend	80
Abbildung 42: Ausschnitt der Rohprofile Probe 2 bei $\alpha = 5^\circ$ ansteigend	80
Abbildung 43: Rohprofile Probe 2 bei $\alpha = 30^\circ$ ansteigend	81
Abbildung 44: Rohprofile Probe 2 bei $\alpha = 45^\circ$ abfallend	81
Abbildung 45: Rohprofil Probe 9 bei $\alpha = 0^\circ$	82
Abbildung 46: Rohprofile Probe 9 bei $\alpha = 5^\circ$ abfallend	83
Abbildung 47: Rohprofile Probe 9 bei $\alpha = 10^\circ$ abfallend	83
Abbildung 48: Rohprofile Probe 9 bei $\alpha = 30^\circ$ abfallend	84
Abbildung 49: Rohprofile Probe 9 bei $\alpha = 45^\circ$ abfallend	84
Abbildung 50: LS und TLS Methode im Vergleich nach Püschmann [Püs08]	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grenzwellenlänge λ_c , Profilfilter λ_s , Tastspitzenradius r und Profilpunktabstand P nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274].....	8
Tabelle 2: Grenzwellenlänge λ_c , Messstrecke l_m und Taststrecke l_t nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274].....	9
Tabelle 3: Gegenüberstellung der Rauheit- und Konturenmessung.....	17
Tabelle 4: Übersicht kombinierter Rauheits- und Konturenmessplätze [Jen09], [Mah12], [Zei12], [Tay12].....	18
Tabelle 5: Übersicht nanoscan 855 [Jen09].....	19
Tabelle 6: Verursacher von Unsicherheiten und Gegenmaßnahmen.....	22
Tabelle 7: Auszug aus Tabelle 3: Gegenüberstellung der Rauheit- und Konturenmessung und Rauheitsmessung auf Konturen.....	26
Tabelle 8: Einflussparameter bei der Rauheitsmessung auf Konturen.....	29
Tabelle 9: Übersicht der verwendeten technischen Oberflächen.....	30
Tabelle 10: Tastspitzenradius r nach DIN EN ISO 3274 [DIN 3274] und VDA 2006 [VDA 06].....	31
Tabelle 11: Ausgewählte Winkel α , erforderliche Mindestrauheiten $Rz1_{\max_{\min}}$ und maximale Abweichung $\Delta Rz1_{\max}$	33
Tabelle 12: $Rz1_{\max}$ bei $\alpha = 0^\circ$, kritische Winkel, Erfüllung oder Nichterfüllung der Bedingung $r \approx \leq 3 \cdot Rz1_{\max}$	33
Tabelle 13: Vorschubgeschwindigkeiten v und zugehörige Mindestantastkräfte $F_{a_{\min}}$	34
Tabelle 14: Abhebezeiten T , Abhebehöhen H und Abhebeweiten W für ausgewählte Vorschubgeschwindigkeiten v und Antastkräfte F_a	35
Tabelle 15: Materialien, Vickershärte H_v , Elastizitätsmodul E und Poissonzahl μ_p	39
Tabelle 16: Materialien, Verformungstiefe h_e und Eindrucktiefen h_p , h_{pv} und h_{pv}^* für die Antastkräfte $F_{a1}/F_{a2}/F_{a3}$	39
Tabelle 17: Auftretende Kräfte in x -Richtung.....	41
Tabelle 18: Einflussparameter bei der Rauheitsmessung auf Konturen, vollständig.....	42
Tabelle 19: Messeinstellungsübersicht für Normale (NME).....	43
Tabelle 20: Messeinstellungsübersicht für technische Oberflächen (TME).....	44
Tabelle 21: Maßnahmen beim Messverfahren.....	46

Tabelle 22: Methoden zur Ausrichtung und Interpolation	52
Tabelle 23: Mittelpunktprofile nach Ansatz 1 (λ_s nach Erosion).....	54
Tabelle 24: Mittelpunktprofile nach Ansatz 2 (λ_s vor Erosion).....	54
Tabelle 25: Berührprofile nach Ansatz 1 (λ_s nach Erosion)	54
Tabelle 26: Berührprofile nach Ansatz 2 (λ_s vor Erosion)	55
Tabelle 27: Mittelpunktprofile nach Ansatz 1 zu Mittelpunktprofilen nach Ansatz 2	55
Tabelle 28: Berührprofile nach Ansatz 1 zu Berührprofilen nach Ansatz 2	55
Tabelle 29: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 1	56
Tabelle 30: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 2	56
Tabelle 31: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 2, Probe 2 und 7.....	58
Tabelle 32: Einflüsse der Parameter	59
Tabelle 33: Taststrecken l_t der untersuchten Normale.....	60
Tabelle 34: Unterschiede der Messeinstellungen zu den Bezugsmesseinstellungen.....	63
Tabelle 35: Soll-Taststrecken l_t und Ist-Messstrecken l_m^* , Proben 1, 2, 5, 6 und 9, beide Messrichtungen, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	64
Tabelle 36: Soll-Taststrecke l_t , Abweichung von Ist-Messstrecke zu Soll-Taststrecke l_m^*/l_t , Proben 1, 2, 5, 6 und 9, beide Messrichtungen, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$	65
Tabelle 37: Messeinstellungsübersicht (ME) für die Hauptuntersuchungen	66
Tabelle 38: Neue Messstreckenwahl für die Hauptuntersuchungen.....	66
Tabelle 39: Abkürzung abhängig von Messrichtung und Auswertemethode	67
Tabelle 40: Referenzkennwerte der Probe 2	71
Tabelle 41: Probe 2, Methode B, $\alpha = 45^\circ$ ansteigend	71
Tabelle 42: Probe 2, Methode D, $\alpha = 45^\circ$ ansteigend.....	71
Tabelle 43: Probe 2, Methode B, $\alpha = 45^\circ$ abfallend	72
Tabelle 44: Probe 2, Methode D, $\alpha = 45^\circ$ abfallend	72
Tabelle 45: Referenzkennwerte der Probe 9	78
Tabelle 46: Probe 9, Methode B, $\alpha = 45^\circ$ abfallend	78
Tabelle 47: Probe 9, Methode D, $\alpha = 45^\circ$ abfallend	79
Tabelle 48: Einflüsse der Parameter, vollständig	85
Tabelle 49: $u(B2KNP)$ für alle Kennwerte und Proben.....	88

Tabelle 50: Unsicherheiten der Einflussgrößen	89
Tabelle 51: $u(\text{KNP})$ für alle Kennwerte und Proben.....	89
Tabelle 52: $s(\text{KN})$ bei jedem Winkel für Probe 5	90
Tabelle 53: $s(\text{KN})$ bei jedem Winkel für Probe 9	91
Tabelle 54: $u(\text{KN})$ bei jedem Winkel für Probe 5	91
Tabelle 55: $u(\text{KN})$ bei jedem Winkel für Probe 9	92
Tabelle 56: $U(\text{KN})$ bei jedem Winkel für Probe 5	92
Tabelle 57: $U(\text{KN})$ bei jedem Winkel für Probe 9	93
Tabelle 58: Vollständiges Messergebnis Probe 5, $\alpha = 45^\circ$ abfallend, Methode D	93
Tabelle 59: Vollständiges Messergebnis Probe 9, $\alpha = 45^\circ$ abfallend, Methode D	94
Tabelle 60: Vollständiges Messergebnis Probe 1, $\alpha = 45^\circ$ abfallend, Methode D	94
Tabelle 61: Mittelpunktprofile nach Ansatz 1 (λs nach Erosion)	102
Tabelle 62: Mittelpunktprofile nach Ansatz 2 (λs vor Erosion)	102
Tabelle 63: Berührprofile nach Ansatz 1 (λs nach Erosion).....	103
Tabelle 64: Berührprofile nach Ansatz 2 (λs vor Erosion).....	103
Tabelle 65: Mittelpunktprofile nach Ansatz 1 zu Mittelpunktprofilen nach Ansatz 2.....	104
Tabelle 66: Berührprofile nach Ansatz 1 zu Berührprofilen nach Ansatz 2.....	104
Tabelle 67: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 1	105
Tabelle 68: Mittelpunktprofile zu Berührprofilen nach Ansatz 2.....	105
Tabelle 69: Referenzkennwerte Probe 1	106
Tabelle 70: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend	106
Tabelle 71: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend	106
Tabelle 72: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend	106
Tabelle 73: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend	106
Tabelle 74: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend	107
Tabelle 75: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend	107
Tabelle 76: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend	107
Tabelle 77: Messergebnisse Probe 1 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend	107
Tabelle 78: Referenzkennwerte Probe 2.....	107

Tabelle 79: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend.....	107
Tabelle 80: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend.....	108
Tabelle 81: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend.....	108
Tabelle 82: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend.....	108
Tabelle 83: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend.....	108
Tabelle 84: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend.....	108
Tabelle 85: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend.....	108
Tabelle 86: Messergebnisse Probe 2 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend.....	109
Tabelle 87: Referenzkennwerte Probe 3.....	109
Tabelle 88: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend.....	109
Tabelle 89: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend.....	109
Tabelle 90: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend.....	109
Tabelle 91: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend.....	109
Tabelle 92: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend.....	110
Tabelle 93: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend.....	110
Tabelle 94: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend.....	110
Tabelle 95: Messergebnisse Probe 3 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend.....	110
Tabelle 96: Referenzkennwerte Probe 4.....	110
Tabelle 97: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend.....	110
Tabelle 98: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend.....	111
Tabelle 99: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend.....	111
Tabelle 100: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend.....	111
Tabelle 101: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend.....	111
Tabelle 102: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend.....	111
Tabelle 103: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend.....	111
Tabelle 104: Messergebnisse Probe 4 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend.....	112
Tabelle 105: Referenzkennwerte Probe 5.....	112
Tabelle 106: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend.....	112
Tabelle 107: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend.....	112

Tabelle 108: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend	112
Tabelle 109: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend.....	112
Tabelle 110: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend	113
Tabelle 111: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend	113
Tabelle 112: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend	113
Tabelle 113: Messergebnisse Probe 5 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend.....	113
Tabelle 114: Referenzkennwerte Probe 6.....	113
Tabelle 115: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend	114
Tabelle 116: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend	114
Tabelle 117: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend	114
Tabelle 118: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend.....	114
Tabelle 119: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend	114
Tabelle 120: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend	114
Tabelle 121: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend	115
Tabelle 122: Messergebnisse Probe 6 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend.....	115
Tabelle 123: Referenzkennwerte Probe 7.....	115
Tabelle 124: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend	115
Tabelle 125: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend	115
Tabelle 126: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend	115
Tabelle 127: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend.....	116
Tabelle 128: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend	116
Tabelle 129: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend	116
Tabelle 130: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ ansteigend	116
Tabelle 131: Messergebnisse Probe 7 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend.....	116
Tabelle 132: Referenzkennwerte Probe 8.....	116
Tabelle 133: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend.....	117
Tabelle 134: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend	117
Tabelle 135: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend	117
Tabelle 136: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend.....	117

Tabelle 137: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend	117
Tabelle 138: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend	117
Tabelle 139: Messergebnisse Probe 8 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend	118
Tabelle 140: Referenzkennwerte Probe 9	118
Tabelle 141: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ ansteigend	118
Tabelle 142: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ abfallend	118
Tabelle 143: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ ansteigend	118
Tabelle 144: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 10^\circ$ abfallend	118
Tabelle 145: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ ansteigend	119
Tabelle 146: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 30^\circ$ abfallend	119
Tabelle 147: Messergebnisse Probe 9 Neigungswinkel $\alpha = 45^\circ$ abfallend	119

Veröffentlichungen

Raid, I., Kusnezowa, T. u. Seewig, J.: Application of ordinary kriging for interpolation of micro-structured technical surfaces. *Measurement Science and Technology* 24 (2013) 9.

Raid, I., Eifler, M., Kusnezowa, T. u. Seewig, J.: Calibration of Ellipso-Height-Topometry with Nanoscale Gratings of Varying Materials. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Volume 126, Issue 23, December 2015, Pages 4591-4596.

Betreute studentische Arbeiten

Tchatchoua, J.: Auslegung eines autarken Prüfmoduls für die Luftdichtheitsprüfung von SX14- und M4-Ventilscheiben. Bachelorarbeit, 2011

Derichs, D.: Fähigkeitsüberprüfung von Farbmessgeräten. Studienarbeit, 2011

Miller, M.: Erzeugung von Hologrammen mit Hilfe von Laser und Hologrammplatten durch Transmissions- und Weißlichtmethode. Studienarbeit, 2012

Noppenberger, N.: Aufbau und Programmierung einer Prüfeinrichtung zur automatisierten Regelung und Leistungsmessung von Wirbelstrombremsen in Drehkurbelergometern. Diplomarbeit, 2012

Lichtenthal, M.: Kameraunterstützte Feinpositionierung für handgeführte Roboter. Diplomarbeit, 2012

Stockschläder, J.: Entwicklung von Sicherheitstechnik zur Mensch-Roboter Kollaboration am Anwendungsbeispiel InCarRob. Diplomarbeit, 2013

Gutsch, T.: Experimentelle Untersuchung möglicher Störeinflüsse auf einen AFM-Sensor im praxisorientierten Einsatz. Bachelorarbeit, 2013

Jung, K.: A system approach to improve header control on harvesting machines. Studienarbeit, 2014

Ranker, P.: Grundlagenstudie zur virtuellen industriellen Computertomographie. Bachelorarbeit, 2014

Hagedorn, C.: Entwicklung und Aufbau eines taktilen low-cost-Oberflächenmessgeräts und Einbindung in den berufsbezogenen Unterricht. Masterarbeit, 2015

Krings, S., Reise, P.: Entwurf und Aufbau der Sensorik, Aktorik und Steuerung eines autonom agierenden Tischfußballspiels. Projektarbeit, 2015

Wnuk, M.: Implementierung der Steuerung und Regelung der Aktorik eines autonom agierenden Tischfußballspiels. Studienarbeit, 2015

Illi, A.: Rauheit auf Konturen. Grundlagenuntersuchungen an gedrehten Normalen. Bachelorarbeit, 2016

Mayer, L.: Rauheit auf Konturen. Grundlagenuntersuchungen an geschliffenen Normalen. Bachelorarbeit, 2016

Keil, L.: Rauheit auf Konturen. Vergleichende Grundlagenuntersuchungen an Normalen. Studienarbeit, 2016

Literaturverzeichnis

- [Ber84] Berner, R., Lotze W.; Grundlagen der geometrischen Messtechnik, in Warnecke H.-J., Dutschke W., Grode H.-P.; Fertigungsmesstechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Unter Redaktion von H.-P. Grode, Berlin: Springer-Verlag, 1984, ISBN: 3540117849
- [Bod88] Bodschinna, H.: Funktionsgerechte Rauheitsbeschreibung. Technische Rundschau 28, 1988
- [Bod92] Bodschinna H., Hillmann W.; Oberflächenmesstechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis, DIN Deutsches Institut für Normung e.V, Beuth-Kommentare, Berlin: Beuth, 1992, ISBN: 3410126570
- [Brei00] Breitmeier U.; Oberflächen – vielseitig betrachtet, Überblick über aktuelle taktile und optische Form- und Rauheitsmesstechniken, in QZ Qualität und Zuverlässigkeit, 45 (2000) 9
- [Brü15] Brüggemann, H., Bremer P.; Grundlagen Qualitätsmanagement – Von Werkzeugen über Methoden zum TQM, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2015, ISBN: 9783658092207
- [Chr06] Christoph R., Neumann H. J.; Multisensor-Koordinatenmesstechnik, Maß- Form-, Lage- und Rauheitsmessung – optisch, taktil und röntgentomografisch, Bibliothek der Technik, Band 248, München: sv corporate media, 2006, ISBN: 9783937889511
- [DGQ91] Deutsche Gesellschaft für Qualität, Arbeitsgruppe Qualitätshandbuch; Qualitätssicherungs-Handbuch und Verfahrensanweisungen, Berlin: Beuth-Verlag; 1991, ISBN: 3410328297
- [Die07] Dietzsch M., König N., Schmitt R., Seewig J.; Sind taktile und optische Rauheitsmessungen vergleichbar?, Optische Messung technischer Oberflächen in der Praxis, Bestimmung von Geometrie und Topographie, VDI-Berichte, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2007
- [Die09] Dietrich E., Schulze A.; Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation, München: Hanser-Verlag, 2009, ISBN: 9783446415256
- [DIN 1101] DIN EN ISO 1101:2013, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101:2013)
- [DIN 3274] DIN EN ISO 3274:1997, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1997)

- [DIN 4287] DIN EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennung, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1998)
- [DIN 4288] DIN EN ISO 4288:1997, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4288:1997)
- [DIN 4760] DIN 4760:1982, Gestaltabweichungen – Begriffe Ordnungssystem (DIN 4760:1982)
- [DIN 4768] DIN 4768:1990, Ermittlung der Rauheitskenngrößen R_a , R_z , R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten – Begriffe Messbedingungen (DIN 4768:1990)
- [DIN 4776] DIN 4776:1990, Kenngrößen R_K , R_{PK} , R_{VK} , M_{r1} , M_{r2} zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil – Messbedingungen und Auswerteverfahren (DIN 4776:1990)
- [DIN 5436-1] DIN EN ISO 5436-1:2000, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale – Teil 1: Maßverkörperung (ISO 5436-1:2000)
- [DIN 8785] DIN EN ISO 8785:1999, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenunvollkommenheiten – Begriffe, Definitionen und Kenngrößen (ISO 8785:1999)
- [DIN 9000] DIN EN ISO 9000:2015, Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015)
- [DIN 9001] DIN EN ISO 9001:2015, Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015)
- [DIN 12085] DIN EN ISO 12085:1997, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Motifkenngrößen (ISO 12085:1997)
- [DIN 12179] DIN EN ISO 12179:2000, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Kalibrierung von Tastschnittverfahren (ISO 12179:2000)
- [DIN 13005] ENV 13005:1999, Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (ENV 13005:1999)
- [DIN 13565-1] DIN EN ISO 13565-1:1997, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen (ISO 13565-1:1997)

[DIN 13565-2] DIN EN ISO 13565-2:1997, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve (ISO 13565-2:1997)

[DIN 13565-3] DIN EN ISO 13565-3:2000, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 3: Beschreibung der Höhe von Oberflächen mit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve (ISO 13565-3:2000)

[DIN 14253-2] DIN EN ISO 14253-2:2011, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung (ISO 14253-2:2011)

[DIN 14660-1] DIN EN ISO 14660-1:1999, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrielemente – Teil 1: Grundbegriffe und Definitionen (ISO 14460-1:1999)

[DIN 16610-1] DIN EN ISO 16610-1:2012, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte (ISO/DIS 16610-1:2012)

[DIN 16610-21] DIN EN ISO 16610-21:2012, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-21:2012)

[DIN 16610-22] DIN EN ISO 16610-22:2012, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 22: Lineare Profilfilter: Spline-Filter (ISO/DIS 16610-22:2012)

[DIN 16610-28] DIN EN ISO 16610-28:2015, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 28: Profilfilter: Endeffekte (ISO/DIS 16610-28:2015)

[DIN 16610-41] DIN EN ISO 16610-41:2012, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 41: Morphologische Profilfilter: Filter mit Kreisscheibe und horizontaler Strecke (ISO/DIS 16610-41:2012)

[DIN 25178-1] DIN EN ISO 25178-1:2013, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 1: Eintragungen von Oberflächenbeschaffenheit (ISO/DIS 25178-1:2013)

[DIN 25178-2] DIN EN ISO 25178-2:2012, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2:2012)

[DIN 25178-3] DIN EN ISO 25178-3:2012, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 3: Spezifikationsoperatoren (ISO 25178-3:2012)

- [DIN 25178-6] DIN EN ISO 25178-6:2010, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 6: Klassifizierung von Methoden zur Messung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 25178-6:2010)
- [DIN 25178-70] DIN EN ISO 25178-70:2011, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 70: Maßverkörperungen (ISO/DIS 25178-70:2011)
- [DIN 25178-701] DIN EN ISO 25178-701:2010, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 701: Kalibrierung und Normale für berührend messende Geräte (mit Taster) (ISO/DIS 25178-701:2010)
- [DKD 4-2-1] Richtlinie Deutscher Kalibrierdienst, Kalibrieren von Messgeräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Blatt 1: Kalibrieren von Normalen für die Rauheitsmesstechnik, 2003-11
- [DKD 4-2-2] Richtlinie Deutscher Kalibrierdienst, Kalibrieren von Messgeräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Blatt 2: Kalibrieren des vertikalen Messsystems von Tastschnittgeräten, 2007-11
- [DKD 4-2-3] Richtlinie Deutscher Kalibrierdienst, Kalibrieren von Geräten und Normalen für die Rauheitsmesstechnik – Blatt 3: Kalibrierung von Normalen mit periodischen Profilen in horizontaler Richtung mit Tastschnittgeräten, 2011-07
- [Dut02] Dutschke W.; Fertigungsmesstechnik, Stuttgart: Teubner-Verlag, 2002, ISBN: 3519363224
- [Hal10a] Halle Präzision-Kalibriernormale GmbH, Abnahmeprotokoll, KNT 4058/01, Klasse A, Stufe 1, Fabrikat.-Nummer: 5694, 2010
- [Hal10b] Halle Präzision-Kalibriernormale GmbH, Abnahmeprotokoll, KNT 4058/01, Klasse A, Stufe 2, Fabrikat.-Nummer: 5682, 2010
- [Hal11a] Halle Präzision-Kalibriernormale GmbH, Abnahmeprotokoll, KNT 4070/03, Klasse A, Stufe 1, Fabrikat.-Nummer: 5996, 2011
- [Hal11b] Halle Präzision-Kalibriernormale GmbH, Abnahmeprotokoll, KNT 4070/03, Klasse A, Stufe 2, Fabrikat.-Nummer: 5990, 2011
- [Hal11c] Halle Präzision-Kalibriernormale GmbH, Abnahmeprotokoll, KNT 4070/03, Klasse A, Stufe 3, Fabrikat.-Nummer: 5989, 2011
- [Hal14] Halle Präzision-Kalibriernormale GmbH, Kalibriernormale für Tastschnittgeräte entsprechend PTB-Normalen, KNT 4070/03, Technische Daten, Blatt Nr. 6.1, 2014
- [Har09] Hartlieb B., Kiehl P., Müller, N.; Normung und Standardisierung, Berlin: Beuth-Verlag, 2009, ISBN: 9783410171133

- [Hen02] Henzold G.; Anwendung der Normen über Form- und Lagetoleranzen in der Praxis, Berlin: Beuth-Verlag, 2002, ISBN: 3410151400
- [Hen71] Henzold G.; Rauheitsmessung mit elektrischen Tastschnittgeräten, Normheft 12, Berlin: Beuth-Vertrieb GmbH, 1971
- [Hen84] Henzold, G; Oberflächenmaß, in Warnecke H.-J., Dutschke W., Grode H.-P.; Fertigungsmesstechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Unter Redaktion von H.-P. Grode, Berlin: Springer-Verlag, 1984, ISBN: 3540117849
- [Hil89] Hillmann, W.; Bericht über einen Vergleich von Rauheitsmessungen, PTB-Bericht, Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1989, ISBN: 01790609
- [Hil91] Hillmann, W.; Kommentar zur Richtlinie zum Kalibrieren von Tastschnittgeräten im Deutschen Kalibrierdienst /1/, PTB-Bericht, Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1991, ISBN: 01790609
- [Imk12] Imkamp D., Schmitt, R. Berthold J.; Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik, in tm Technisches Messen, 79 (2012) 10
- [Jen09] Jenoptik AG; Hommel-Etamic nanoscan 855 – Rauheits- und Konturenmessung mit höchster Präzision, Broschüre, 2009
- [Ked13] Kedziora H.-J.; Messung von Rauheit auf Konturen, VDI-Fachtagung, Form- und Konturenmesstechnik 2013, Leonberg: VDI Wissensforum GmbH, 2013
- [Kef15] Keferstein C. P., Marxer M.; Fertigungsmesstechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg-Verlag; 2015, ISBN 9783834825827
- [Kle11] Klein B.; Versuchsplanung – DoE, Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik, München: Oldenbourg-Verlag, 2011, ISBN: 9783486706840
- [Kra80] Kranz O.; Untersuchungen des Abtastvorganges bei der Rauheitsmessung, PTB-Bericht, Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1980, ISSN 03416720
- [Kry12] Krystek M.; Berechnung der Messunsicherheit – Grundlagen und Anleitung für die praktische Anwendung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012
- [Kun84] Kunzmann, H; Grundlagen der Messtechnik; Begriffe Einheiten, in Warnecke H.-J., Dutschke W., Grode H.-P.; Fertigungsmesstechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Unter Redaktion von H.-P. Grode, Berlin: Springer-Verlag, 1984, ISBN: 3540117849
- [Mah12] Mahr GmbH Göttingen, Marsurf LD 130 / Marsurf LD 260 – Kombinierte Konturen- und Rauheitsmessungen, Broschüre, 2012

- [Mah15] Mahr GmbH, Fertigungsmesstechnik Anwendungen, <http://www.mahr.de/de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Anwendungen/>, Abruf 01.06.2015
- [Müh12] Mühl T.; Einführung in die elektrische Messtechnik, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012, ISBN: 9783835101890
- [OIC14] OICA, Anzahl der weltweit produzierten Personenkraftwagen (Pkw) in den Jahren 1998 bis 2014, <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/159780/umfrage/weltweit-jaehrlich-hergestellte-pkw/>, Abruf 15.02.2016
- [Pfe10] Pfeifer T., Schmitt R.; Fertigungsmesstechnik, München: Oldenbourg-Verlag, 2010, ISBN: 9783486592023
- [Püs08] Püschmann D.; Hochpräzise fertigungsnahe Konturmesstechnik am Beispiel asphärischer Linsen, Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover, Hannover: Shaker Verlag, 2008, ISBN: 9783832276386
- [Sac06] Sachs L., Hedderich J.; Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R, Berlin: Springer-Verlag, 2006, ISBN: 9783540321606
- [San99] Sandau M.; Sicherheit der Bestimmung von Messergebnissen in der Fertigungsmesstechnik, Ein Beitrag zur präventiven Fehlervermeidung in der Produktionstechnik, Magdeburg, 1999
- [Sch15] Schäfer P.; Modellbasierte Entwicklung pneumatischer Abstandssensoren für prozessintegrierte Messungen, Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, Band 2, Kaiserslautern, 2015
- [See04] Seewig, J., Hercke, T. Rau, N., et al.; Dominant Waveiness – a practice oriented procedure for waviness evaluation, XI. International Colloquium on Surfaces, Proceedings, Band 2, Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2004
- [See11] Seewig, J., Wiehr, C., Gröger, S.; Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen. Stand der Oberflächenmesstechnik heute. Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2011. Messprinzipien – Messgeräte – Anwendungen; 4. Fachtagung, Erlangen, 25. und 26. Oktober 2011, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011
- [Str14] Ströer F., Seewig J., Depiereux F.; Vergleichbare Ergebnisse, Rauheitsmessung taktil oder optisch?, QZ Qualität und Zuverlässigkeit 59 (2014) 5
- [Tay12] Taylor Hobson, Form Talysurf PGI 400/800/1200 – Ultra precision surface form and finish measurement system, Broschüre, 2012

- [Tut06] Tutsch R.; Fertigungsmesstechnik, in Gevatter H.-J., Grünhaupt U.; Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion, Berlin: Springer-Verlag, 2006, ISBN: 3540212078
- [VDA 06] VDA-Empfehlung 2006, Geometrische Produktspezifikation – Oberflächenbeschaffenheit – Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, 2006-07
- [VDA 07] VDA-Empfehlung 2007, Geometrische Produktspezifikation – Oberflächenbeschaffenheit – Definitionen und Kenngrößen der dominanten Welligkeit, 2007-02
- [VDI 2601] VDI/VDE-Richtlinie 2601, Anforderungen an die Oberflächengestalt zur Sicherung der Funktionstauglichkeit spanend hergestellter Flächen – Zusammenstellung der Kenngrößen, 1991-10
- [VDI 2602] VDI/VDE-Richtlinie 2602, Rauheitsmessung mit elektrischen Tastschnittgeräten, 1983-09
- [VDI 2602-2] VDI/VDE-Richtlinie 2602-2, Rauheitsmessung mit elektrischen Tastschnittgeräten – Tastschnittverfahren – Blatt 2: Aufbau, Messbedingungen, Durchführung, 2008-10
- [VDI 2602-4] VDI/VDE-Richtlinie 2602-4, Oberflächenprüfung – Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten – Blatt 4: Kalibrierung, Messunsicherheit, 2013-12
- [VDI 2627-1] VDI/VDE-Richtlinie 2627-1, Messräume – Blatt 1: Klassifizierung und Kenngrößen – Planung und Ausführung, 1998-08
- [VDI 2629-1] VDI/VDE-Richtlinie 2629-1, Genauigkeit von Konturenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Blatt 1: Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Konturenmessgeräte nach dem taktilen Tastschnittverfahren, 2008-08
- [VDI 2629-2] VDI/VDE-Richtlinie 2629-2, Genauigkeit von Konturenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Blatt 2: Ermittlung der Unsicherheit von spezifischen Konturenmessungen mit Normalen/kalibrierten Werkstücken, 2012-06
- [VIM10] DIN Deutsches Institut für Normung; Internationales Wörterbuch der Metrologie – Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010, ISBN: 9783410200703
- [Vol13] Volk, R.; Rauheitsmessung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013, ISBN: 9783410238829
- [Vol14] Volk, R., Feifel S.; Full scale calibration of a combined tactile contour and roughness measurement device, Key Engineering Materials, Vol. 613, 2014

- [Win10] Winker P.; Empirische Wirtschaftsforschung und Ökonometrie, Berlin: Springer-Verlag, 2010, ISBN: 9783642145063
- [Wit13] Wittel H., Muhs D., Jannasch D., Voßiek J.; Roloff/Matek Maschinenelemente – Normung Berechnung Gestaltung, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2013, ISBN: 9783658023263
- [Zei12] Carl Zeiss 3D Metrology Services GmbH, Oberflächen-, Kontur- und Formmessgeräte, Broschüre, 2012

Lebenslauf

Tatjana Kusnezowa

geboren in Moskau

Beruflicher Werdegang

Feb. 2010 – Mai 2016	Technische Universität Kaiserslautern Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik Wissenschaftliche Mitarbeiterin
-------------------------	--

Schule und Studium

Okt 2003 – Dez. 2009	Technische Universität Kaiserslautern Studium der Umweltverfahrenstechnik Abschluss: Diplom-Ingenieurin
Mär. 2003	Nikolaus-von-Weis-Gymnasium Speyer Abitur