

**Beitrag zur geometrischen Beschreibung  
mechanisch bearbeiteter Stahloberflächen  
bezugnehmend auf den funktionalen  
Zusammenhang zum Haftreibwert**

vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau

zur Verleihung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**Dissertation**

von Frau Dipl.-Ing. Saskia Schiefer

aus Annaberg-Buchholz

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Roland Ulber

Prüfungsvorsitzender: Jun. Prof. Dr.-Ing. Stefan Thielen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig

Prof. Dr.-Ing. Marco Gerlach

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler

Tag der Einreichung: 18.11.2022

Tag der Verteidigung: 06.07.2023

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Trainerin und Consultant für die Q-DAS GmbH in Kooperation mit der HS Mittweida und der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau. Die Basis der Forschungsdaten bildete das Forschungsclusters GECKO während meiner Zeit als wissenschaftlichen Tätigkeit an der Professur Fertigungsmesstechnik an der TU Chemnitz.

An dieser Stelle danke ich meinen Doktorvätern Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Seewig und Herrn Professor Dr.-Ing. Marco Gerlach für die Betreuung meiner Arbeit.

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Marco Gerlach für die jahrelange und uneingeschränkte Unterstützung, die unzähligen fachlichen Diskussionen während der Zeit an der TU Chemnitz als Teilprojektleiter im Rahmen des GECKO-Projektes und vor allem für die motivierende, offene Art in unzähligen Gesprächen aussprechen. Dies hat maßgeblich zum Entstehen und Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig danke ich für die Betreuung meiner Arbeit sowie für das entgegengebrachte Vertrauen und die Flexibilität beim Anfertigen der Dissertation, die mit diesem Vorhaben in der Konstellation verbunden war.

Zudem bedanke ich mich auch herzlichst bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler für seine Unterstützung und die Übernahme des Gutachtens.

Herrn Jun. Prof. Dr.-Ing. Stefan Thielen gilt ebenfalls mein Dank für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Besonderen Dank möchte ich Herrn Dr.-Ing. Gunter Effenberger zukommen lassen. Sein professioneller und kompetenter Rat, seine mehr als 35-jährige Erfahrung auf dem Gebiet der Tolerierung und der Fertigungsmesstechnik, an der er mich stets teilhaben lies, trugen maßgeblich zur Weiterentwicklung des Fachinhaltes und meiner persönlichen Fähigkeiten bei.

Herrn Roman Wenig und Herrn Frank Stockhaus danke ich für ihre fachliche Unterstützung und Grundlagenausbildung im Fachbereich der Statistik. Die vielen Gespräche und die konstruktiven Diskussionen führten zu einer neuen Qualität meiner Forschungen.

Ich danke allen meinen ehemaligen Kollegen der Professur Fertigungsmesstechnik, studentischen Hilfskräften und Verfassern der studentischen Arbeiten für die Anregungen, Denkanstöße, der Weitergabe ihres fundierten messtechnischen Wissens und der Erforschung meiner Teilideen.

Ich bedanke mich bei meinen derzeitigen Kolleginnen, Kollegen sowie Wegbegleitern und Freunden für ihren uneingeschränkten Beistand, die anregenden und kreativen Gespräche, sowie die großartigen Erinnerungen.

Meinen Eltern möchte ich für die jahrelange bedingungslose Unterstützung, warmen Worte und fortwährende Ermutigung während des gesamten Promotionsvorhabens danken.

Meinem Mann Martin gilt an dieser Stelle ein besonderer Dank für die seelische und moralische Beistand, permanente Motivation, Zuspruch und den starken Rückhalt.

Chemnitz, Dezember 2023

## Kurzreferat

Die funktionale Wechselwirkung zwischen geometrischen Oberflächeneigenschaften und dem daraus resultierenden Haftreibungswert wird in der vorliegenden Arbeit anhand von mechanisch bearbeiteten Stahloberflächen untersucht. Dabei wird der Fokus neben einer umfangreichen Analyse der Einflussfaktoren auf die Oberflächencharakterisierung gelegt. Basierend auf Drückversuchen und der Untersuchung der Oberflächendeformation wird eine Methode zur funktional relevanten Beschreibung der Oberfläche entwickelt. Die am Haftreibungswert beteiligten Oberflächenanteile sind durch die Parameter Inselanzahl, projizierte Durchschnittsoberfläche und Durchschnittsmaterialvolumen beschrieben. Diese Kenngrößen fließen in eine mathematische Berechnung eines theoretischen Haftreibungswertes ein. Es werden der theoretisch errechnete und der aus einer statistischen Versuchsreihe ermittelte Haftreibungswert miteinander verglichen. Statistische Untersuchungen sowie die Aufstellung eines Messunsicherheitsbilanz stützen die Forschungsergebnisse. Damit leistet diese Arbeit nicht nur einen Beitrag zur funktionsorientierten Oberflächenbeschreibung, sondern auch zur methodischen Korrelations-/Regressionsanalyse und zur Integration geometrischer Oberflächenparameter in Haftreibungswertuntersuchungen.

## Summary

The present paper will investigate the functional correlation between surface properties and the resulting friction coefficient on mechanical machined steel surfaces. Besides an extensive examination of influencing factors, the focus will be on surface characterisation. Therefore, pressure tests and investigations of surface deformations are the base for a method of a functional surface description. The surface parts that influence friction coefficient are described as the parameters of number of islands, their average surface (referred to the average of the mean surface) and their average material volume. These parameters will be integrated in a mathematical calculation of a theoretical friction coefficient. The theoretically calculated friction coefficient is going to be compared to the friction coefficient found out in statistical test. Statistical analysis as well as erection of a measurement uncertainty balance will back up the research results. Hence, the paper is not only an input for a functional surface characterisation, but rather it represents a systematic correlation/ regression analysis and an integration of geometric surface parameters into friction coefficient investigations.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat.....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VIII
Kurzzeichenverzeichnis .....	X
1 Einleitung .....	1
1.1 Zusammenhang zwischen Funktion, Fertigung und Fertigungsmesstechnik .....	1
1.2 Problematik der Oberflächencharakterisierung.....	2
1.3 Zielstellung.....	3
2 Stand der Forschung.....	4
2.1 Charakterisierung von Gestaltabweichungen .....	4
2.1.1 Messtechnische Erfassung von Geometrieelementen .....	5
2.1.1.1 Mechanische Filterung.....	6
2.1.1.2 Optische Filterung .....	7
2.1.1.3 Erfassung der Form- und Lageabweichungen .....	7
2.1.1.4 Erfassung der Oberflächentopographie .....	8
2.1.2 Filterung.....	9
2.1.2.1 Gauß .....	9
2.1.2.2 Morphologische Filter .....	11
2.1.3 Zuordnung messtechnischer Kenngrößen.....	12
2.1.3.1 Kenngrößen für Form- und Lageabweichungen.....	13
2.1.3.2 Oberflächenkenngrößen – 2D.....	13
2.1.3.3 Oberflächenkenngrößen – 3D.....	15
2.1.3.4 Softwaregestützte Analysemethoden.....	18
2.1.3.5 Ansätze zur funktionalen Oberflächencharakterisierung .....	20
2.2 Messunsicherheit .....	24
2.3 Tribologische Grundlagen .....	27
2.3.1 Grundlagen der Reibung .....	28
2.3.2 Ansätze in der Kontaktmechanik.....	28
2.3.3 Ansätze zur Ermittlung der Kontaktfläche.....	31
2.3.4 Festkörperreibung .....	33
2.3.4.1 Deformationskomponente.....	33
2.3.4.2 Adhäsionskomponente .....	34
2.3.5 Haftreibwertermittlung und der Bewertungsansatz nach SCHULLER.....	34

---

3	Lösungsansatz.....	37
4	Identifizierung und Spezifizierung von Einflussgrößen mit Wirkung auf die Haftreibwertbestimmung .....	39
4.1	Qualitative Erfassung funktionsrelevanter Einflüsse anhand des Ursache-Wirkungs-Diagramms.....	39
4.2	Semiquantitative Bewertung der Einflussfaktoren.....	41
4.3	Messunsicherheitsbetrachtung und Eignungsnachweis für den Prozess der Haftreibwertermittlung .....	44
5	Theoretische Vorgehensweise zur geometrischen und funktionalen Bewertung ....	50
5.1	Konzept zur geometrisch funktionalen Bewertung.....	50
5.2	Definition eines einheitlichen Bezuges .....	51
5.3	Ansatz zur geometrischen Oberflächenbewertung .....	52
5.4	Variation reibwertbeeinflussender Komponenten .....	55
5.4.1	Flächenpressung.....	55
5.4.2	Einfluss des Verdrehwinkels .....	55
5.4.3	Änderung des Grundmaterials.....	56
5.4.4	Untersuchung verschiedener Oberflächenstrukturierungen.....	57
6	Geometrische Charakterisierung.....	58
6.1	Realisierung der geometrischen Oberflächencharakterisierung.....	58
6.2	Unsicherheitsbetrachtung für den Prozess der geometrischen Charakterisierung..	60
7	Statistische Analysen haftreibwertrelevanter und geometrischer Parameter .....	63
7.1	Test auf Normalverteilung .....	63
7.2	Statistische Ausreißertests .....	65
7.3	Korrelationsanalysen.....	67
7.3.1	Einflüsse der Prüfbedingungen auf das Torsionsmoment.....	68
7.3.1.1	Normalkraftschwankung .....	68
7.3.1.2	Umgebungstemperatur .....	69
7.3.1.3	Relative Luftfeuchte .....	71
7.3.2	Einflüsse der Geometrie.....	72
7.3.2.1	Form- und Lageabweichungen .....	72
7.3.2.2	Differenzierte Oberflächenstrukturierungen .....	80

---

7.3.3	Werkstoffbedingte Eigenschaftsänderungen .....	83
7.3.4	Einfluss der Erfassungsstrategie .....	86
7.4	Regressionsanalysen .....	89
8	Modell zur Integration geometrischer Parameter in die Berechnung des Haftreibwertes .....	90
8.1	Modifikation der Adhäsions- und Deformationskomponente .....	90
8.1.1	Deformationskomponente .....	91
8.1.2	Adhäsionskomponente .....	94
8.2	Haftreibwertberechnung mittels geometrischer Parameter .....	96
9	Ergebnisdiskussion und Zusammenfassung .....	99
10	Ausblick .....	104
11	Literaturverzeichnis .....	105
12	Abbildungsverzeichnis .....	123
13	Tabellenverzeichnis .....	126
14	Anlagen .....	127
15	Veröffentlichungen .....	173
16	Betreuung studentischer Arbeiten .....	176
17	Lebenslauf .....	177

---

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AiF	AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V.
AFM	atomic/scanning force microscope, Deutsch: Rasterkraftmikroskop
Anmerk.	Anmerkung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWF	Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung
CCD	charge-coupled device, Deutsch: ladungsgekoppeltes Bauteil
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
EN	Europäische Norm
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
GECKO	Gestaltung und Ermittlung charakterisierender Kennwerte von reib- schlussoptimierten Oberflächen
GPS	Geometrische Produktspezifikation
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IATF	International Automotive Task Force
IEC	International Electrotechnical Commission
IKAT	Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik (Technische Universität Chemnitz)
ISO	International Organization for Standardization

---

IWS	Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
JKR	Johnson-Kendall-Roberts-Theorie
KI	Konfidenzintervall
KRF	Kreisringfläche
lt.	Laut
MWA	Messwertaufnehmer
PF	Prüfstand
PK	Probenkörper
rel.	relative
REM	Rasterelektronenmikroskop
resp.	respektiv
RWP	Reibwertprüfung
OF	Oberfläche
TOL	Toleranz
TU	Technische Universität
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDE	Verein Deutscher Elektrotechniker
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
v	vor der Reibwertprüfung
v. l.	von links

## Kurzzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
Großbuchstaben		
$A_{\text{GES}}$	mm <sup>2</sup>	Gesamte Fläche (der Inseln)
$A_{\text{Real}}$	mm <sup>2</sup>	reale Kontaktfläche
$A_{\text{on}}$	mm <sup>2</sup>	Fläche je Insel
$A_{\text{PK}}$	mm <sup>2</sup>	Fläche des Probekörpers
$A_{\text{W}}$	mm <sup>2</sup>	Fläche des Auswertefeldes
$D_{\text{A}}$	mm	Außendurchmesser
$D_{\text{I}}$	mm	Innendurchmesser
$D_{\text{R}}$	mm	Reibdurchmesser
$E$	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul
$E_{1\text{□}}$	μm	Ebenheitsabweichung des Grundkörpers
$E_{1\text{□□}}$	μm	Rechtwinkligkeitsabweichung des Grundkörpers
$E_{2\text{□}}$	μm	Ebenheitsabweichung des Gegenkörpers
$E_{2\text{□□}}$	μm	Rechtwinkligkeitsabweichung des Gegenkörpers
$ER$	1/mm	Quotient aus Ebenheit und Rechtwinkligkeit
$F$ bzw. $P$	N	Prüfkraft
$F_{\text{Adh}}$	Nm	Adhäsionsreibung
$F_{\text{Def}}$	Nm	Deformationsreibung
$FLTt$	mm	Spitze-zu-Tal-Gesamtebenheitsabweichung
$F_{\text{N}}$	N	Normalkraft
$F_{\text{R}}$	N	Radialkraft
$G$	N/mm <sup>2</sup>	Schub- oder Gleitmodul
$HV$		Härtewert nach Vickers

---

$L_1$	mm	Länge von Eindruck A nach C
$L_2$	mm	Länge von Eindruck A nach B
$M_t$	Nm	Torsionsmoment
MR	Nm	Rutschmoment/Torsionsmoment
$R_a$	$\mu\text{m}$	Arithmetischer Mittenrauwert am Rauheitsprofil
Rsm	mm	Mittlere Rillenbreite am Rauheitsprofil
Rz	$\mu\text{m}$	Größte Höhe des Rauheitsprofils an der Einzelmessstrecke, gemittelte Rautiefe (umgangssprachlich)
$S_a$	$\mu\text{m}$	mittlere arithmetische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche
$S_{ku}$		Kurtosis der skalenbegrenzten Oberfläche
$S_{sk}$		Schiefe der skalenbegrenzten Oberfläche
$S_z$	$\mu\text{m}$	maximale Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche
Std	°	Texturrichtung einer skalenbegrenzten Oberfläche
Str		Seitenverhältnis der Oberflächentextur
U		kombinierte Messunsicherheit
$V_{MAT}$	$\mu\text{m}^3$	Materialvolumen je Insel
$W_{Abs}$	°	absoluter Winkel
$W_{elast}$	Nm	elastische Deformationsarbeit
$W_I$	°	ideeller Winkel
$W_{plast}$	Nm	plastische Deformationsarbeit
$W_{RS}$	°	realer Strukturwinkel
$X_{S1}$		Profilelementbreite
Y		Messgröße
Zt		Höhendifferenz Zt

## Kleinbuchstaben

a		Auflösung
b		Transformationskoeffizient
d	μm	Diagonallänge
f <sub>A</sub>		Faktor zur Extrapolation auf die Gesamte Probenkörperoberfläche
f <sub>k</sub>		Faktor zur Beschreibung der Kontaktgeometrie
f <sub>1</sub> 		Einflussfaktor: Ebenheitsabweichung des Grundkörpers
f <sub>1</sub> 		Einflussfaktor: Rechtwinkligkeitsabweichung des Grundkörpers
f <sub>2</sub> 		Einflussfaktor: Ebenheitsabweichung des Gegenkörpers
f <sub>2</sub> 		Einflussfaktor: Rechtwinkligkeitsabweichung des Gegenkörpers
h <sub>z</sub>	mm	Eindrucktiefe
k		Erweiterungsfaktor
n		Inselanzahl
p	MPa	Kontaktdruck
p <sub>min</sub>	mm	Mindestabstand zu den Probenrändern
p <sub>lim</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Grenzdruck, Fließdruck
s <sub>D</sub>	mm	mittlere Verschiebung aus Drückversuchen
s <sub>x</sub>		Asymptotische Erwartungsgetreue Schätzung
s <sub><math>\bar{x}</math></sub>		Standardabweichung der Mittelwerte
t	mm	Eindringtiefe
u		Standardunsicherheit
y <sub>min</sub>	mm	Mindestabstand zur y-Achse

## Griechische Kleinbuchstaben

$\alpha$	°	Freiwinkel
$\alpha_0$	°	Öffnungswinkel
$\alpha_{Hys}$	°	Hysteresefaktor
$\beta$		Piezokoeffizient
$\gamma_{12}$	J/m <sup>2</sup>	spezifische Grenzflächenenergie
$\varepsilon$	%	elastische Dehnung
$\eta_{Adh}$	Pa s	dynamische Viskosität der quasiflüssigen Schicht
$\lambda$	nm	Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes
$\lambda_c$	µm	Profilfilter für Rauheit
$\lambda_f$	mm	Formfilter
$\lambda_s$	µm	Störgrößenfilter
$\mu$		Reibwert
$\mu_{0,1}$		Haftreibwert bei 0,1° Verdrehung
$\nu$		Querkontraktionszahl
$\hat{\sigma}$		erwartungsgetreue Schätzung bei kleinen Stichproben
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Spannung
$\tau_0$	N/mm <sup>2</sup>	Eyring'sche Schubspannung
$\tau_s$	N/mm <sup>2</sup>	Scherfestigkeit
$\varphi$	°	Eingriffswinkel
$\varphi_M$	°	Winkel zwischen L1 und L2 im Markierungsplan

# 1 Einleitung

## 1.1 Zusammenhang zwischen Funktion, Fertigung und Fertigungsmesstechnik

Die Basis für die Produktion eines Bauteils ist das Festlegen der Funktionen durch Spezifikationen. Die Bauteilanforderungen werden durch das Definieren der Geometrie und deren einzuhaltenden Toleranzen auf der technischen Zeichnung (3D-Datensatz, 2D-Zeichnung) in Bezug auf zukünftige Funktionserfüllung festgelegt. In der Konstruktion gilt dabei die Annahme zum Zeichnungslesen gemäß DIN EN ISO 8015, wonach die Funktionsgrenzen gleich den Toleranzgrenzen sind. Ein Überschreiten der Toleranzgrenzen führt somit per Definition mindestens zu einer Fehlfunktion, im technisch ungünstigsten Fall zum totalen Bauteilversagen. Deshalb ist es unerlässlich, die Funktions- resp. Toleranzgrenzen durch empirische Tests oder Simulationen zu ermitteln und auf der technischen Zeichnung zu spezifizieren. Jedoch besteht die Herausforderung darin, das Zusammenspiel der einzelnen Gestaltabweichungen und deren Einfluss auf das Funktionsverhalten abzuschätzen, da die Gestaltabweichungen zwar separat definiert werden, aber letztlich gesamtheitlich wirken. Ferner sind für die finale Bauteilgestalt der Werkstoff und die Materialeigenschaften des Bauteils, das Fertigungsverfahren, die Prozessparameter sowie die Maschineneigenschaften entscheidend. Durch den Fertigungsprozess und dessen Prozessparameter sowie das Wechselwirken der Materialeigenschaften resultieren Abweichungen von der auf der technischen Zeichnung definierten Idealgestalt. Abgeleitet von der Zeichnungseintragung wird die Verifikation anhand von Prüfplänen mit entsprechenden messtechnischen Verfahren definiert. Falls sich Merkmale bei der Verifikation außerhalb der festgelegten Eingriffsgrenzen befinden, kann regelnd in den Fertigungsprozess mithilfe der Prozessparameter eingegriffen werden. Die Eingriffsgrenzen müssen daher immer innerhalb der Spezifikation liegen und orientieren sich an der Verteilung der Merkmalswerte sowie dem zeitlichen Verhalten. Die Folge ist eine abweichende reale Bauteilgeometrie. Diese Wechselbeziehungen zwischen Funktionsdefinition, Zeichnungseintragung, Fertigungsprozess und resultierender Bauteilgeometrie werden im Bild 1-1 dargestellt. Für das Funktionsverhalten ist nicht nur die Oberflächengestalt eines Bauteils entscheidend, sondern auch die des Gegenkörpers, da die Gestaltabweichungen beider Funktionspartner sich im Kontaktfall überlagern. Zudem wirken sowohl bei der Fertigung des Bauteils als auch im Einsatzfall physikalische Einflüsse, wie Adhäsion und Deformation, die ebenfalls von der geometrischen Oberflächengestalt abhängen. So vielfältig die technischen Bauteilanwendungen, Fertigungsverfahren und Werkstoffe auch sind, so individuell ist das funktionale Bauteilverhalten. Es erfordert umfassende technische Lösungen zur Oberflächen- und Funktionscharakterisierung.

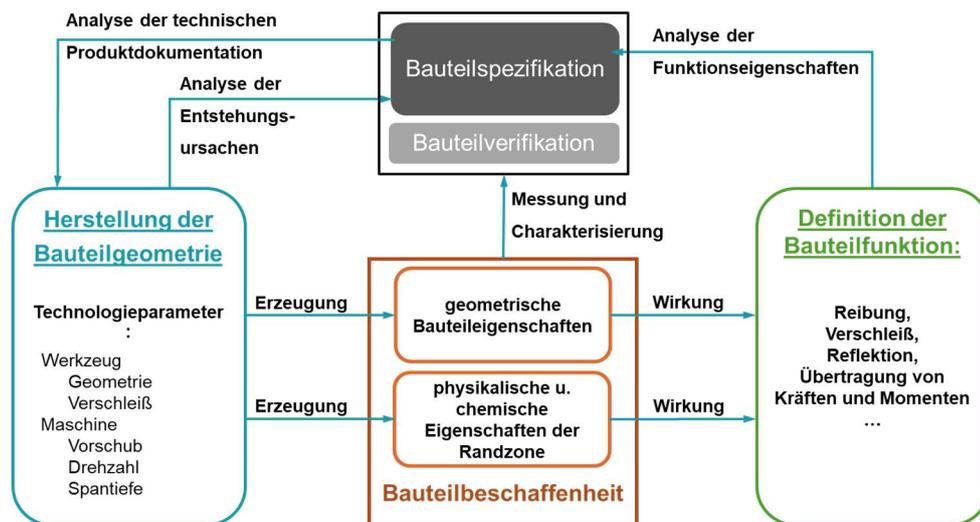


Bild 1-1 System von Funktion - Bauteilgeometrie - Fertigung (in Anlehnung an [ple\_10])

## 1.2 Problematik der Oberflächencharakterisierung

Aktuelle technische Anwendungen und internationale Normen unterteilen die Oberfläche in verschiedene Bereiche je nach ihrer Gestaltabweichung anhand der Entstehungsursache. Die Kenngrößen zur geometrischen Charakterisierung werden dabei getrennt voneinander definiert und es werden unterschiedliche Anteile der Oberfläche beschrieben. Letztlich dienen die Kenngrößen dem höheren Ziel der Gewährleistung der Bauteilfunktion. Bisher werden diese durch Angaben von Maß, Form, Lage und die Rauheiten auf der technischen Zeichnung festgelegt. Historisch bedingt handelt es sich bei den Rauheitsangaben um eine Kombination aus Prozessparametern und dem dazugehörigen Fertigungsverfahren, welche bestimmte Oberflächenstrukturen verursachen. Frühere Werkzeugmaschinen besaßen gestufte Vorgelege, um die Drehzahlen dem Fertigungszweck anzupassen. Es entstanden entsprechend „gestufte“ Kenngrößen zur Oberflächenbeschreibung. Unter Anwendung von Filtern ist ein Teil eines Profilschnitts der Oberfläche herausselektiert und anhand von verschiedenen waagrecht und senkrecht beschreibenden Kenngrößen quantifiziert worden. Anhand der Kenngrößen, die auf den technischen Zeichnungen Einzug hielten und für die bestimmte Funktionsflächen festgelegt wurden, erfolgte die Funktionsüberwachung. Dabei war die Kenngröße an den Fertigungsprozess gebunden. Im Laufe verschiedenster Untersuchungen stellte sich heraus, dass zum Beispiel für die Dichtfunktion bei einer bestimmten Materialpaarung und für einen bestimmten Fertigungsprozess bestimmte Rauheitskenngrößen signifikant sind und sich zur Funktionsüberwachung eignen. Die Betonung liegt hierbei immer auf dem spezifizierten Einzelfall. Weiterhin wird nur ein verschwindend geringer Anteil der Oberfläche betrachtet. Die gesamte Problematik zeigt sich vor allem bei der Charakterisierung verschiedener Fertigungsverfahren zur Oberflächenstrukturierung für ein und denselben funktionalen Einsatz.

Unterschiedlich gefertigte Oberflächen werden anhand von Profilschnitten oder auch anhand von kleinen Topographieausschnitten bewertet. Weitere Gestaltabweichungen, welche nicht der Oberflächenrauheit zuzuordnen sind, sowie zusätzliche Funktionseinflüsse bleiben außen vor. Folglich steht der kleine Oberflächenausschnitt repräsentativ für die gesamte Oberfläche und für den funktionsbestimmenden Anteil.

### **1.3 Zielstellung**

Im Rahmen des AiF/DFG-geförderten Forschungsclusters GECKO („**G**estaltung und **E**rmittlung charakterisierender **K**ennwerte von reibschlussoptimierten **O**berflächen“ [aif\_01]) stand die Identifikation von Einflussparametern und Mechanismen konventionell spanabhebender Fertigungsverfahren in Bezug auf die Haftreibung und zugleich die gezielte Erhöhung des Haftreibwertes durch thermomechanische Mikrostrukturierung und Beschichtungen im Fokus. Aufgrund der Vielzahl an Forschungsfeldern wurde die Thematik in 5 Teilprojekten bearbeitet. An der Professur Konstruktionslehre der TU Chemnitz (IKAT) wurden im Teilprojekt I der Prüfstand sowie die Reibwertprüfungen realisiert und in enger Zusammenarbeit mit Teilprojekt II (Professur für Messtechnik der TU Chemnitz) und III (Institut für Maschinenkonstruktion der Universität Magdeburg) die Reibmechanismen erörtert. Die „realitätsnahe kontaktmechanische Simulation technischer Oberflächen [sowie] die Berücksichtigung der Topographie und der Werkstoffeigenschaften“ [fvv\_14, S. 7] übernahm das Teilprojekt III. Die Teilprojekte IV (Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden IWS) und V (Lasereinstitut der Hochschule Mittweida) verfolgten das Ziel der reibwerterhöhenden Beschichtungen und Mikrostrukturierungen. [aif\_01, aif\_02]

Im Teilprojekt II soll die Entwicklung funktionsorientierter Oberflächenkenngrößen, die die Korrelation zum Haftreibwert ermöglichen, im Vordergrund stehen. Tiefgreifend bedarf es dabei der Kenntnis, welche Anteile der Oberfläche inklusive der Abweichungen durch Form oder Lage relevant für die Funktion sind, sowie welche Einflüsse und Mechanismen zusätzlich wirken, um eine funktionale, dem Nutzungsfall entsprechende Oberflächenbeschreibung zu gewährleisten. Für den Funktionsfall der Haftreibung sind für trockene Stahloberflächen die funktionsrelevanten Oberflächenanteile zu detektieren, zu analysieren und zu charakterisieren. Anhand unterschiedlicher Fertigungsverfahren, unterschiedlicher Werkstoffe und Untersuchungen, welche eine Oberflächencharakterisierung vor und nach der Haftreibwertprüfung zulassen, soll der Zusammenhang zwischen Oberfläche und Funktion herausgestellt werden. Eine Verbindung von unterschiedlich skalierten Abweichungen ist dabei obligatorisch. Damit tragen dieses Forschungsvorhaben und das Teilprojekt II maßgeblich zur Erörterung und Lösung der Wechselwirkung von Funktionseigenschaften, Fertigungsverfahren und Oberflächentexturen sowie deren Wirkung in einem tribologischen System im Grundlagenforschungsbereich bei.

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Charakterisierung von Gestaltabweichungen

Gestaltabweichungen resultieren aus dem Fertigungsprozess und bilden damit eine Abweichung des Werkstückes von seiner auf der technischen Zeichnung festgelegten idealgeometrischen Gestalt. Bereits in dem Handbuch „Technische Oberflächen“ von WEINGRABER und ABOU-ALY von 1989 werden technische Anforderungen an Oberflächen anhand der Gestaltabweichungen und den damit verbundenen Toleranzangaben aufgeführt. Die Einteilung der Gestaltabweichungen erfolgt anhand ihrer Entstehungsursachen, sie werden dabei in einzelne Bestandteile, sogenannte Ordnungen, getrennt (Bild 2-1). Ein Zusammenhang zwischen den geometrisch erfassten Gestalt- resp. Oberflächenabweichungen der Geometrielemente und dem resultierenden Funktionsverhalten wird dabei nicht aufgezeigt. [4760, wei\_89]

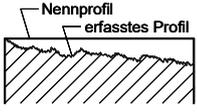
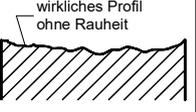
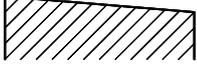
Benennung	Bildliche Darstellung als Profilschnitt (überhöht)	Beispiele für die Entstehungsursache	Benennung	Bildliche Darstellung als Profilschnitt (überhöht)	Beispiele für die Entstehungsursache
Gestaltabweichung		Bearbeitungsvorgang im System Werkstück – Fertigungsmittel – Umwelt	Formabweichung und Welligkeit		Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstückes, fehlerhafte Einspannung des Werkstückes, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkstückes
Lageabweichung		Justagefehler der Werkzeugmaschine, fehlerhafte Maschineneinstellung, fehlerhafte Einspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß	Oberflächenrauheit		Form der Werkzeugschneide, Vorschub des Werkzeuges, Vorgang der Spannbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschneide), Knospenbildung bei galvanischer Behandlung, Kristallisationsvorgänge

Bild 2-1 Gestaltabweichungen nach DIN 4760:1982 (in Anlehnung an [4760], [tuc\_14])

STOUT et al. beschreiben in ihrem Buch, dass es für eine gezielte Einstellung der Bauteilfunktion entscheidend ist, die Zusammenhänge zwischen dem Fertigungsprozess, der sich einstellenden Oberflächengeometrie (Oberflächenstruktur) und der resultierenden Funktion zu verstehen. Bei diesem Ansatz, der heute immer noch gültig ist, werden die Toleranzen der Werkstückgeometrie einzeln für das Größenmaß, die Form, die Richtung, den Ort und den Lauf sowie die Oberflächenstruktur auf der technischen Zeichnung in Anlehnung an einer Vielzahl an GPS-Normen definiert. Die Angaben werden getrennt voneinander betrachtet, spezifiziert, erfasst und ausgewertet. Die Unterteilung zwischen Formabweichungen, Welligkeit und Rauheit erfolgt anhand des Verhältnisses von Wellenlänge zu Wellentiefe. Von Formabweichung wird bei einem Verhältnis  $X_s/Z_t > 1000/1$  (Breite  $X_s$ , Höhendifferenz  $Z_t$ ) gesprochen. Für die Welligkeit ist dies  $100/1 < X_s/Z_t < 1000/1$  und für die Rauheit  $5/1 < X_s/Z_t < 100/1$ . [1101, 2631, 3274, 4287, 4288, 4291, 6318, 10360, 12180, 12780, 12781, 16610-21 sto\_93]

### 2.1.1 Messtechnische Erfassung von Geometrieelementen

Für die Erfassung von Geometrieelementen steht je nach Art der Gestaltabweichung eine Vielzahl an unterschiedlichen Messsystemen und Sensoren zur Verfügung. Je nach physikalischem Prinzip des Sensors werden Oberflächen unterschiedlich extrahiert. Die DIN EN ISO 14406 differenziert Oberflächen in mechanische und elektromagnetische. Mechanische Oberflächen entstehen durch Begrenzung einer ideal antastenden Kugel, wobei der Mittelpunkt der Antastkugel erfasst wird. Durch elektromagnetische Wechselwirkung in Verbindung mit verschiedenen Wellenlängen ergeben sich verschiedene elektromagnetische Oberflächen. Dabei werden optische Oberflächen zum Beispiel durch Interferometer, optische Tastschnittgeräte oder Konfokalmikroskope erfasst. Zudem wird zwischen der Erfassung der Oberflächentopographie und der Erfassung der Form- und Lageabweichung unterschieden. Die Erfassung von Gestaltabweichungen anhand von Geometrieelementen impliziert die Wahl einer geeigneten Messstrategie je nach Messprinzip im Hinblick auf die Punktzahl, Punkteverteilung, Punkt- abstand, Form des Tastelementes, Größe des Tastelementes und der Wahl des Messfeldes (Bild 2-2). Sowohl der Punkt- abstand als auch die Größe des Tastelementes beeinflussen die erfasste Oberflächen- geometrie resp. Gestaltabweichung und die daraus ermittelten Kenngrößen. Sowohl bei der mechanischen Antastung als auch bei der optischen Erfassung findet eine „Vorfilterung“ des Ursprungssignales statt. Neben der mechanischen und optischen Filterung fällt ein weiterer Begriff, das Aliasing, der unweigerlich das Ausgangssignal, die erfassten Oberflächenpunkte, anhand der Messstrategie filtert. [12180-2, 14406, ger\_08]

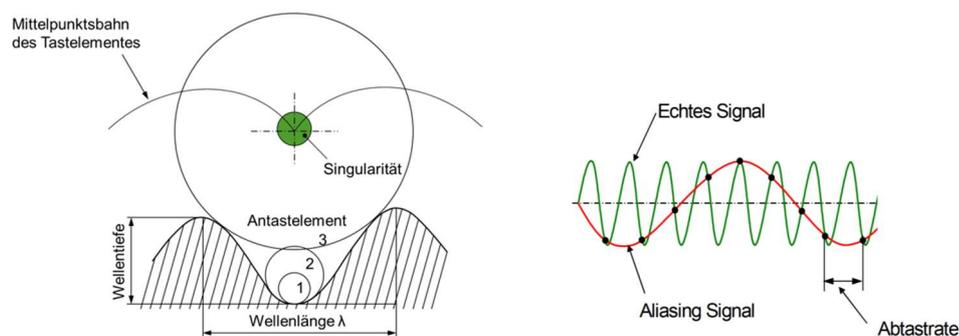


Bild 2-2 Mechanische Filterung und Aliasing- Signal [ger\_08]

Der Begriff entstammt der Signalverarbeitung und stellt die fehlerhafte Rekonstruktion eines Signals dar. Diese Erscheinung tritt auf, wenn nicht genügend Signale oder Punkte je Wellenlänge erfasst werden, aus der sich das Signal bzw. die Ausgangsinformation zurückberechnen lassen. Ein Eingangssignal, wie zum Beispiel die ursprüngliche Oberfläche, weist überlagerte Schwingungen, welche sich aus dem Fertigungsprozess ergeben, auf. Wird im Folgenden diese Oberfläche mit einem zu groß gewählten Punkt- abstand abgetastet, kann die kleinste sich auf der Oberfläche befindliche Welle nicht vollständig erfasst werden.

Resultierend daraus entsteht bei der Rekonstruktion eine veränderte Oberfläche im Vergleich zum Ursprungssignal (Ausgangsoberfläche). Durch den Aliaseffekt entsteht ein Informationsverlust, der nicht nur bei der Oberflächenerfassung, sondern allgemein bei der Verwendung von Filtern auftritt. Um den Aliaseffekt zu minimieren und den maximal zulässigen Punktabstand zu begrenzen, besagt das Nyquist-Kriterium (Abtasttheorem) lt. DIN EN ISO 12181-2:

*„Wenn bekannt ist, dass ein unendlich langes Signal keine Wellenlänge enthält, die kürzer ist als eine angegebene Wellenlänge, dann kann das Signal aus Werten in regelmäßigen Abständen rekonstruiert werden, vorausgesetzt, dass der Abstand kleiner als die Hälfte der angegebenen Wellenlänge ist.“ [12181-2, S.10]*

Für eine spektralgetreue Abtastung vermag diese Forderung unter Idealbedingungen gelten. Jedoch kann dabei die tatsächliche Amplitude der Welle nicht ermittelt werden. Ferner ist für die Verwendung eines Gaußfilters zur Trennung der Gestaltabweichungen eine Mindestanforderung von 5 Punkten je Welle einzuhalten. Selbst bei dieser Forderung nach 5 Messpunkten liegt der maximale Fehler bei der Amplitudenberechnung bei über 20 %. Deshalb ergaben statistische Untersuchungen, dass für eine sichere Amplitudenbestimmung eine Mindestanzahl von 7 Punkten je Welle notwendig ist. [12181-2, 14406, bos\_94, nit\_83, wos\_81]

### **2.1.1.1 Mechanische Filterung**

Bereits vor der eigentlichen Filteroperation erfolgt eine mechanische Filterwirkung durch die Wahl des Antastelements (taktile Messtechnik) und der Punkteverteilung auf der Oberfläche. Insbesondere kurzweilige Anteile des Formprofils werden durch die Größe des Antastelements überbrückt und damit ausgefiltert. Das mechanische Antasten ist für das Ausfiltern der Oberflächenrauheit bei der Formmessung jedoch erwünscht. Für eine vollständige Extraktion der Rauheit wiederum ist die Größe des Antastelements so zu wählen, dass der kleinste relevante Radius, der sich auf der Oberfläche befindet, erfasst werden kann. Bei der Geometrieerfassung wird die Mittelpunktbahn des Tastelementes aufgezeichnet. Dabei bestimmen die auf der Oberfläche befindlichen Krümmungsradien in Abhängigkeit vom eingesetzten Tasterradius die aufgenommene Mittelpunktbahn. Schlussfolgernd entspricht die mit einem kugelförmigen Antastelement erfasste Oberfläche nicht der wirklichen mechanischen Oberfläche lt. DIN EN ISO 14406. Zudem werden Kenntnisse über den Fertigungsprozess sowie über die Oberflächenfunktion resp. der Gestalt des Geometrieelements benötigt, um eine erfolgreiche Erfassungsstrategie anhand von Punktverteilung, Punktzahl, Messfeldgröße und Größe des Antastelements zu konzipieren. Der Einfluss des Punktabstandes und die Messpunktzahl spiegeln sich an der erfassten Oberflächengeometrie wider. Dabei können zu groß gewählte Punktabstände und eine geringe Punktzahl zu einer unvollständigen und nicht funktionsentsprechenden Oberflächenerfassung führen. [2631, 14406, ger\_08, roi\_08]

### **2.1.1.2 Optische Filterung**

Ähnlich wie bei der mechanischen Filterung werden auch bei der optischen Erfassung bereits die Oberflächeninformationen vorselektiert. Es existieren neben den unterschiedlichen Verfahren zur optischen Erfassung von Geometrien verschiedene Objektive mit unterschiedlicher Brennweite und CCD-Sensoren, die systembedingt zu einer Filterung im Vorfeld führen. Je größer die Fläche der Pixel, desto höher sind die Lichtempfindlichkeit sowie der Dynamikumfang, aber desto kleiner ist die Bildauflösung bei gleicher Sensorgröße. Es wird deutlich, dass die im Messsystem eingebauten Komponenten eine wesentliche Rolle spielen und zur Gesamtauflösung beitragen. Demnach findet aufgrund der Sensorgröße eine sogenannte optische Filterung statt. Ausschlaggebend ist die Auflösung des verwendeten Sensors sowie des eingesetzten Objektivs. Löst das Objektiv höher als der verwendete Sensor auf, können die mit dem Objektiv erzeugten Informationen nicht verwertet werden. Umgekehrt bleiben bei niedriger Objektivauflösung Pixel ungenutzt. [sch\_17]

### **2.1.1.3 Erfassung der Form- und Lageabweichungen**

Die Grobgestaltabweichungen (Maß-, Form- und Lageabweichungen) treten werkstückbedingt, zum Beispiel durch Inhomogenitäten oder durch Spannungen im Werkstück, umgebungsbedingt oder werkzeugbedingt, durch Führungsbahnabweichungen sowie Schwingungen, auf. Moderne Formprüfgeräte für rotationssymmetrische Bauteile können durch die Verwendung eines Zylinderkoordinatensystems die Messpunkte auf zwei unterschiedliche Varianten erfassen. Die erste Variante besitzt einen rotierenden Aufnahmetisch und einen stillstehenden Taster, welcher die Messpunkte auf einer horizontalen Ebene erfasst (Drehtischgeräte). Bei der zweiten Variante bewegt sich der Taster um das Messobjekt und der Tisch steht still (Drehspindelgeräte). Dabei findet diese nur bei großvolumigen Bauteilen ihre Anwendung. Damit die tatsächlich am Bauteil vorliegenden Gestaltabweichungen bei der Messung erfasst werden, muss vor der Messung das Bauteil auf dem Drehtisch aufgespannt, zentriert und zur Messbasis nivelliert werden. Eine dritte Variante ähnelt dem Aufbauprinzip des Tastschnittgerätes, bei dem ein Konturtastsystem integriert ist. Dabei werden die Messdaten nur auf einer Profillinie entlang der Bauteilachse erfasst. Weiterhin stehen zur Erfassung geometrischer Elemente und deren Maß-, Form- und Lageabweichungen bei gleichzeitiger Messkopfbewegung in allen Raumrichtungen Koordinatenmessgeräte zur Verfügung. Dafür wird ein Koordinatensystem als Zylinder-, Kugel- oder kartesisches Koordinatensystem zugrunde gelegt. Zusätzlich sind Kipp-/Schwenkvorrichtungen am Tastsystem oder Dreh- und Kipp-/Schwenktische für eine verbesserte Orientierung und Ausrichtung vom Taster zum Werkstück montiert. [1101, 2617, 6318, kef\_15 le\_92, mol\_09, pfe\_01, roi\_08, san\_93, wie\_10]

### 2.1.1.4 Erfassung der Oberflächentopographie

Die Oberflächencharakterisierung zweidimensionaler Kenngrößen beruht auf der Erfassung eines zweidimensionalen Profilschnittes. Dieser ist auf der Oberfläche orthogonal zur sich ausbildenden Bearbeitungsstruktur oder in Richtung der größten Rauheit zu positionieren. Die Normen DIN EN ISO 4287, DIN EN ISO 4288 und DIN EN ISO 3274 implizieren sowohl die Erfassung mittels Tastschnittgeräten als auch die Festlegung zu gerätetechnischen Standards, den Mess- und Filterbedingungen sowie der Kennwertermittlung. Bei der gleichzeitigen Erfassung von Form, Welligkeit und Rauheit werden die Filter zur Profiltrennung angewendet. Die Präzisionsführung im Vorschubgerät bildet beim Bezugsflächentastsystem die Bezugsbasis. Zur Erfassung der Form, Welligkeit und Rauheit und Bestimmung der P-, W- und R-Kenngrößen kann aufgrund der konstruktiven Auslegung nur das Bezugsflächentastsystem genutzt werden. Ein Verschiebetisch realisiert eine zusätzliche y-Bewegung zur Topographieerfassung. Durch das Aneinandersetzen mehrerer Profilschnitte wird die Oberfläche vollständig abgetastet. Softwareseitig erfolgt die Verknüpfung der einzeln aufgenommenen Profilschnitte. Eine Kombination aus einem Formmessgerät mit drehbarem Tisch und der Anbindung eines Rauheitstasters ermöglicht eine taktile Topographieerfassung an zylindrischen Bauteilen. Dieses System wurde für die Erfassung der spezifischen Probenkörpergeometrie mit einer strukturierten Stirnfläche konfiguriert. Es werden einzelne Kreisprofile mithilfe des Rauheitstasters aufgezeichnet. Dabei führt der Tisch die Drehbewegung aus und der Rauheitstaster verfährt von Kreisschnitt zu Kreisschnitt von innen nach außen mit zunehmendem Bauteilradius. Diese Konfiguration ermöglicht die dreidimensionale Erfassung von Oberflächenstrukturen. [3274, 4287, 4288, eif\_19, san\_93, mol\_09, pfe\_01, kef\_15, lem\_92]

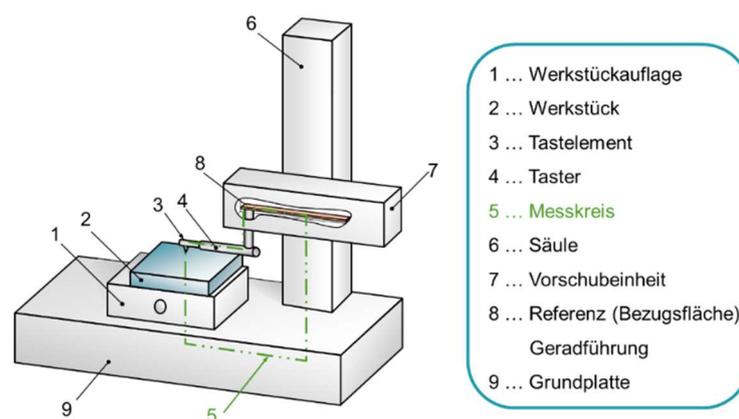


Bild 2-3 Schematischer Aufbau eines Bezugsflächentastsystems (in Anlehnung an [3277])

## 2.1.2 Filterung

In der Normenreihe DIN EN ISO 16610 ist eine Vielzahl an Filtern definiert. Neben Gauß, Spline, Spline-Wavelet und robusten Filtern existieren morphologische Operationen resp. Filter. Im Bereich der digitalen Signalverarbeitung gibt es eine Reihe anderer Filter, zum Beispiel: Laplace, Sigma, Sobel, Prewit, Bessel etc., die zum Einsatz kommen. Die Funktionsweise der einzelnen Filter wird sowohl zur Filterung in der Oberflächenmesstechnik als auch bei Form und Lageabweichungen genutzt. [16610-1]

### 2.1.2.1 Gauß

Der Gaußfilter nach der DIN EN ISO 16610-21 beruht auf einer gewichteten Dichtefunktion, um Gestaltabweichungen in Form, Welligkeit und Rauheit zu trennen. Die Dichtekurve wird dabei mit der folgenden Funktion kontinuierlich beschrieben:

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda_c} * e^{(-\pi * (\frac{x}{\alpha \cdot \lambda_c})^2)} \quad (2-1).$$

Die Datenpunkte (Oberflächeninformationen) werden nie kontinuierlich erfasst, sondern in einem bestimmten Punktabstand. Dabei werden die kontinuierlich vorliegenden Oberflächeninformationen diskretisiert. Zur Normierung (Wichtung) dieser diskreten Informationen anhand der Gewichtsfunktion wird der einzeilige Vektor  $s$  genutzt. Die Summe der Wichtung ist eins und bedeutet, der Flächeninhalt unterhalb der Gewichtskurve beträgt ebenfalls eins. Die Oberfläche als ein Gemisch von Amplitudenwerten soll bei der Trennung der Gestaltabweichungen möglichst unverfälscht wiedergegeben werden. Der Profilfilter nach Gauß zerlegt dabei das erfasste Profil in kurzwellige und langwellige Elemente anhand der phasenkorrekten Mittellinienfilter  $\lambda_s$ ,  $\lambda_c$  und  $\lambda_f$ . Störgrößen, welche durch das Messgerät selbst und/oder die Umgebung hervorgerufen werden, eliminiert ein Störgrößenfilter  $\lambda_s$  lt. DIN EN ISO 3274. Ein Teil der Form wird durch den  $\lambda_f$ -Filter entfernt. Anhand des  $\lambda_c$ -Filters, dem sogenannten cut-off, werden Wellenlängen, die größer bzw. kleiner sind, in das Welligkeits- bzw. Rauheitsprofil gefiltert. Eine Empfehlung für die Filterwahl zur Trennung der einzelnen Gestaltabweichungen wird in Kapitel 4 gegeben. Zunächst ist jedoch die Wirkungsweise eines Gaußfilters zu betrachten. Gaußfilter trennen anhand ihrer Übertragungscharakteristik. In der DIN EN ISO 16610-21 definiert sich der Filter durch eine Übertragungscharakteristik, die aus der Gewichtsfunktion mithilfe der Fouriertransformation ermittelt wird. Der Standard ist eine 50%ige Übertragungscharakteristik. Dies bedeutet, Wellen, die eine Wellenlänge gleich der Grenzwellenlänge aufweisen, werden zu 50 % in ihrer Amplitude übertragen. Von den verbleibenden langwelligen Profilbestandteilen wird zusätzlich über einen Formfilter die Formabweichung abgetrennt und das Welligkeitsprofil bereitgestellt. [3274, 16610-21, leo\_05, her\_99, kry\_97, see\_00, see\_05]

Der phasenkorrekte Gauß-Filter verursacht keine Phasenverschiebungen, die zu asymmetrischen Profilverzerrungen führen. Bild 2-4 zeigt die Filterwirkung am Beispiel eines phasenkorrekten Wellenfilters für die Rauheitsmessung mit der Grenzwellenlänge  $\lambda_c = 0,8$  mm. Die Amplituden der dargestellten sinusförmigen Eingangssignale mit den Wellenlängen werden beim Durchgang durch den Filter unterschiedlich stark gedämpft. Der Filter besitzt Hochpasscharakter, weil hochfrequente bzw. kurzwellige Profile (Rauheit) ungedämpft passieren dürfen, während langwellige Profile (Welligkeit) in ihrer Amplitudenübertragung unterdrückt werden. [3274, 16610-21, leo\_05, her\_99, kry\_97, see\_00, see\_05]

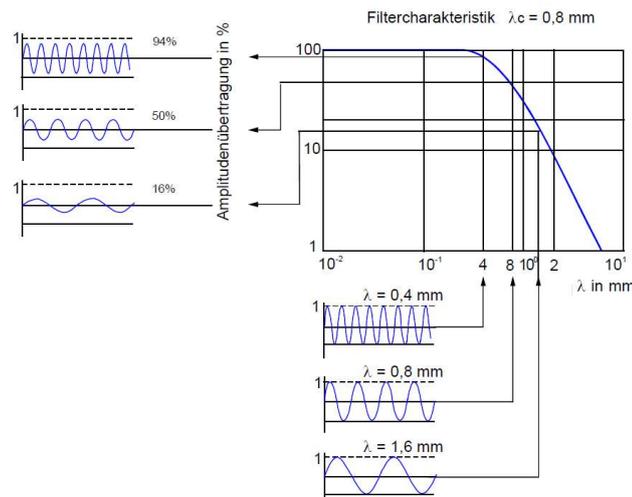


Bild 2-4 Hochpassfilterung von Sinuswellen ( $\lambda_c=0,8$  mm) [qda\_20, S.15, Bild 2.12]

Bei der Anwendung linearer Filter (z.B.: Gaußfilter, Splinefilter etc.) treten unerwünschte Nebeneffekte auf. Zum einen kann die Mittellinie verzerrt oder auch verschoben werden, wenn sich zum Beispiel tiefe Riefen oder Krater auf der Oberfläche befinden (Bild 2-5). Zum anderen treten sogenannte Randeffekte aufgrund der Filtercharakteristiken auf. Diese können bei Anwendung des Gaußfilters mithilfe der in 16610-28 beschriebenen Korrekturverfahren für Endeffekte bearbeitet werden. Beim Splinefilter erfolgt die Korrektur „automatisch“. Zu berücksichtigen ist, dass das Filterübertragungsverhalten im Randbereich bei den genannten Filtern ortsabhängig ist. [16610-21, ISO 16610-22, 16610-28]

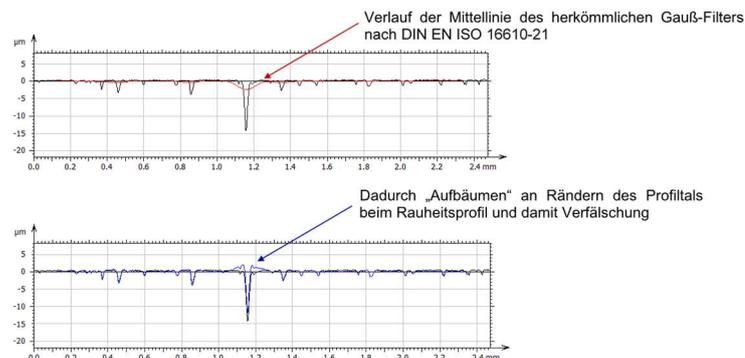


Bild 2-5 Verzerrung der Mittellinie

### 2.1.2.2 Morphologische Filter

Morphologische Operationen, die monoton wachsend als auch idempotent sind, werden als morphologische Filter bezeichnet. Laut DIN EN ISO 16610-40 gibt es dafür zwei Filtertypen:

- Opening-Filter
- Closing-Filter.

Durch die Aneinanderreihung von zwei verschiedenen morphologischen Operationen entstehen die genannten Filtertypen, bei denen unterschiedliche Anteile der Oberflächenstrukturen herausgestellt werden. Morphologische Operationen sind binäre Prozeduren, bei denen zwei geometrische Strukturen miteinander über eine Minkowski-Addition oder Minkowski-Subtraktion verbunden sind. Bei der Minkowski-Addition (Bild 2-6) wird eine geometrische Struktur addiert und es findet eine Vergrößerung der Menge statt. Die Minkowski-Subtraktion zieht eine Verkleinerung der Menge nach sich, da eine geometrische Struktur abgezogen wird (Bild 2-6). Die Dilatation entspricht der Minkowski-Addition und die Erosion hingegen minimiert die Menge (Minkowski-Subtraktion). Durch das unterschiedliche Aneinanderreihen dieser beiden Operationen ergeben sich die oben genannten Filter. [16610-40, kry\_97, leo\_05]

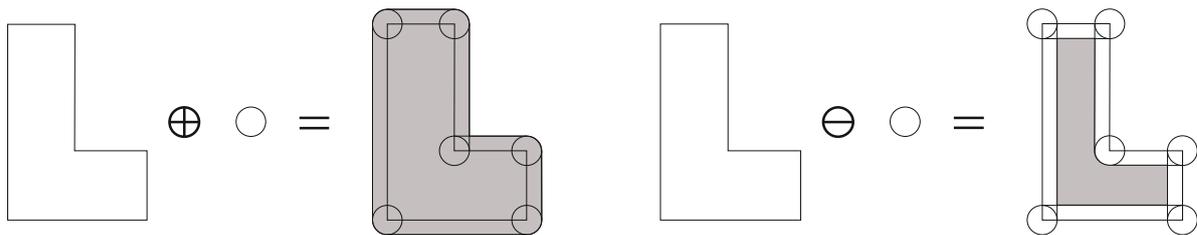


Bild 2-6 Darstellung von Minkowski-Addition (links) und Minkowski-Subtraktion (rechts)

Ein Opening-Filter entsteht durch eine Erosion, auf die eine Dilatation folgt. Bei einem Closing-Filter wird erst eine Dilatation und dann eine Erosion durchgeführt. Als geometrisches Element für die Abtastung werden in der Messtechnik vorwiegend Kreisscheiben oder Geradensegmente für Profile sowie Kugeln und Rechtecksegmente verwendet. Um die morphologischen Filter anzuwenden, muss eine Fülltransformation genutzt werden. Diese ermitteln bei geschlossenen Profilen den inneren Bereich. Bei offenen Profilen wird durch Anwendung einer speziellen Füllfunktion, genannt Umbra-Funktion, der Anteil der Materialseite gekennzeichnet. Morphologische Filter finden bei der Rauheitsmessung für die Korrektur der Tastspitze anhand der Rohdaten ihre Anwendung (Bild 2-7). Die erfassten Rohdaten des Tastermittelpunktes (Mittelpunktprofil) werden um den Tasterradius korrigiert. Als eine nacheinander geschaltete Operation von Dilatation und Erosion erzeugen diese ein Berührprofil, welches dem morphologischen Closing-Filter entspricht. Durch die Anwendung der Filter können Ausreißer und auch optisch erfasste Oberflächendaten selektiert werden. [16610-40, kry\_97, leo\_05]

Resultierend aus der Übertragung mengentheoretischer Methoden zur Bildanalyse sind die morphologischen Filter als nichtlineare Verfahren entstanden. Sie müssen das morphologische Abtasttheorem beachten, wobei das Abtastintervall kleiner als der Kugelradius (strukturierendes Element: Kugel) sein muss. Durch eine veränderte Reihenfolge bei der Verwendung der morphologischen Operationen, Erosion - Dilatation, ergibt sich der Opening-Filter und wirkt wie eine untere einhüllende Kurve des Profils. Die Spitzen einer Oberfläche werden mit dem Opening-Filter unterdrückt, wobei die Riefen an sich und dessen Amplitude unverändert bleiben. Funktionelle Eigenschaften, wie das Schmierverhalten oder die Lackhaltbarkeit, lassen sich damit gut untersuchen. [16610-40, kry\_97, leo\_05]

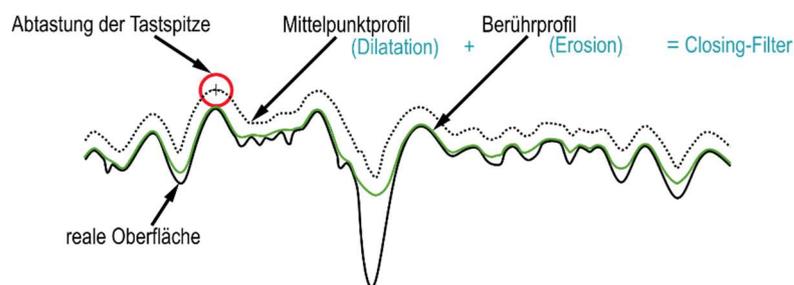


Bild 2-7 Morphologische Filterung anhand einer Tastspitzenkorrektur [Kus\_16]

### 2.1.3 Zuordnung messtechnischer Kenngrößen

Als ein Teil der Gestaltabweichungen sind die Abweichungen von Form und Lage sowie die Abweichungen der Oberfläche ein Bestandteil der Geometrieabweichungen. Dabei werden die maximal zulässigen Abweichungen anhand der Spezifikationen auf der technischen Zeichnung limitiert (Bild 2-8). [1101, 4760, qda\_22]

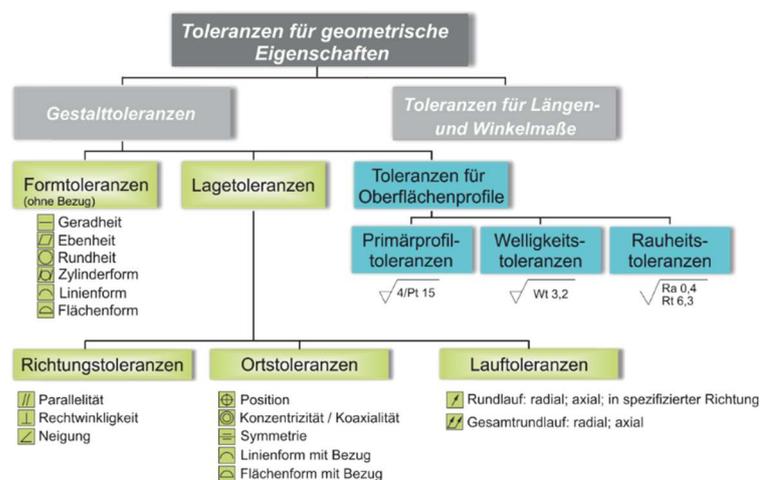


Bild 2-8 Toleranzen für geometrische Eigenschaften [qda\_22, S. 9]

### **2.1.3.1 Kenngrößen für Form- und Lageabweichungen**

Die DIN EN ISO 1101 definiert die Form- und Lagetoleranzen. Formabweichungen eines Geometrieelementes ergeben sich in Anlehnung an die DIN EN ISO 17450 als kleinstmöglicher Wert einer Zone um das ideale Nenn-Geometrieelement, die das nicht-ideale Geometrieelement enthält. Etwaige Anteile der Oberflächenrauheit sind für die Bewertung zu eliminieren. Damit wird das tolerierte Element hinsichtlich seiner maximal zulässigen Abweichung von der idealen Nennform begrenzt. Für Formtoleranzen ist die Tschebbycheff-Approximation das Default-Kriterium. Lagetoleranzen, welche keinen Default definieren, benötigen hingegen einen Bezug. Die Lagetoleranzen untergliedern sich in Richtung, Ort und Lauf. Neben der Abweichung der vorgegebenen Richtung begrenzt die Richtungstoleranz zugleich auch die Form des tolerierten Elements. Ferner sind in der Ortsabweichung die Form-, die Richtungs- und die tatsächliche Ortsabweichung anteilig enthalten. Für Lauftoleranzen werden die Mantel- und/oder Stirnflächen von Zylindern hinsichtlich ihrer Abweichungen zu einer drehbaren Bezugsachse begrenzt. Die Fixierung zu einem Bezug gewährleistet eine exakte Festlegung der Toleranzzone durch die Freiheitsgradbindung. Aus funktionstechnischer Sicht garantieren sie eindeutig und reproduzierbar die Lage von Geometrieelementen zueinander. Die Form des Bezuges ist dabei lt. DIN EN ISO 5459 zu eliminieren. [1101, 17450, 5459]

### **2.1.3.2 Oberflächenkenngrößen – 2D**

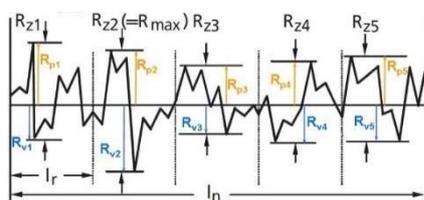
Vorangestellt ist die neu erschienene Normenreihe ISO 21920 zu erwähnen. Die neuen Normen richten sich ausschließlich an die Oberflächenbeschaffenheit von Profilen. Es werden einige Neuerungen, dazu umfangreiche Defaults per Spezifikation, festgelegt und die bislang geltende 16 %-Regel wird durch die per Default festgelegte Höchstwert-Toleranzregel abgelöst. Weiterhin fällt die bisherige Unterscheidung in periodische und aperiodische Profile weg. Aus diesen Gründen ergeben sich bei der Interpretation der Kenngrößen Unterschiede. Für die vorliegende Arbeit bilden jedoch die alten Normen (DIN EN ISO 1302, DIN EN ISO 4287, DIN EN ISO 4288, DIN EN ISO 13565-1, DIN EN ISO 13565-2, DIN EN ISO 13565-3), welche nachfolgend erläutert werden, die Grundlage für die Oberflächenuntersuchungen. Daher wurden die Kenngrößen nicht neu interpretiert und ausgewertet. Unberührt von Neuerungen bleiben die Filternormen der 16610-Normreihe. [21920-1, 21920-2, 21920-3]

Zur Entfernung der Nennform wird die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate („Best-fit“) angewendet. Anschließend werden zur Trennung von Gestaltabweichungen in Form, Welligkeit und Rauheit phasenkorrekte Mittellinienfilter (gewichtete Gaußsche Dichtefunktion)  $\lambda_f$  und  $\lambda_c$  verwendet. Die Übertragungscharakteristik bildet sich dabei aus der mittels Fouriertransformation bestimmten Gewichtsfunktion. [4288]

Die korrekte Anwendung der Filter zur Trennung der Welligkeit und Rauheit legte in tabellarischer Form die DIN EN ISO 4288 fest. Störgrößen durch das Messgerät selbst und die Umgebung sind mithilfe eines Störgrößenfilters  $\lambda_s$  zu eliminieren. Die DIN EN ISO 4287:2010 definierte, dass die 2D-Kenngrößen an einem Profilschnitt orthogonal zur Rillenrichtung oder in Richtung der größten Rauheit durch eine Trennung der Gestaltabweichung in Form, Welligkeit und Rauheit durch Mittellinienfilter gebildet werden. Nach der Erfassung des ertasteten Profils erfolgt die Wiedergabe des Primärprofils. Phasenkorrekte Filter nach DIN EN ISO 16610-21 segmentieren das Primärprofil in die drei einzelnen Profile. Anhand des zugrunde gelegten Profils können die verschiedenen Kennwerte zur Oberflächencharakterisierung bestimmt werden. Die Messbedingungen richten sich nach periodischen und aperiodischen Profilen. [4287, 4288, 16610-21, 21920]

Rsm für periodische und Rz oder Ra für aperiodische Profile definieren den Cut-off, die Einzel- und Gesamtmessstrecke. Beispielhaft sollen die zwei häufig genutzten 2D-Rauheitskennwerte Ra und Rz kurz beschrieben werden. [4287, 4288, 16610-21]

Rz – Größte Höhe des Profils – ist der arithmetische Mittelwert aus den einzelnen Rautiefen  $Rz_i$  der Einzelmessstrecken  $l_r$ . Im Regelfall besteht dieser aus 5 Einzelmessstrecken, sofern es keine andere Festlegung gibt. Außerdem ist Rz eine Maßgabe für die Oberflächenzerklüftung in vertikaler Richtung (Bild 2-9). [4287, 4288, 16610-21, mol\_09, wie\_10, kef\_15, lem\_92]

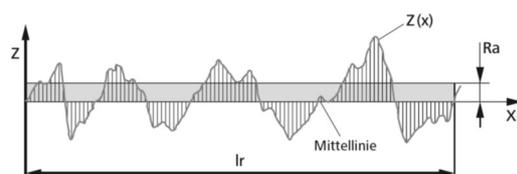


$$Rz = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Rz_i \quad (2-2)$$

$$Rz = Rz_5 = \frac{1}{5} (Rz_1 + Rz_2 + Rz_3 + Rz_4 + Rz_5) \quad (2-3)$$

Bild 2-9 Rp, Rv, Rz (in Anlehnung an [ISO 4287])

Ra – Arithmetischer Mittenrauwert – wird ebenfalls in den fünf Einzelmessstrecken ermittelt und dann als arithmetischer Mittelwert als Ra angegeben (Bild 2-10). Die gemittelten Beträge der Messpunktabweichung zur Mittellinie ergeben den Kennwert für die Einzelmessstrecken. Vereinfacht ausgedrückt ist dies der Flächeninhalt unterhalb der Rauheitskurve. [4287, kef\_15, lem\_92]



$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (2-4)$$

Bild 2-10 Ra – arithmetischer Mittenrauwert an der Einzelmessstrecke  $l_r$  (in Anlehnung an [kef\_15])

Auf die Ausführungen weiterer Kenngrößen am Profilschnitt wird verzichtet. Eigene Voruntersuchungen, die in der Diplomarbeit festgehalten wurden [sch\_12], sowie bestehende Literatur von Blunt, Rosen und Seewig zeigen, dass sich die zweidimensionalen Kenngrößen für die Prozesslenkung einer Oberflächencharakteristik und nur bedingt zur funktionalen Beschreibung eignen. Für die komplexen und verschiedenartigen Oberflächenstrukturierungen in Relation zur Funktion, hier Haftreibwert, können keine 2D-Kenngrößen die funktionsrelevanten Struktureigenschaften herausstellen. Im Bild 2-11 wird dies anhand von grob und fein zirkular geschliffenen Stahloberflächen mit gleichen Ra- und Rz-Werten, aber unterschiedlichen Haftreibwerten deutlich. Die erkennbaren Strukturunterschiede beider Oberflächen können durch die gemittelten Rauheitsgrößen (Ra, Rz sowie Rsm) nicht wiedergegeben werden. [sch\_12, sch\_13, sch\_14]

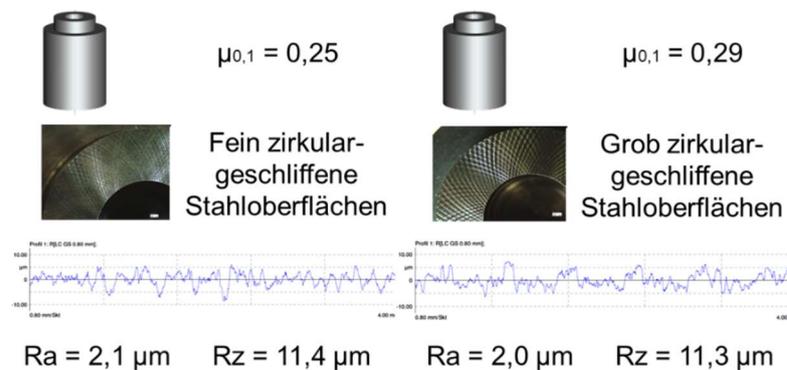


Bild 2-11 Visualisierung von Ra, Rz und dem resultierenden Haftreibwert [sch\_14]

### 2.1.3.3 Oberflächenkenngrößen – 3D

Die Kenngrößen, die in der DIN EN ISO-Reihe 25178 definiert sind, beziehen sich auf eine skalenbegrenzte Oberfläche, die durch Anwendung von Filtern zur Trennung der Gestaltanteile in 3 Dimensionen entsteht. Durch S-, L-Filter und einen F-Operator entstehen S-F- oder S-L-Oberflächen, woran die Kenngrößen definiert werden. Der S-Filter entfernt, vergleichbar zu  $\lambda_s$ , kleine laterale Skalenanteile, wodurch sich die Primäroberfläche ergibt. Der F-Operator filtert Formanteile aus der Primäroberfläche, wohingegen der L-Filter größere laterale Skalenanteile herausfiltert, ähnlich dem Rauheitsfilter  $\lambda_c$  (Bild 2-12). Nebst der Definition der flächenbezogenen 3D-Oberflächenkenngrößen werden in der DIN EN ISO-Reihe 25178 verschiedene Methoden zur optischen und taktilen Erfassung inklusive der Kalibriermethoden festgeschrieben. Weitere Flächenparameter und die nach Elementen eingeteilten Parameter sind in Anlage 1 zu finden. [25178-2]

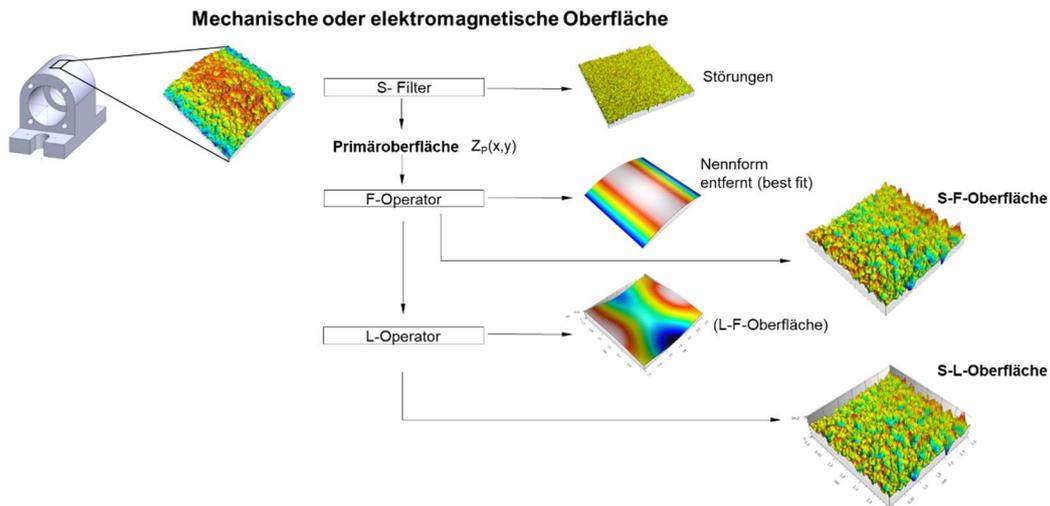


Bild 2-12 Darstellung der Oberflächenfilter

Anhand der skalenbegrenzten, gefilterten Oberfläche wird innerhalb des Auswertebereiches ein Teilbereich (Definitionsbereich) festgelegt. In diesem Definitionsbereich werden die Höhenparameter definiert. Nachfolgend ist eine Auswahl erläutert (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Auswahl an Höhenparametern nach DIN EN ISO 25178-2

Sz	Maximale Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche	Innerhalb des Definitionsbereiches ist Sz die Summe aus der größten Spitzenhöhe $S_p$ und der größten Senkenhöhe $S_v$ . [25178-2]
Sa	Mittlere arithmetische Höhe	Im Definitionsbereich wird Sa als arithmetischer Mittelwert der absoluten Höhe der Ordinatenwerte definiert. [25178-2]
Sku	Kurtosis der skalenbegrenzten Oberfläche	„Quotient der mittleren vierten Potenz der Ordinatenwerte und der vierten Potenz von $S_q$ innerhalb des Definitionsbereiches.“ [25178-2, S. 13, Z. 12f]
Ssk	Schiefe der skalenbegrenzten Oberfläche	Im Definitionsbereich bildet der Quotient aus der 3. Potenz der Ordinatenwerte und die 3. Potenz von $S_q$ die Schiefe Ssk. [25178-2]
Sq	Mittlere quadratische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche	$S_q$ definiert sich im Definitionsbereich als der mittlere quadratische Ordinatenwert. [25178-2]

Die flächenhafte Materialanteilkurve eines Auswertebereiches wird als kumulative Häufigkeitsfunktion der Ordinatenwerte in x- und y-Richtung angesehen. Dabei wird der Materialanteil in Abhängigkeit der Höhe dargestellt. An dieser resultierenden Funktion können verschiedene Parameter gebildet werden. Einige ausgewählte Parameter sind in der Tabelle 2-2 näher erläutert und in Bild 2-13 dargestellt.

Tabelle 2-2: Parameter an der flächenhaften Materialanteilkurve lt. DIN EN ISO 25178-2

Smr(c)	Flächenhafte Materialanteilkurve der skalenbegrenzten Oberfläche	Ausgehend von einer Bezugsebene wird die Höhe $c$ festgelegt, an der sich das Verhältnis der Materialfläche zur Auswertefläche orientiert. [25178-2]
Spk	Reduzierte Spitzenhöhe	Die reduzierte Spitzenhöhe (Bild 2-13) ergibt sich aus der gemittelten Höhe der hervorstehenden Spitzen, welche sich oberhalb des Oberflächenkerns $S_k$ befinden. [25178-2]
$S_k$	Kernhöhe	Die Kernhöhe wird als „Abstand zwischen dem höchsten und tiefsten Niveau des Kerns der Oberfläche“ [dig_20] definiert (Bild 2-13). [25178-2]
Svk	Reduzierte Talhöhe	Die reduzierte Talhöhe wird aus den gemittelten Höhen der hervorstehenden Täler, die sich unterhalb des Oberflächenkerns $S_k$ befinden, gebildet (Bild 2-13). [25178-2]
Smc(mr)	Inverser flächenhafter Materialanteil der skalenbegrenzten Oberfläche	Bei einem fest definierten Materialanteil (mr) ist die Schnitthöhe $c$ abzulesen, die $Smc(mr)$ ergibt. [25178-2]

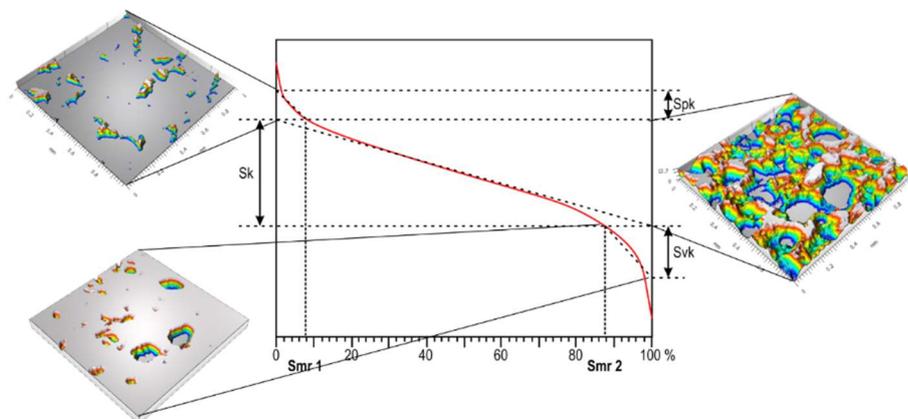


Bild 2-13 Parameter an der Materialanteilkurve (in Anlehnung an [dig\_20])

### 2.1.3.4 Softwaregestützte Analysemethoden

Die DIN EN ISO 25178-Normenreihe bietet eine Vielzahl an Parametern sowie Segmentierungsalgorithmen zur Einteilung von Oberflächenstrukturen, die mithilfe unterschiedlicher Software ausgewertet werden können. MountainsMap® des Unternehmens Digital Surf ist dabei eine der führenden Anwendungen. Die Parameter werden dabei auf verschiedenste Weisen in Auswertungen integriert und durch zusätzliche Parameter, zum Beispiel der maximalen Höhe ab Schwellwert, ergänzt. Nachfolgend sind einige ausgewählte Analysemethoden anhand der MountainsMap®-Software erläutert.

#### Insel- oder Partikelanalyse

Bei der Inselanalyse, auch Partikelanalyse genannt, werden die Merkmale anhand verschiedener Erkennungsmethoden detektiert. Diese beruhen auf unterschiedlichen Segmentierungsalgorithmen, wie einer frei editierbaren Schwellwernerkenntung, eines Wasserscheidenalgorithmus lt. ISO 25178-2, eines Kantenerkennungsfilters oder der Kreiserkennung. Bei der Kantenerkennung und dem Wasserscheidenalgorithmus können vorgelagert Operationen, um wesentliche Informationen bzw. Hauptstrukturen herauszustellen, festgesetzt werden. Um die Übersegmentierung durch den Wasserscheidenalgorithmus zu minimieren, wird die Wolf-Beschneidung (Wolf-Pruning) eingesetzt. Durch die verschiedenen Segmentierungsverfahren ist es möglich, Oberflächen in Insel, Hügel und Täler oder in Partikel zu unterscheiden und anhand dessen verschiedene Eigenschaften zu bestimmen. Weiterhin können auch Mindestflächen als Beschneidungskriterium verwendet werden, so dass Inseln, die kleiner sind, zur nächstgrößeren anhand des Änderungsbaumes hinzugefügt werden. Im Folgenden können entweder einzelne Inseln oder auch alle aufgefundenen Inseln/Partikel auf der Oberfläche charakterisiert werden. Dabei werden die Anzahl, die projizierte Durchschnittsfläche, das Durchschnittsvolumen, die maximale Höhe ab dem Schwellwert und das Verhältnis von Höhe zu Fläche bestimmt (Bild 2-14). [25178-2, dig\_20]

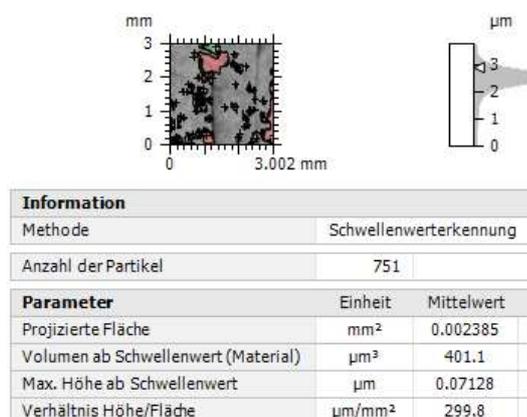


Bild 2-14 Partikel- beziehungsweise Inselanalyse (in Anlehnung an [dig\_20])

### **Vektorisierung des Mikromuldenetzes (Furchenanalyse)**

Die Furchenanalyse beruht auf der Wasserscheidensegmentierung. Diese Methode dient der Auffindung aller Furchen (Vertiefungen, Falten) auf der Oberfläche. Je nachdem, ob alle Furchen, Furchen oberhalb oder unterhalb eines frei editierbaren Schwellenwertes oder Furchen innerhalb eines prozentualen Anteils von Sz angezeigt werden sollen, stehen verschiedene Parameter zur Charakterisierung der Furchen zur Verfügung. Neben der maximalen Tiefe der Furchen können auch die arithmetischen Mittelwerte für die Tiefe der Furchen und Dichte sowie die Faltenposition berechnet werden. Durch die oben genannte Segmentierung kann eine Trennung von Haupt- und Nebenfalten erfolgen. [25178-2, dig\_20]

### **Texturrichtung**

Zuerst wird die Oberfläche mithilfe der Fourier-Transformation charakterisiert. Aus dem resultierenden Oberflächenspektrum ergibt sich ein polarer Graph, das Winkelleistungsspektrum, dem die Werte signifikanter Strukturrichtungen zugeordnet werden. Diese Analyse ermöglicht, die Oberfläche auf Vorzugsrichtungen der Struktur zu untersuchen. Für eine Texturrichtungsanalyse muss der Isotropiewert der Oberfläche jedoch unter 30 % liegen, da sich sonst zu viele unterschiedliche und keine signifikanten Strukturen auf der Oberfläche befinden. Der Isotropiewert, welcher geglättet und mit den Standard-Grenz-Frequenzen 5 % und 80 % hinterlegt ist, ist mit der Str-Berechnung laut ISO 25178-2 identisch. Dabei wird der Isotropiewert als Prozentzahl angegeben, wobei der Str-Wert mit 100 multipliziert wird. Die erste Strukturrichtung ergibt sich aus den drei höchsten Spitzen. Dabei werden Nebenspitzen entfernt, die weniger als 5 % von den schon ermittelten Spitzen abweichen. Die erste Richtung entspricht somit dem Std-Wert aus der ISO 25178-2. Auf die Definition der Werte Str und Std wurde verzichtet und sind den DIN EN ISO 25178-2 zu entnehmen. [25178-2, dig\_20]

### **Höhenlinienanalyse**

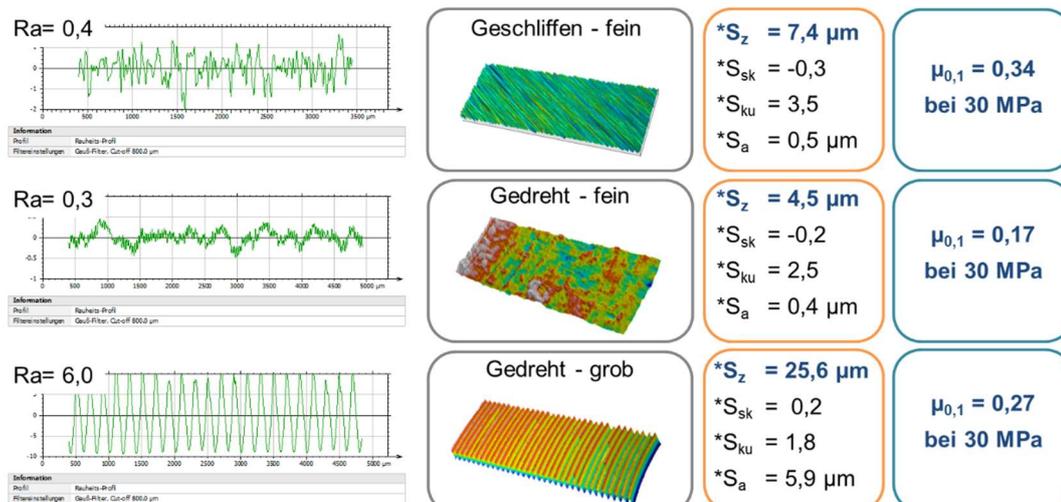
Bei dieser Oberflächencharakterisierung können Anteile der Oberfläche bewertet werden, die

- oberhalb einer definierten Höhe
- unterhalb einer definierten Höhe
- oder zwischen zwei definierten Höhen

liegen. Dabei kann der Schwellwert vom tiefsten, mittleren oder höchsten Punkt aus definiert werden. Ein automatisch berechneter Modus ist ebenfalls möglich, welcher die Übergänge basierend auf einem Höhenverteilungs-Histogramm berechnet. Für die verschiedenen Schnittebenen stehen Parameter, wie die projizierte Fläche (in %), das Leer- und Materialvolumen (in % oder je Flächeneinheit), welches sich durch Dividieren der Volumina durch die komplette projizierte Fläche ergibt, sowie die mittlere Dicke von Luftanteil und Materialanteil für die Oberflächenbewertung zur Verfügung. [25178-2, dig\_20]

### 2.1.3.5 Ansätze zur funktionalen Oberflächencharakterisierung

Neue stufenlos regelbare Fertigungsmaschinen und mehrachsige Bearbeitungszentren erlauben es, Oberflächen mit verschiedensten Geometrien herzustellen. Dabei gleichen sich die herkömmlichen Fertigungsverfahren, wie Schleifen und Fräsen, aufgrund dieser neu gewonnenen hohen Flexibilität der Bearbeitungsparameter in ihren resultierenden Oberflächencharakteristiken einander an. Es entstehen daraus nicht statistisch verteilte Oberflächengeometrien, so dass der Informationsgehalt der 2D-Parameter für dreidimensionale Oberflächenstrukturen stark begrenzt ist (Bild 2-15). Für die Beschreibung der 3D-Strukturen wurden die 2D-Parameter in 3D-Parameter übertragen. Bereits ABOU-ALY erkannte 1972, dass die Rauheit einen wesentlichen Einfluss auf die zu paarenden Werkstücke hat. Er charakterisierte die Oberflächen anhand von Rautiefe, Mittenrauwert und Glättungstiefe. Ziel war es, die wahre Kontaktfläche zu ermitteln und so Kontaktvorgänge zu beschreiben, wobei er verschiedenste unterschiedliche Methoden zur Oberflächenerkennung nutzte. Er bemerkte die Begrenztheit der 2D-Betrachtungen. Die in der Normenreihe ISO 25178 aufgelisteten Parameter sind ebenfalls statistische Parameter, welche eine Mittelebene zur Referenzbildung und Gaußfilter zur Trennung von Gestaltabweichungen nutzen. Eigene Vorarbeiten haben bisher keine Korrelation zwischen 3D-Parametern und dem Haftreibbeiwert der unterschiedlichen Fertigungsverfahren und den daraus resultierenden Oberflächenstrukturen gezeigt. In aktueller Fachliteratur werden entsprechende Parameter zur Oberflächencharakterisierung, zum Beispiel  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$  sowie Parameter an der Materialanteilkurve, genutzt. Dabei bieten diese in den meisten Fällen eine Oberflächenunterscheidung für einen Fertigungsprozess und damit einer begrenzten Funktionsabsicherung auf einen Teilbereich der Gestaltabweichung. [12085, 14406, 25178-2, abo\_72, gro\_09, sch\_12, sch\_15, smi\_02, tow\_16, vid\_09, wie\_89]



\*Basis der Kenngrößenermittlung: DIN EN ISO 25178-2:2012-09

Bild 2-15 Charakterisierung mechanisch gefertigter Oberflächen [sch\_15]

Einige Untersuchungen, wie zum Beispiel das BMBF-geförderte Projekt „FunkProMikro“, zeigten ebenfalls die Limitierung der derzeit verwendeten „Standardparameter“ (Ra, Rz, Rzmax, Sq, Sa, Sz) auf. Weiterhin wird in diesem Projekt bei der Charakterisierung von Mikrostrukturen auf eine neue Filtermöglichkeit zur Identifizierung von sogenannten Nöpfchen bei der Charakterisierung von Mikrostrukturen verwiesen. Das ebenfalls BMWF-geförderte Projekt „Smartsurf“ nutzt für die Beschreibung der Oberflächen spezielle Benetzungsparameter, die anhand der erfassten Oberflächenstrukturen ermittelt werden. Sowohl Profile als auch 3D-Oberflächen werden für die Oberflächenbeschreibung genutzt und eigene Parameter, wie die Ovalität, werden definiert. Eine Beschreibung durch 2D-Rauheitsparameter (Ra, Rz, Rk, Rpk, Rvk) zeigen sich in diesen Fällen auch bei FALLQVIST, SEDLAČEK und EIFLER. Eine reproduzierbare Fertigung und ein Vergleich unterschiedlicher Fertigungsstrategien lassen sich durch die genutzten Kenngrößen gewährleisten. Jedoch besteht nur eine schwach ausgeprägte funktionale Korrelation. Zudem untersuchten STEAVES und PLEUL in ihren Dissertationen Charakterisierungsmöglichkeiten für einen bestimmten Herstellungsprozess, verbunden mit einer definierten Funktion. Beide konnten durch die Nutzung der herkömmlichen 2D- und 3D-Kennwerte die Oberflächen charakterisieren. Die Beschreibung der jeweiligen Oberflächen durch die bekannten 2D- und 3D-Parameter dient lediglich der Überwachung des Fertigungsprozesses, um „Gutbauteile“ von „Schlechtbauteilen“ zu detektieren und somit die Funktion abzusichern. Im Umkehrschluss bedeutet das, wenn eine Veränderung des spezifischen Fertigungsprozesses erfolgt, ändern sich die Oberfläche, die Kenngröße und daraus resultierend der direkte funktionale Zusammenhang. [eif\_161, eif\_162, fal\_13, fra\_13, gro\_09, ple\_10, sct\_13, sed\_09, smi\_02, sta\_98, wie\_12, wie\_89]

Bei STEAVES geht es um einen Herstellprozess von Blechen bei ihrer Umformung, so dass die Bearbeitungsstruktur und somit die Oberflächen ähnlich sind. PLEUL untersuchte ebenfalls das Umformverhalten von Blechen anhand der unterschiedlichen Oberflächenrauheiten. Es zeigt sich, dass 2D-Parameter für die Beschreibung der veränderten Fertigungsparameter und des resultierenden Zustandes der Bleche bei beiden Untersuchungen ausreichend sind. Die Veröffentlichungen von BROWN et al., REBEGGIANI et al. sowie von LEMKE et al. zeigen auf, dass die Oberflächencharakterisierung mittels 3D-Parameter für ein Fertigungsverfahren unter gleichen Bedingungen und bei gleichem Material zur Identifizierung von fertigungsbedingten Abweichungen und der daraus entstehenden Oberfläche dient. MATHIA et al. kommen zu dem Schluss, dass aufgrund der Abhängigkeit der Funktion von den Fertigungs-, Erfassungs- und Auswertebedingungen eine standardisierte Anwendung der in der ISO 25178 beschriebenen Parameter mithilfe einer Kenngröße nicht möglich ist. Dies kommt ebenfalls in den Veröffentlichungen von ROSÉN, XIAO und SIEGMANN zum Tragen. [bro\_06, lem\_02, ple\_10, reb\_14, ros\_11, sie\_96, sta\_98, wal\_15, xia\_11]

KÖHLER verwendet für die Charakterisierung seiner Probekörper den Parameter Rz, um den Unterschied der Proben bei veränderten Temperaturen in Verbindung zum Haftreibwert aufzuzeigen. Jedoch liefert er nur qualitative Aussagen bezüglich des Einflusses der Oberflächen-gestalt auf den Reibwert und weist anhand ähnlich gefertigter Oberflächen die Veränderung des Rz-Wertes bei Temperaturerhöhung nach. JIANG und WHITEHOUSE beschreiben die Vielzahl an Neuerungen der letzten Jahrzehnte auf dem Gebiet der Oberflächencharakterisierung, verweisen aber auch auf die noch zu bearbeitenden Problemstellungen, die Oberflächenparameter mit den Funktionen zu korrelieren. BLUNT schildert in seiner Veröffentlichung ein Messsystem, das auf einer Fringe-Projektion beruht. Oberflächencharakterisierungen finden darin keine Anwendung. Anhand der Materialanteilkurve mit den Parametern Smr1, Smr2, Sk, Svk sowie mit Sq, Ssk, Sku charakterisieren WALTON et al. die Glättung der Oberfläche infolge des Poliervorganges. Ferner wird ein nicht dimensionaler Koeffizient C anhand der einzelnen Partikel berechnet. Anhand von 2D-Parametern und mithilfe einfacher neuronaler Netze stellte MURALIKRISHNAN eine Verbindung zwischen Charakterisierung und Oberflächenfunktion her. Einen Hinweis auf die Limitierung der Oberflächenparameter und eine individuelle Funktionsdiagnose räumt er dabei ein. [blu\_20, jia\_12, köh\_05, mat\_11, mur\_04, ros\_11, sie\_96, wal\_15, xia\_11]

SENIN et al. fokussierten sich auf die Segmentierung einzelner Fragmente der Oberfläche mithilfe der Nutzung verschiedener Filteralgorithmen. Ebenfalls verwiesen sie auf die Schwierigkeiten, für jedes individuelle Szenario die Filter anzupassen und die relevanten Strukturen herauszustellen. KUSNEZOWA geht in ihrer Arbeit auf die Problematiken der 2D-Rauheitsmessungen auf Konturen ein, so dass für funktionale 3D-Charakterisierungen keine Ansätze vorhanden sind. GRZESIK et al. untersuchten für die Oberflächencharakterisierung auf gehärtetem Stahl neben den Motif-Parametern ebenfalls die in der DIN EN ISO 25178-2 aufgezählten 3D-Parameter. Mithilfe der Volumenparameter Vvv und Vmp sowie des Spk-Wertes konnten die funktionalen Anforderungen der Verschleißresistenz beschrieben werden. Den Wasserscheidenalgorithmus gepaart mit dem Wolf-Pruning nutzt BAUMANN als Segmentierung seiner gefrästen Oberflächen zur Drall-Charakterisierung. Winkelverteilungskurven und Winkelvolumenverteilungskurven kombiniert mit dem Parameter Sd für die Mikrodrall- und Sdw für die Mikrowelligkeit/Makrodrall-Unterscheidung erlauben eine dem Anwendungsfall angepasste Beschreibung. Weiterhin werden hybride Parameter der DIN EN ISO 25178 verwendet. Für die Drallcharakterisierung nutzten SEEWIG sowie ARNECKE entsprechende geometrische Parameter zur funktionalen Beschreibung. In der Toleranzanalyse und Einfluss-simulation erwähnt VOSS zwar die Gestaltabweichungen, jedoch bezieht sich dies nur auf Maßeinflüsse. Für die Simulation werden keine beschreibenden Oberflächenparameter genutzt. [arn\_17, bau\_17, grz\_15, kus\_16, see\_09, sen\_13, vos\_11]

PAUSCH charakterisiert seine Mikrostrukturen für Walzkontakte über geometriebeschreibende Kennwerte, wie Durchmesser, Tiefe, Strukturabstand und 2D-Rauheitsparameter zur Unterscheidung einzelner Laserspots in ihrer Tiefe. Rz verwendet er für die Berechnung der Mindestschmierfilmdicke, um die Korrektur der Rauheit nach SCHMIDT vorzunehmen. Die Parameter Ssk, Sku und Sk nutzte SOUSA zur Klassifizierung der Reibung im Polierprozess. Die Fourier-Analyse sowie die Kenngröße Sa konnte GROß für die Beschreibung von Mikrofrässtrukturen nutzen und Korrelationen zum Fertigungsprozess herstellen. [gro\_21, pau\_13, sch\_10, sou\_14]

SCHULLER verwendete bei seinen Untersuchungen zum Haftreibwert 3D-Parameter wie Sa und Ssk nach der DIN EN ISO 25178. Schlussendlich gelangt er zur Erkenntnis, dass sich die Oberflächenrauheit je nach Adhäsions- oder Mikroformschlussneigung ändert. Ferner merkt er an, dass Oberflächengeometrien sowie Werkstofffestigkeiten und Adhäsionsneigungen in Zusammenhang betrachtet werden müssen. Dabei schlussfolgert SCHULLER, dass sich die reale Kontaktfläche mit steigendem Haftreibwert vergrößert, wenn die Reibpartner beide chemische Bindungen eingehen bzw. zur Adhäsion neigen. Eine Grenze für die weitere Zunahme der Kontaktfläche bildet die Werkstofffestigkeit, da keine weitere Annäherung der Kontaktpartner auch mit Zunahme der aufgebrachtten Kraft stattfinden kann. Bezüglich der Oberflächencharakterisierung wird die unzureichende Aussagekraft der verwendeten geometrischen Kennzahlen eingeräumt, die nicht in der Lage sind, Orientierungen der Rauheit zu bestimmen. SCHUPPENHAUER hat im Rahmen seiner wissenschaftlichen Untersuchungen nachgewiesen, dass die in Kontakt stehenden Flächen von großer Wichtigkeit sind. Bei gleichen Voraussetzungen der Gestaltabweichungen der Form und Lage konstatierte sich ein Einfluss dieser auf den Haftreibwertwert. Nachgewiesen wurde dies an der Veränderung der Form- und Lageabweichungen nach der Reibwertprüfung. [gro\_21, pau\_13, sch\_10, scp\_13, scp\_14, sou\_14]

Eigene Voruntersuchungen zu bestehenden Oberflächenparameter und deren Funktionskorrelation erfolgten bereits in einer Diplomarbeit. Exemplarisch wurden an zirkulargefrästen Oberflächen die dazugehörigen 2D- und 3D-Parameter und der resultierende Haftreibwert bestimmt (Bild 2-15). Die Aussagefähigkeit der 2D- und 3D-Parametern lt. DIN EN ISO 4287 und DIN EN ISO 25187 ist, basierend auf den Ergebnissen, sehr limitiert. Nicht statistisch verteilte Oberflächen, die unterschiedliche Oberflächencharakteristiken aufweisen, sind nicht mit den derzeitigen 2D- und 3D-Parametern funktional zum Haftreibwert charakterisierbar. Ergänzend zu den bisherigen Untersuchungen erfolgten in Anlehnung an die DIN EN ISO 23085 (2D) und DIN EN ISO 25178 (3D) die Motifanalysen. [4287, 12085, 25178-2, fvv\_14, sch\_12]

Dieser Ansatz einer funktionsrelevanten Oberflächenbewertung erzielte nicht die gewünschten Ergebnisse. Die Ursache liegt in der Oberflächensegmentierung der Motifs. Entweder werden die Motifs anhand eines prozentualen Höhenanteils, gekoppelt an den Sz-Wert, oder an einem prozentualen Oberflächenanteil definiert. [4287, 12085, 25178-2, fvv\_14, sch\_141, sch\_142, lei\_14]

## 2.2 Messunsicherheit

Die Grundlage vergleichbarer und reproduzierbarer Messergebnisse ist die Kenntnis über den Zusammenhang des Messprozesses und dessen Einzelgrößen. Dabei resultiert die Messgröße  $Y$  aus dem Zusammenwirken der Einflussgrößen  $X_1, X_2 \dots X_n$ , des definierten Messprinzips und der definierten Methode mit mathematisch-physikalischen Relationen (2-5). [adu\_07]

$$Y = y \pm k * u(y) = y \pm U \quad (2-5)$$

Dem wahren Wert einer Messgröße ordnen sich die verschiedenen Abweichungen, resultierend aus dem Messprozess, zu. Diese Abweichungen, auch Messabweichung, Messunsicherheit oder veraltet Messfehler genannt, gilt es einzuschätzen. In Anlehnung an das Internationale Wörterbuch der Metrologie wird die Messunsicherheit beschrieben als „ein nicht negativer Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Grundlage der benutzten Information beigeordnet ist.“ [bri\_12, S.39]. De facto enthält ein vollständiges Ergebnis eine beigeordnete Messunsicherheit, welche den Streubereich der Messwerte angibt. Es existieren zwei Arten der Messabweichungen, die systematischen und die zufälligen Abweichungen. [98\_3, 99, bri\_12, kry\_15]

Für die Ermittlung der Messunsicherheit gibt es seit 1993 einen öffentlichen Leitfaden „**G**uide to the Expression of **U**ncertainty in **M**easurement“, kurz GUM genannt. Der ISO/IEC Guide 98-3 kam 2008 als Neuauflage des GUM von 1995 heraus und ist identisch mit dem Leitfaden JCGM 100:2008. Auf einem Beiblatt wird die Verwendung der Monte-Carlo-Methode (Monte-Carlo-Simulation, Monte-Carlo-Supplement, etc.) beschrieben. Diese ist ebenfalls für eine qualitative Bestimmung von Messergebnissen auf Basis der Verteilungsfortpflanzung zielführend. Dabei stützt die Simulation sich auf das von Cantelli und von Kolmogoroff formulierte Gesetz der großen Zahlen. Dies besagt, dass das arithmetische Mittel  $\bar{x}$  gegen  $\mu$  für wachsende  $n$  konvergiert, wenn die gleiche Verteilungsfunktion und ein endlicher Erwartungswert von  $n$  unabhängigen Zufallsvariablen vorliegen. Jedoch findet dieses Verfahren in der Praxis wenig Anwendung. Die Vielzahl der Fälle lässt sich sehr gut mit dem Ansatz nach GUM formulieren. Dabei sind die Abweichungen nach dem Fortpflanzungsgesetz nach Gauß zu modellieren (früher: Gaußsches Abweichungsfortpflanzungsgesetz). [adu\_07, bos\_15, kry\_15]

Eine allgemeine Handlungsempfehlung nach GUM ist in Anlage 2 aufgeführt, inklusive korrelierter Eingangsgrößen mit Angabe der Kovarianz. Basierend auf der prinzipiellen Vorgehensweise nach GUM existieren einige Methoden der Vereinfachungen (Bild 2.16). Dazu zählt der VDA Band 5, der nur additive Modelle berücksichtigt und die Sensitivitätskoeffizienten auf eins durch das Differenzieren jeder Eingangsgröße setzt. Korrelationen zwischen den Parametern bleiben unberücksichtigt und eine Anpassung des Erweiterungsfaktors auf Basis der t-Verteilung ist erst mit der 3. Auflage geplant. Die bekannten Verfahren zur Abschätzung der Messunsicherheit beruhen auf statistischer Wahrscheinlichkeitsrechnung. [98\_3, 99, adu\_07, bos\_15, kry\_15, pes\_03, sac\_09]

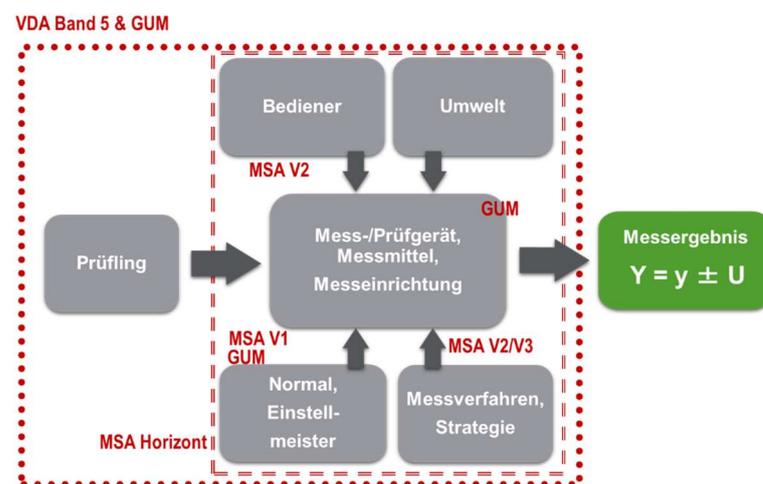


Bild 2-16 Messunsicherheitseinflüsse und deren Eintrag in die verschiedenen Beurteilungsmethoden (in Anlehnung an [qda\_19])

Für eine wissenschaftliche Analyse der erweiterten Standardunsicherheiten von Messsystem und Messprozess komplexer Systeme eignet sich die Methode nach GUM. Dafür existieren zwei unterschiedliche Vorgehensweisen. Die Methode A empfiehlt sich, wenn aufgrund von statistischen Versuchsreihen die Auswirkungen einer Einflusskomponente ermittelt werden sollen. Aus den vorliegenden Einzelmessungen sind die Schätzwerte für die Streuung um den Mittelwert mithilfe der empirischen Standardabweichung  $s$  (2-6) für die Standardunsicherheit zu berechnen. Bei Mittelwertbetrachtungen wird die Standardunsicherheit der Mittelwerte  $l_t$  GUM berechnet (2-7). Zusätzlich empfiehlt es sich bei kleinen Stichproben, abweichend von GUM, den Schätzwert für eine erwartungstreue Schätzung  $\hat{\sigma}$  mit  $a_n$   $l_t$  Grundlagen der Statistik zu korrigieren (2-8). Der Korrekturfaktor  $a_n$  wird in der Literatur als bereits berechnete Kennzahl tabellarisiert. Die Basis der Berechnung bildet dabei die Gamma-Funktion. [die\_17, gra\_87]

Asymptotische erwartungstreue Schätzung:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-6)$$

$$\text{Standardabweichung der Mittelwerte:} \quad s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (2-7)$$

$$\text{Erwartungstreue Schätzung bei kleinen Stichproben:} \quad \hat{\sigma} = \frac{s_x}{a_n} \quad (2-8)$$

Die zweite Variante, die Methode B, schätzt die Komponenten mit ihren Standardunsicherheiten auf Basis von Erfahrungswerten von anderen oder ähnlichen Prozessen oder aber nach Angaben des Herstellers sowie den Daten von Kalibrierscheinen. Bei der Entnahme von Unsicherheitsangaben aus dem Kalibrierschein wird folgende Rückführung verwendet:

$$u(x_i)_B = \frac{U}{k} \quad (2-9)$$

Dabei muss der Erweiterungsfaktor  $k$  angegeben sein. Weiterhin kann die Unsicherheit durch eine Intervallangabe, z. B. Daten des Herstellers: Auflösung  $\pm 0,01$  mm, definiert sein. Für diese Fälle wird eine Annahme zum Verteilungsmodell der Schätzwerte unterstellt und mittels Transformationskoeffizient  $b$  über

$$u(x_i)_B = a \cdot b \quad (2-10)$$

ausgedrückt. In Anlage 3 sind die Verteilungstypen zu finden. Ohne Kenntnis über den Verteilungstyp ist es zweckmäßig, eine Rechteckverteilung zu unterstellen. Der Unsicherheitsbeitrag der Ergebnisgröße ( $y$ )  $u$  ergibt sich aus den einzelnen Standardunsicherheiten, die den Einzelmessgrößen beigeordnet sind. Das quadratische Fortpflanzungsgesetz (Gauß'sches Fortpflanzungsgesetz) gilt daher für zufällige Messabweichungen als additives Modell bei nicht korrelierten Eingangsgrößen (2-11). [bos\_15, die\_17, gra\_87]

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2} \quad (2-11)$$

Die Sensitivitäts- oder auch Empfindlichkeitskoeffizienten ergeben sich aus dem partiellen Differential der Einflussgröße  $x$  in Bezug zur Messgröße  $Y$ . Sie geben an, wie groß sich kleine differentielle Wertänderungen der Einflussgröße auf das Messergebnis auswirken. Komplexe Messunsicherheitsbetrachtungen können durch Untergliederung in Teilbilanz übersichtlicher strukturiert werden. [bos\_15, die\_17, gra\_87]

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u(x_i))^2} = \sqrt{(c_1 \cdot u(x_1))^2 + \dots + (c_n \cdot u(x_n))^2} \quad (2-12)$$

$$\text{mit } c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (2-13)$$

## 2.3 Tribologische Grundlagen

Die Tribologie als Wissenschaft von der Reibung, der Schmierung, des Verschleißes und des Kontaktes betrachtet aufeinander einwirkende Oberflächen sowie deren Wechselwirkung und nimmt damit in Bezug auf die Funktionsfähigkeit von Bauteilen und Bauteilsystemen eine elementare Rolle ein. Die Zielstellung ist die Optimierung von technischen Systemen hinsichtlich einer Minimierung von Verschleißverlusten und der Anpassung von Reibungsverhältnissen. Dazu werden die beteiligten Größen in einem sogenannten tribologischen System betrachtet (Bild 2-17), bei dem aufgrund einer Beanspruchung der beiden kontaktierenden Bauteile und der stattfindenden Relativbewegung Stoff-, Energie- und Informationsflüsse übertragen werden und Verlustgrößen entstehen. Die Kontaktverhältnisse entscheiden über die Dimension und Wirkung der verschiedenen Teilgrößen. [bar\_10, czi\_10, muh\_07, pov\_09, som\_10, sta\_05]

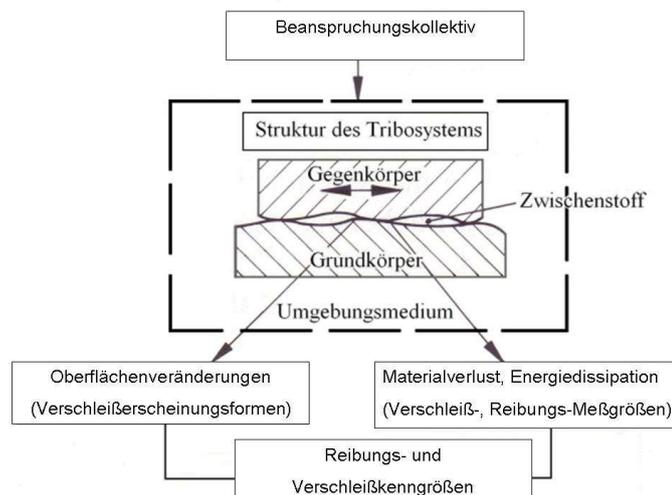


Bild 2-17 Komponenten des tribologischen Systems [czi\_10, S.14, Bild 2.3.1]

Die Kontakt- und Relativbewegungen von zwei Körpern (festen, flüssigen, gasförmigen) bewirken durch mechanische Vorgänge, wie die Reibung, einen fortschreitenden Materialverlust an der Bauteiloberfläche, den Verschleiß. In der Praxis treten beide Erscheinungen gleichzeitig auf. Reibung impliziert Verschleiß, wobei die Dimensionen abhängig von verschiedensten Einflussfaktoren sind. Daher werden Reibung und Verschleiß als qualitativ unterschiedliche Phänomene betrachtet, jedoch sind sie Systemeigenschaften. Für die Vielzahl an technischen Anwendungen müssen aufgrund der Komplexität eigene Untersuchungen durchgeführt werden, um die Verschleiß- und Reibungsgrößen zu ermitteln. Nur in sehr wenigen Fällen sind die tribologischen Zusammenhänge detailliert und vollständig für die Anwendungen bekannt. [czi\_10, muh\_07, pov\_09, schu\_10, som\_10, sta\_05]

### 2.3.1 Grundlagen der Reibung

Leonardo da Vinci legt 1508 den Grundstein der heutigen wissenschaftlichen Reibungslehre. Er untersuchte unterschiedliche Materialien hinsichtlich ihrer Reibkraft und folgerte, die Reibkraft sei unabhängig von ihrer Berührungsfläche. DA VINCI stellte die ersten belastbaren quantitativen Reibungsgesetze auf. Ihm werden die Formulierungen der Gesetze, dass die Reibungskraft proportional zur Belastung und unabhängig von der scheinbaren geometrischen Oberfläche ist, zugeschrieben. Später griff AMONTONS diese Gesetzmäßigkeiten erneut auf, was dazu führte, dass die Proportionalität der Reib- zur Normalkraft als Amontons Gesetz bekannt ist. EULER nahm die Unterscheidung zwischen statischer und kinetischer Reibung vor und entwickelte die mathematischen Grundlagen der trockenen Reibung sowie die Definition des Reibungskoeffizienten  $\mu$ . COULOMB bestätigte 1785 Amontons Ergebnisse und untersuchte Abhängigkeiten der trockenen Reibung von festen Körpern anhand von verschiedenen Materialpaarungen, Oberflächenstrukturen, Schmiermitteln etc. Er erweiterte die einfachen Reibungsgesetze um den Adhäsionsbeitrag. HERTZ löste 1882 das Kontaktproblem zweier elastisch gekrümmter Körper und bildet die Grundlage der Kontaktmechanik. Reibung tritt in der Kontaktzone zweier sich in Relativbewegung zueinander befindlichen Werkstückflächen auf. Eine Kenngröße für das Maß der Reibung wurde als Reibungszahl  $\mu$  (2-14) definiert. Sie ist dimensionslos und beschreibt das Verhältnis zwischen Reibungskraft und Anpresskraft. Die Werkstoffpaarung, das Schmiermittel, die Reibungsart (Roll-, Haft-, Gleitreibung) und der -zustand (Festkörper-, Flüssigkeits-, Gas-, Misch-, Grenzreibung) sowie die Kontaktverhältnisse nehmen Einfluss auf die resultierende Reibungszahl  $f$  bzw.  $\mu$ . Nach Coulombs Auffassung muss demnach eine kritische Kraft – Reibungskraft  $F_R$  – überwunden werden, um einen liegenden Körper auf einer ebenen Unterlage aus dem Ruhezustand zu bringen. Demnach ist die Reibung/Reibungsmessgröße immer eine Systemgröße in Abhängigkeit der Struktur und des Beanspruchungskollektives. [amo\_99, bat\_10, cou\_85, czi\_10, dow\_98, her\_82, her\_95, köh\_05, kra\_82, muh\_07, pop\_09, sol\_07]

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (2-14)$$

### 2.3.2 Ansätze in der Kontaktmechanik

DESAGULIERS erkannte 1725, weit vor COULOMBs Untersuchungen 1779, dass Adhäsion bei der Reibung einen Anteil hat. COULOMB vermutete, dass Anziehungskräfte zwischen den Körpern herrschen. Daraus resultierend griff TOMLINSON 1929 die Theorie auf und nahm an, dass der Energieaufwand, der zum Trennen der Molekülbindungen der Kontaktpartner auf atomarer Ebene benötigt wird, den Reibwert bestimmt. Infolge der HERTZschen Elastizitätstheorie begannen die Untersuchungen für die Berechnung der Kontaktfläche. [des\_25, her\_95]

HOLM gelang es, nachzuweisen, dass unterschiedliche Spannungszustände aufgrund von deformativ veränderten Rauheitsspitzen in verschiedenen Ebenen vorliegen. HOLM erklärte, dass sich einige Rauheitsspitzen nur unter elastischer Verformung, aufgrund der im Kontakt vorhandenen mittleren Spannung, befanden, die kleiner als die Härte des Werkstoffes ist. [des\_25, dow\_98, hol\_46, kra\_82, tom\_29]

BOWDEN und TABOR beschrieben auf Basis der Reibungsgesetze nach DA VINCI und der Bestätigung durch AMONTONS und COULOMB das Übereinandergleiten fester Oberflächen und stellten die Frage nach der wirklichen Kontaktfläche. Dabei wurde erkannt, dass die wirkliche Kontaktfläche beinahe unabhängig von der Oberflächenausdehnung, aber von der zugrunde gelegten Last ist. Hohe örtliche Druckbeanspruchung führt zur plastischen Verformung bis hin zum Werkstofffließen, so dass beanspruchungsgerechte Tragflächen entstehen. Ferner treten in den Mikrokontaktflächen durch Reibung Temperaturerhöhungen auf, die zur Werkstoffverweichung und zur Metallaufschmelzung führen. Ein weiterer Punkt, den BOWDEN anführt, ist die in den Mikrokontakten auftretende Adhäsion. [amo\_99, bow\_64, köh\_05]

KRAGELSKI übte an der reinen Adhäsionstheorie Kritik, da er im Reibungskoeffizienten eine Doppelnatur sah. Sowohl Adhäsion, die durch das Überwinden zwischenmolekularer Kräfte entsteht, als auch plastische sowie elastische Deformation, durch das Berühren und der pflügenden Wirkung der Rauheitsspitzen, sind ursächlich für Reibung. Bestätigt wurde diese Ansicht durch CHEBAKOV. Rechnerisch wies er nach, dass nicht nur seitliche und vor dem Körper befindliche Deformationswellen, sondern auch Sekundärwellen hinter dem Eindringkörper entstehen. Laut KRAGELSKI sind intermolekulare Kräfte für die Ausprägung dieser Deformationswellen zuständig. Er begründet folglich gemeinsam mit TABOR und BOWDEN die Doppelnatur der Reibung. Er führt in Zusammenhang mit der Adhäsion den Begriff eines „dritten Körpers“ ein, welcher für das relative Gleiten eines Festkörpers durch die Bildung einer äußeren und inneren Grenzschicht verantwortlich ist. Während der Reibung bilden sich durch die Grenzschicht sowohl trockene als auch geschmierte Kontakte aus. ARCHAD hat auf Basis des HERTZschen Kontakts die Ergebnisse stufenweise auf raue Oberflächenkontakte übertragen. Mit dem Modell kugelförmiger Erhebung zur Simulation von Rauheiten und Oberflächenkonturen näherte man sich mit steigendem Detailierungsgrad der direkten Proportionalität von Normalbelastung zur Kontaktpunktzahl an. Daraufhin konnten GREENWOOD und WILLIAMSON 1966 die Durchdringungstiefe, die reale Kontaktfläche, die Anzahl von Berührungspunkten, den mittleren Normaldruck und den Plastizitätsindex auf Basis nominell ebener Oberflächen berechnen. Die Proportionalität von Normalkraft zur realen Kontaktfläche konnte für den Fall der Normalverteilung von Rauheitsspitzen nachgewiesen werden. [arc\_57, arc\_61, bow\_59, bow\_64, che\_02, kra\_60, tab\_51, her\_82, her\_70, gre\_70]

COURTNEY-PRATT und EISNER modifizierten die Adhäsionstheorie hinsichtlich der Wechselwirkung von Normal- und Tangentialspannungen. Korrekter wäre es nach Ansicht von KRAUSE und POLL, Reibung als Schubspannung von zwei kontaktierenden Körpern zu definieren. JOHNSON, KENDALL und ROBERTS entwickelten für adhäsive Kontakte 1971 eine Theorie (JKR-Theorie), wobei eine elastische Kugel in Kontakt mit einer starren Oberfläche tritt. Die elastische Kugel mit einem definierten Radius bekommt daraufhin infolge der van-der-Waals-Anziehungskräfte einen charakteristischen „Adhäsionshals“. POPOV griff die Theorie eines dritten Körpers von KRAGELSKI auf, so dass sich die Scherfestigkeit analog zur inneren Reibung einer quasiflüssigen Schicht, wie folgt ergibt:

$$\tau_S = \eta_{Adh} \cdot \frac{\partial u}{\partial h} \quad (2-15)$$

Schwierigkeiten bei der Bestimmung von  $\tau_S$  bestehen darin, dass die Dicke  $h$  und die Viskosität  $\eta_{Adh}$  der quasiflüssigen Schicht nicht bekannt sind. Weiterhin entwickelte er eine Methode der beweglichen zellulären Automaten, um Reibung und Verschleiß zu berechnen. Zum einen bietet dieses Vorgehen hohes Potenzial, auf atomarer und molekularer Ebene Reibung zu betrachten. Zum anderen fehlt die Betrachtung der Wechselwirkung der Teilchen untereinander. BARTHEL veröffentlichte 2000 seine Untersuchungen und ein Modell für trockene und geschmierte Kontakte zur Berechnung der Reibungskraft. Unter Variation der Normalkraft untersuchten ETSIN et al. Haftreibwerte von Kugel-Scheibe-Kontaktpaaren. Dabei wurde Kupfer gegen gehärteten Stahl bzw. Saphir im Normalkraftbereich von  $F_N = 0 - 120$  N und bei einem Kugeldurchmesser von 3 – 15 mm getestet. Die Oberflächenbeschaffenheit von den stark polierten Oberflächen lag zwischen  $R_a = 0,01 \mu\text{m}$  und  $R_a = 0,02 \mu\text{m}$ . Als kennzeichnende Größe wurde eine kritische Last untersucht. Diese ist proportional zum Elastizitätsmodul, zur kleinsten Härte und zum Durchmesser. Die kritische Last ist erreicht, sobald der weichere Werkstoff plastisch zu fließen beginnt. Die Haftreibwerte sinken sehr stark (ca. -80 %), wenn die aufgebraachte Normalkraft um ein Vielfaches die kritische Last übersteigt. KÖHLER untersuchte die Parameter des Haftreibwertkoeffizienten zwischen zwei metallischen Festkörpern auf Grundlage des COULOMB'schen Modells. Final konnten keine Verbindungen von Oberfläche, den werkstoffspezifischen Eigenschaften, dem Zusammenspiel von adhäsiven/deformativen Komponenten sowie dem sich einstellenden Haftreibwert hergestellt werden. [arc\_57, arc\_61, bat\_10, bow\_59, bow\_64, che\_02, cou\_57, ets\_05, gre\_66, joh\_71, köh\_05, kra\_80, kra\_82]

### 2.3.3 Ansätze zur Ermittlung der Kontaktfläche

HERTZ legte die Grundlage der allgemeinen Theorie für die Berührung zweier kugelförmiger Körper. Dabei wird zunächst die Oberflächenrauheit unterschlagen sowie von einer elliptischen Kontaktfläche ausgegangen, wobei keine Adhäsion stattfindet. Somit ergibt sich für die Kontaktfläche folgende Formel in Anlehnung an [pop\_09]:

$$A_{\text{Kontakt-HER}} = \pi ab = \pi \tilde{R}d. \quad (2-16)$$

mit  $a = \sqrt{R_1 d}$ ,  $b = \sqrt{R_2 d}$  für die Halbachsen und  $\tilde{R} = \sqrt{R_1 R_2}$ . Die Eindrucktiefe ist dabei mit dem Buchstaben d gekennzeichnet. In Bild 2-18 sind die Parameter grafisch dargestellt. [her\_82, her\_95, kir\_07, pop\_09]

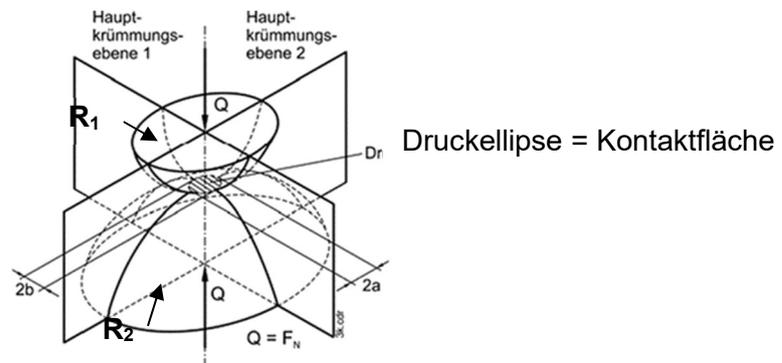


Bild 2-18 HERTZsche Kontakttheorie [kir\_07]

Unter Einwirkung von Adhäsion ist bei der JKR-Theorie die Ausbildung eines Halses charakteristisch (Bild 2-19). Ferner wird die Oberflächenstruktur vernachlässigt, so dass sich ein Kontaktgebiet a ergibt. Die Modellvorstellung dahinter ist, dass eine elastische Kugel in Kontakt mit einer starren idealen Platte tritt. Somit ist das Kontaktgebiet abhängig vom Radius R, dem Elastizitätsmodul E, der Querkontraktionszahl  $\nu$  und der relativen Oberflächenenergie  $\gamma_{12}$ . Die Oberflächenenergie ergibt sich aus den dielektrischen Konstanten  $\epsilon$  beider Kontaktpartner. [joh\_85, kir\_07, pov\_09]

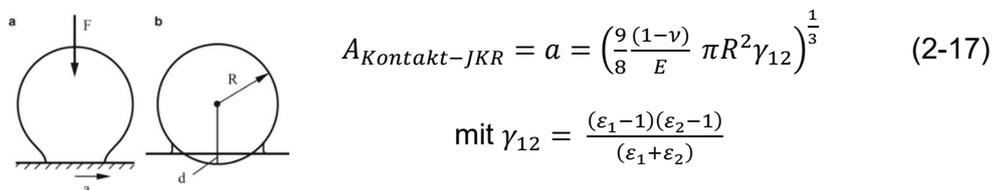


Bild 2-19 Ausbildung des adhäsiven Kontaktgebietes (JKR-Theorie) [pov\_09]

Für den Kontakt rauer Oberflächen wird das Modell von GREENWOOD und WILLIAMSON genannt, das auf der Basis der HERTZschen Kontakttheorie beruht. Die Rauheitsspitzen – Asperiten – werden mit gleichem Krümmungsradius und die Höhe als stochastisch verteilt angenommen. [gre\_66, her\_82, her\_95, joh\_85, kir\_07, pov\_09]

Aus diesem Ansatz, in Verbindung mit der HERTZschen Theorie, ergibt sich die Kontaktfläche eines Asperiten in guter Näherung. Dabei ist  $l$  als quadratischer Mittelwert der Höhenverteilung ( $R_q$ ) zu verstehen. POPOV nutzt diesen Ansatz zur Weiterentwicklung, wobei Anpresskraft (Normalkraft), das effektive elastische Elastizitätsmodul  $E^*$  und der quadratische Mittelwert der Höhenverteilung (hier  $\nabla z$ ) Beachtung finden. Angenähert ergibt sich die Beziehung für die wahre Kontaktfläche: [gre\_66, her\_82, her\_95, pov\_09]

$$A_{\text{Kontakt-POPOV}} = \frac{2 F_N}{\nabla z E^*} = \frac{2 F_N (1-\nu^2)}{\nabla z E} \text{ mit } E^* = \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (2-18).$$

1960 leiten KRAGELSKI und DEMKIN eine Gleichung für die Berechnung von realen Kontaktflächen basierend auf Materialtraganteilskurven und Rauheitsparametern her. Es wird zwischen der Berechnung für elastische und plastische Kontaktflächen unterschieden. GREENWOOD und TRIPP erweiterten das bereits modifizierte ARCHAD-Modell unter Berücksichtigung eines ideal plastischen Verformungsverhaltens und der Gaußschen Spitzenverteilungen um den Betrag der plastischen Kontakte. ABOU-ALY untersuchte 1972 technische Oberflächen, um die wahre Berührungsfläche zu ermitteln. Er nutzte dafür eine radioaktive Beschichtung, die sich durch den Kontakt auf den nicht beschichteten Körper überträgt, und wertet die wahre Kontaktfläche anhand von mikroskopischen Aufnahmen und dem elektrischen Übergangswiderstand aus. Die beste von ihm aufgestellte Methodik ist die kartografische Darstellung, bei der viele einzelne Tastschnitte aneinandergesetzt und einzeln mithilfe des REM per Mikrokontaktstellen händisch ausgewertet werden. COURTNEY-PRATTs Untersuchungen zeigten, dass sich bei steigender Normalkraft die Kontaktfläche vergrößert, jedoch die Flächenpressung sinkt. Basierend auf den Untersuchungen des Verbindungsstellenwachstums sollte die Adhäsionstheorie die Wechselwirkung zwischen Normal- und Tangentialspannung berücksichtigen. Nach MOORs Auffassung ergibt sich die wahre Kontaktfläche aus der metallischen Kontaktfläche und der Härte bzw. der Fließspannung, wobei  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $k$  Koeffizienten sind (2-18). [abo\_72, arc\_61, cou\_57, gre\_70, kra\_60, moo\_51]

$$\frac{A_m}{A} = \frac{\alpha}{k} - \frac{\beta}{k} p_m \quad (2-19).$$

SOLOVYEV berücksichtigt in seiner Arbeit unter Berechnung mittels Boussinesq-Gleichung und FEM die Topographie. Er untersucht neben geschmierten Kontakten auch raue trockene Kontakte. Für die Ermittlung einer Kontaktfläche bezieht er sich auf die Methode nach REDLICH. Dabei wird die simulierte Oberfläche mit einer Rauheit beaufschlagt und anhand der Simulationsparameter (Druck, Werkstoffkonstanten etc.) die resultierende simulierte Kontaktfläche berechnet. [bat\_10, köh\_05, joh\_85, red\_02, sol\_07]

KÖHLER betrachtet in seinen Untersuchungen zwar die Oberflächengeometrie, jedoch bezieht er sich auf die Rauheit  $R_z$  als Vergleichskenngroße. Er schlussfolgert aufgrund des Zusammenspiels von Formabweichungen, Welligkeiten und Rauheiten, dass kein gleichmäßiger Kontakt und keine Korrelation zum Haftreibungswert vorliegen. [bat\_10, köh\_05, joh\_85, red\_02, sol\_07]

### 2.3.4 Festkörperreibung

Auf den Ansatz der Doppelnatur laut BOWDEN/TABOR beruhend, ergeben sich die theoretischen Grundlagen der gesamten Reibungsberechnung anhand der Komponenten der Adhäsions-, der Deformations- und der Flüssigkeitsreibung (2-20). Für trockene Kontakte entfällt der Terminus  $F_{Fluid}$ , siehe Formel 2-21. [bat\_10, bow\_64, kra\_82, red\_02, sol\_07]

$$F_{Ri} = F_{Def\ i} + F_{Adh\ i} + F_{Fluid} \quad (2-20)$$

$$F_{Ri} = F_{Def\ i} + F_{Adh\ i} \quad (2-21)$$

#### 2.3.4.1 Deformationskomponente

Für die Ermittlung der Festkörperreibung muss der durch die aufgebrachte Kraft verursachte Anteil der Deformation berechnet werden. Eine Berechnung nach HERTZ ist für ideal glatte Oberflächen mit einfachen Geometrien möglich. Reale Oberflächen, auch als raue Oberflächen bezeichnet, hingegen sind in ihrer Berechnung komplexer, so dass numerische Lösungen zielführend sind. In der Arbeit von SOLOVYEV findet die Berechnung auf der Boussinesq-Verformungsgleichung basierend auf dem Modell des elastischen Halbraums statt. Dabei wird die Deformationskomponente des Reibwertes in einen reversiblen elastischen und in einen irreversiblen plastischen Anteil gegliedert. Der durch die aufgebrachte Energie entstandene reversible Deformationsanteil wird infolge der Rückfederung des Werkstoffes zu einem Großteil zurückgegeben. SOLOVYEV stellt dazu die Formeln anhand der elastischen und plastischen Deformationsarbeit bezogen auf die Verschiebung  $\Delta x$ , siehe Formel 2-22, auf. [bat\_10, joh\_85, kra\_82, red\_02, sol\_07]

$$F_{def} = \frac{\sum_i(\alpha_{Hys\ i} * \Delta W_{elast\ i}) + \sum_i \Delta W_{plast\ i}}{\Delta x} \quad (2-22)$$

Der plastische Anteil wird aus der Kraft  $F_{lim}$  und der Verschiebung des diskreten Elements  $\Delta \delta_{plast\ i}$  gebildet. Dabei wird die Grenzpressung  $p_{lim}$  unterstellt. SOLOVYEV nutzt die Härte des Werkstoffes, wohingegen BARTEL die 3-fache Streckgrenze (Tresca-Bedingung) für die Grenzpressungsberechnung zugrunde legt. Der elastische Deformationsanteil ergibt sich aus der auftretenden elastischen Deformation des diskreten Elementes. [bat\_10, kra\_82, red\_02, sol\_07]

Im ersten Schritt wird eine Normalkraft aufgebracht und im zweiten Schritt eine Kraft, die zur Oberflächenverschiebung dient. Daraus ergeben sich zwei elastische Deformationen, resultierend aus unterschiedlich wirkenden Kräften. [bat\_10, kra\_82, red\_02, sol\_07]

$$\Delta W_{plast\ i} = F_{lim} * \Delta\delta_{plast\ i} \quad (2-23)$$

$$\Delta W_{elast\ i} = \frac{1}{2} * (F_{II} + F_I) * \Delta\delta_{elast\ i} \quad (2-24)$$

### 2.3.4.2 Adhäsionskomponente

Die Adhäsionskomponente wird durch den Aufbau oberflächennaher Bereiche bestimmt. Aufgrund der sich in Relativbewegung zueinander befindlichen Oberflächen werden die Moleküle durch hohe Energiedichte angeregt. KRAGELSKI, PANIN et al. und CHAKHVOROSTOV stellten die These der Existenz einer Schicht im „quasiflüssigen Zustand“ auf und wiesen nach, dass diese durch Reibungspartikel entsteht. Während der Reibung wird Material von beiden Werkstoffkörpern abgetrennt und vermischt, anschließend haftet es sich wieder an die Körper an. Für die Entstehung und Wirkung einer solchen Adhäsionsschicht sind das Material und die Reibleistung entscheidend. Laut BOWDEN und TABOR ergibt sich die Reibungskraft ausgelöst durch Adhäsion als ein Produkt der Kontaktfläche und der Scherfestigkeit. Die Scherfestigkeit  $\tau_s$  ist laut KRAGELSKI ebenfalls von der Kontaktpressung  $p$  und den Materialeigenschaften abhängig, so dass aus Versuchsreihen ein Piezokoeffizient (Geradenanstieg)  $\beta$  ermittelt wurde. Die atomaren Wechselwirkungen der Oberflächen wirken bei  $\tau_0$  infolge einer Extrapolation von einem Kontaktdruck gleich Null. [bow\_64, kra\_82, pan\_01, sha\_03]

$$F_{Adh} = \tau_s * A \quad (2-25)$$

$$\tau_s = \tau_0 + p * \beta \quad (2-26)$$

### 2.3.5 Haftreibwertermittlung und der Bewertungsansatz nach SCHULLER

In der Literatur existiert eine Vielzahl an Haftreibwerten, die mit variierenden Materialien, Kontaktverhältnissen, Testständen, Modellen sowie Reibzuständen untersucht wurde. Die im Forschungsverbund zu untersuchenden Welle-Nabe-Verbindungen modellieren einen flächigen, ebenen und trockenen Ring-Kontakt, für die es kaum Reibwertbetrachtungen gibt. Dafür wurde an der Professur Konstruktionslehre der TU Chemnitz ein Referenzprüfstand und ein standardisiertes Prüfverfahren für den Stirnkontakt unter Torsionsschub entwickelt (Bild 2-20). [aif-01, grä\_15, schu\_10]

Das Prüfverfahren für einen flächigen, ebenen und trockenen Ring-Kontakt des quasistatischen Torsionsversuchs nutzt einen Hydraulikzylinder, welcher die Normalkraft  $F_N$  auf das obere Spannelement aufbringt, so dass die Ringflächen der eingespannten Probekörper aufeinander ausgerichtet sind. Eine zwischen Zylinderstange und Druckstempel montierte Kraftmessdose erfasst die Kraft. Die Torsionsmomenteinleitung erfolgt über die Messwelle am unteren Probekörper. Eine biegeeweiche Balgkupplung zur Torsionsmomentübertragung gewährleistet die Kompensation verfälschter Biegemomente. Wirkende Axialkräfte sowie Reaktionsmomente von der Verdrehung der oberen Gegenkörperaufnahme werden ins Gestell abgeleitet. Das Torsionsmoment wird direkt an der Messstelle per DMS-Vollbrückenschaltung erfasst. Ein Wirbelstromsensor (oberer Gegenhalter) misst den Verdrehwinkel zur gegenüber angebrachten geneigten Platte an der Messwelle. Eine permanente Aufzeichnung der Normalkraft  $F_N$ , des Torsionsmoments  $T/M_T$  und des Verdrehwinkels  $\varphi$  (Abtastrate: 800 Hz) ermöglicht eine Darstellung in Drehwinkel-Torsionsmoment-Diagrammen (Rutschkurven). Die Berechnungsmethodik auf Basis des größten Torsionsmoments enthält neben der Haftreibung teilweise Gleitreibung. [aif-01, grä\_15, schu\_10]

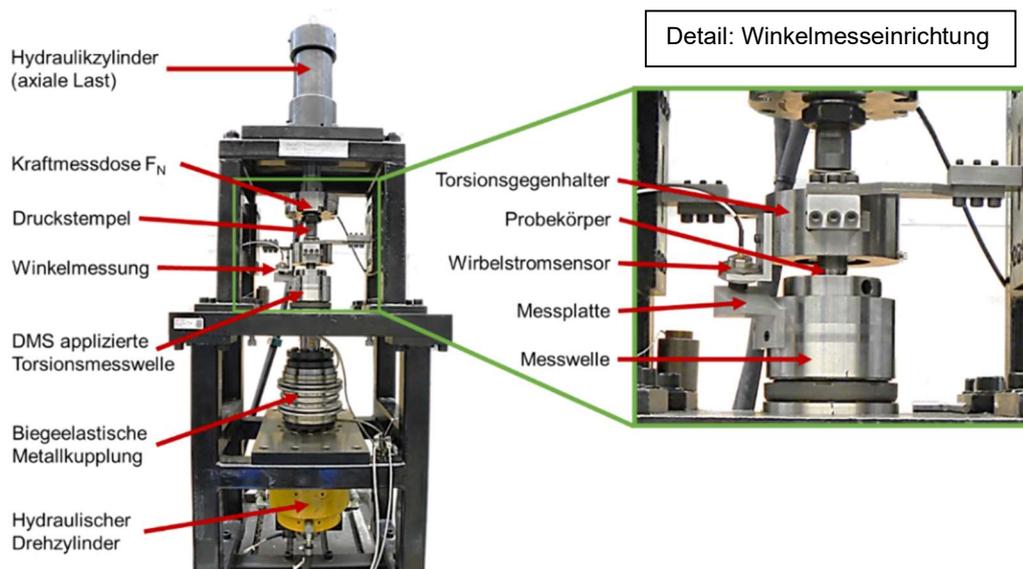
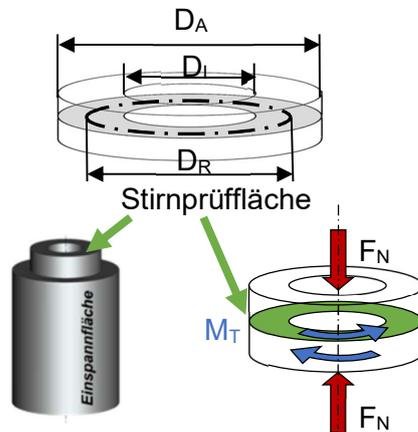


Bild 2-20 Aufbau des Torsionsreibwertprüfstandes [grä\_15, S. 30]

Weiterhin sind elastische Verformungen der Probekörper, des Prüfstandes, partielle Bewegungen sowie adhäsive und kohäsive Bindungskräfte in der Fuge im Prozess enthalten. Für unterschiedliche Verbindungen existieren unterschiedliche Reibwertcharakteristiken. Bei einigen Verbindungen kann es vorkommen, dass das größte Torsionsmoment bei bereits „durchgerutschten“ (versagten) Proben auftritt. Bei anderen Versuchen gibt es keinen signifikanten Übergang zwischen Haften und Gleiten. [aif\_01, sch\_10, grä\_15]

Abhilfe schafft ein Verdrehwinkel-bezogener Ansatz nach SCHULLER, der sich an der Vorgehensweise zur Ermittlung der Dehngrenze bei Zugversuchen lt. ISO 6892 für die Werkstoffkenngröße  $R_p 0,2$  (Spannung bei 0,2 % der irreversiblen Verformung) orientiert. [aif\_01, sch\_10, grä\_15]



$$D_R = \frac{4 \cdot \left( \left( \frac{D_A}{2} \right)^3 - \left( \frac{D_I}{2} \right)^3 \right)}{3 \cdot \left( \left( \frac{D_A}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_I}{2} \right)^2 \right)} \quad (2-27)$$

$$\mu = \frac{2 \cdot M_t}{D_R \cdot F_N} \quad (2-28)$$

Bild 2-21 Berechnung des Haftreibungswertes [aif\_01, lei\_12, sch\_10]

Äquivalent zur plastischen Verformung beim Spannungs-Dehnungs-Diagramm verhalten sich beim Reibschluss die plastischen Formänderungen der Oberflächenspitzen sowie die gegenseitige „Verzahnung“ der Prüfflächen. Der lineare Torsionsanstieg wird parallel für eine festgesetzte Verschiebung in diesen definierten Weg/Winkel verschoben. Das dazugehörige Torsionsmoment für die definierte Verschiebung von  $\varphi = 0,1^\circ$  wird in die Formel 2-28 zur Haftreibungwertberechnung eingesetzt. Am mittleren Reibdurchmesser (2-27) entspricht das einem Verschiebeweg von 20  $\mu\text{m}$ . [6892, aif\_01, grä\_15, sch\_10]

### 3 Lösungsansatz

Nicht offen dargelegte Aufbau-, Prüf- und Verfahrensbedingungen sowie die Komplexität der Wirkungsweise von Bauteilen sind Gründe für die in der Literatur unterschiedlichen Haftreibwerte und Reibzahlen. Auf verschiedenen Versuchsmodalitäten basierend sind diese Werte kaum miteinander vergleichbar und sie haben einen allgemeinen Charakter. Für reale Anwendungen ergeben sich daher in Bezug auf die korrekte Auswahl des Reibwertes Unsicherheiten. Einerseits fehlen die konkreten Materialzusammensetzungen, die Kontaktart, die Flächenpressung – insgesamt das Belastungskollektiv –, die Umgebungsbedingungen und die reale Kontaktfläche. Andererseits stellt sich die Frage nach dem zugrunde gelegten Versuchsmodell. Diese Unsicherheitskomponenten wirken auf den Reibwert ein und führen zu differenzierten Reibzahlen. Bei dem verwendeten Berechnungsmodell des Haftreibwertes lt. SCHULLER (Teilprojekt I) werden eine gleichbleibende Kontaktfläche unabhängig von ihrer Beschaffenheit sowie eine Homogenität des Materials und die Isotropie der Oberfläche unterstellt. [aif\_01]

Für eine genaue reale und funktionale Vorhersage sollten entsprechende Gewichtungen und/oder Faktoren, die die Schwankungen in den Prüfbedingungen und letztlich in der Funktion verursachen, berücksichtigt werden. Letztlich sollte das Berechnungsmodell nach SCHULLER um diese Funktionsfaktoren erweitert oder ein komplett neues Modell modifiziert werden. Die bisher genutzten standardisierten Oberflächenkennwerte zur Beschreibung einzelner Funktionen können zwar verwendet werden, jedoch sind sie für die bereits dargelegte Komplexität der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen im Zusammenhang zum Haftreibwert und im Sinne eines ganzheitlich wirkenden tribologischen Systems nicht zielführend (Bild 2-15). Die aktuell genormten Oberflächenkennwerte (2D und 3D) nutzen einen Bezug errechnet aus den gemessenen Oberflächenstrukturen auf Basis der kleinsten Abweichungsquadrate zur Nennform. Weiterhin trennt eine Mittellinie durch verschiedene langwellige und kurzwellige Filter Welligkeit und Rauheit. Die Schwierigkeit bei der Bewertung liegt darin, dass der Bezug für die Berechnung von Oberflächenkennwerten bei unterschiedlichen Oberflächen verschieden ist. Der Lösungsansatz für die nachfolgenden Untersuchungen im Forschungsrahmen des Teilprojektes II beruhen auf dem Grundgedanken eines komplexen tribologischen Systems. Dabei ist die Identifizierung der Einflussgrößen auf das tribologische System Voraussetzung für das analytische Vorgehen zur Zusammenhangsdarstellung von Oberfläche und Funktion. Auf Basis eines Ursache-Wirkungs-Diagramms werden die Haupteinflussfaktoren auf den Haftreibwert herausgearbeitet. Das entwickelte theoretische Konzept zur geometrischen Oberflächenbewertung integriert die Haupteinflussfaktoren.

---

Dies impliziert neben der Oberflächenstruktur eine gesamtheitliche Bezugsbildung sowie die Betrachtung der Formabweichungen, wie Ebenheit und Lageabweichungen, beispielsweise der Rechtwinkligkeit. Anhand dessen werden Untersuchungen für die funktionale Bewertungshöhe durchgeführt und die geometrische Bewertung angepasst. Sowohl für den Prozess der Haftreibwertbestimmung als auch für die geometrische Bewertung sind Unsicherheitsbilanz zu erstellen, um die neuen Parameter zu validieren. Statistische Verfahren dienen zur systematischen Analyse der großen Anzahl an unterschiedlichen Messdaten. Dabei werden Ausreißer und die Haupteinflussfaktoren detektiert. Für die Untersuchung der Auswirkungen auf den Haftreibwert stehen Korrelations- und Regressionsanalyse zur Verfügung. Anhand von Konfidenzintervallen und den entsprechenden p-Werten können Abhängigkeiten aufgezeigt werden. Zum Schluss sind für einen ganzheitlichen Ansatz im Sinne des tribologischen Systems die neuen Oberflächenparameter in die Berechnung des Haftreibwertes einzupassen. Damit wird die Brücke zwischen den tribologischen und geometrischen Oberflächeneigenschaften geschlagen. Zudem könnten durch eine vollständig vorhersagbare und reliable Berechnung des Haftreibwertes die Bauteilauslegung verbessert, das Design im Sinne der Materialeinsparung optimiert und teure zerstörende Prüfmethode reduziert werden. [aif\_01, grä\_15, sch\_10]

## 4 Identifizierung und Spezifizierung von Einflussgrößen mit Wirkung auf die Haftreibwertbestimmung

### 4.1 Qualitative Erfassung funktionsrelevanter Einflüsse anhand des Ursache-Wirkungs-Diagramms

Für eine zielführende Versuchsplanung und eine wissenschaftliche Ursachenforschung sind zunächst alle Einflussfaktoren auf den Haftreibwert vollständig zu identifizieren. Anhand des nach Kaoru ISHIKAWA entwickelten Konzepts des Ursache-Wirkungs-Diagramms werden potenzielle Ursachen auf einen bestimmten Effekt analysiert und visualisiert. Übergeordnet steht bei der hier vorliegenden Thematik der Prozess der Haftreibwertbestimmung im Fokus. Folgerichtig ergeben sich untergeordnete Problemfelder, wie Messmethode, Messeinrichtung, Messobjekt, Umgebungsbedingungen und Messperson; die Hauptkategorien des Prozesses. Die wichtigsten Unterpunkte sind jeweils an die entsprechenden Hauptgruppierungen, siehe Bild 4-1, angetragen. Anhand dieser Aufstellung können bereits im Vorfeld einige Einflüsse aus der weiterführenden Betrachtung eliminiert werden, da diese durch den Versuchsaufbau konstant gehalten werden können.

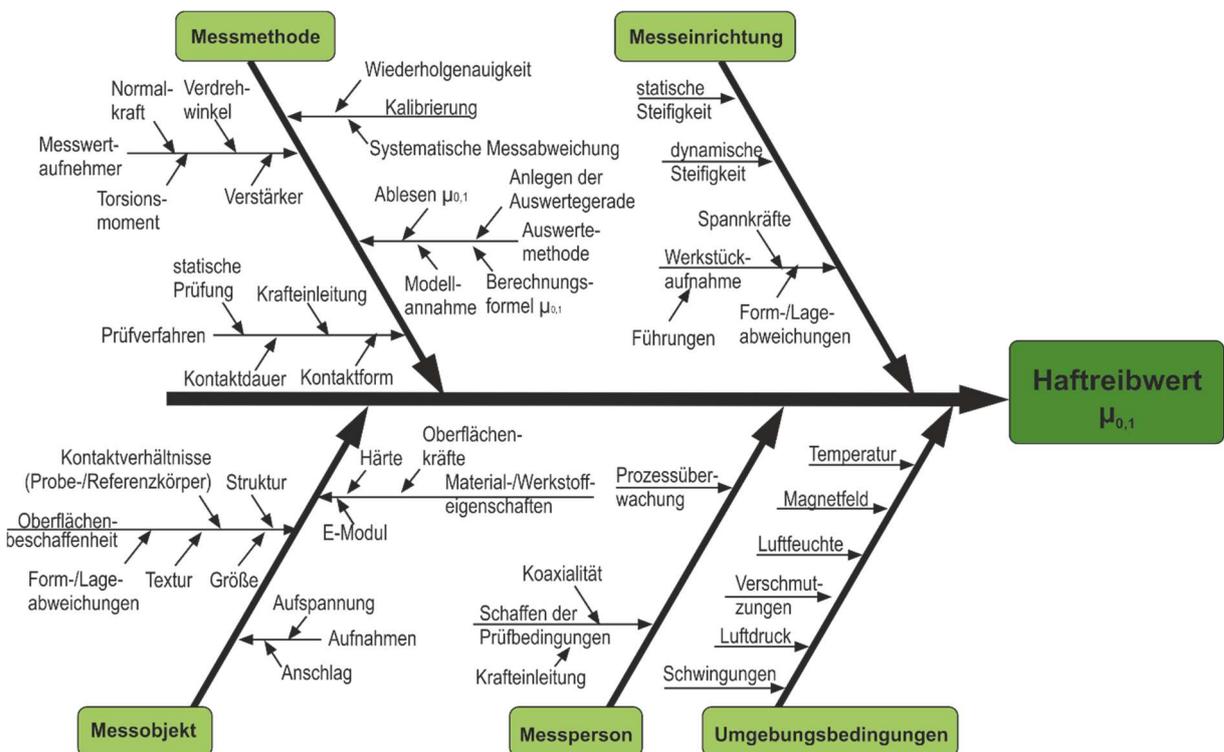


Bild 4-1 Ursache-Wirkungs-Diagramm: Einflussfaktoren auf den Haftreibwert

### **Umgebungsbedingungen**

Ein gleichbleibender Luftdruck sowie die Luftfeuchte werden mithilfe von Sensoren in den Versuchsräumen während der Reibwertmessung kontinuierlich überwacht, aufgezeichnet und geregelt. Externe Schwingungen sind als Fehlereinfluss durch ein entkoppeltes Maschinenbett und den Ausschluss parallellaufender Versuchsreihen, welche ebenfalls in der Versuchshalle laufen, auf ein Minimum beschränkt. Durch die Vorgabe einer Reinigungsprozedur vor jeder Haftreibwertprüfung wird der Aspekt der Verschmutzung des Proben- und Gegenkörpers eliminiert.

### **Messperson**

Anhand einer Messanweisung wird die Vorgehensweise zum richtigen Einbau der Prüfkörper festgelegt. Des Weiteren unterstützt die Konstruktion des Prüfstandes den korrekten Einbau der Probenkörper. Zusätzlich sind Abbruchkriterien in der Messsoftware hinterlegt, die bei nicht vollständiger Kraftaufbringung sowie im Falle eines frühzeitigen Durchrutschens der Prüfkörper (Bauteilversagen) die Messperson durch ein Signal auf einen Fehlversuch hinweisen. Ein weiterer Punkt ist die gestaffelte Freigabe des Messprozesses. Außerdem werden alle Reibwertprüfungen von geschultem Personal durchgeführt, was zu einer Einflussminimierung und einer Kontinuität im Messprozess führt.

### **Messeinrichtung**

Die dynamische Steifigkeit kann ebenfalls als Einfluss entfallen, da in den Versuchsplänen nur statische Reibwertversuche durchgeführt werden. Resultierend daraus ergibt sich der Verbleib der in Anlage 5 aufgezeigten Einflussfaktoren auf den Haftreibwert für die nachfolgenden Untersuchungen zur weiteren Messunsicherheitsbetrachtung.

## 4.2 Semiquantitative Bewertung der Einflussfaktoren

Auf Grundlage des modifizierten Ursache-Wirkungs-Diagramms aus dem vorangegangenen Kapitel werden die verbleibenden Faktoren bewertet. Gute Möglichkeiten, die Einflüsse semiquantitativ zu werten und zu wichten, bieten die Nutzwertanalyse, der paarweise Vergleich, Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analysen oder auch die QFD-Methode (Quality-Function-Deployment). Bei diesen Methoden wird anhand von gewählten Kriterien eine vergleichende Abschätzung getroffen. Eine reine quantitative Bewertung lässt sich nur anhand von eindeutig definierbaren Kennzahlen oder messbaren Größen festsetzen. Die genannten Methoden nutzen für die vergleichende Abschätzung nur die Faktoren und Festlegungen, die zuvor subjektiv ausgewählt wurden und bei dem Vergleich auch subjektiv gewichtet werden. Deshalb bezeichnet man diese Methoden auch als semiquantitativ. Bei der vorliegenden Problematik handelt es sich jedoch um ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren, welche nicht eindeutig quantitativ bestimmt werden können. Basierend auf dem reduzierten Ursache-Wirkungs-Diagramm werden die Einflüsse in einem Strukturbaum neu angeordnet (Bild 4-2) und folgerichtig ihren Ursachen zugeordnet. Dies dient der besseren Übersichtlichkeit und ist für die Wichtung durch den paarweisen Vergleich grundlegend.

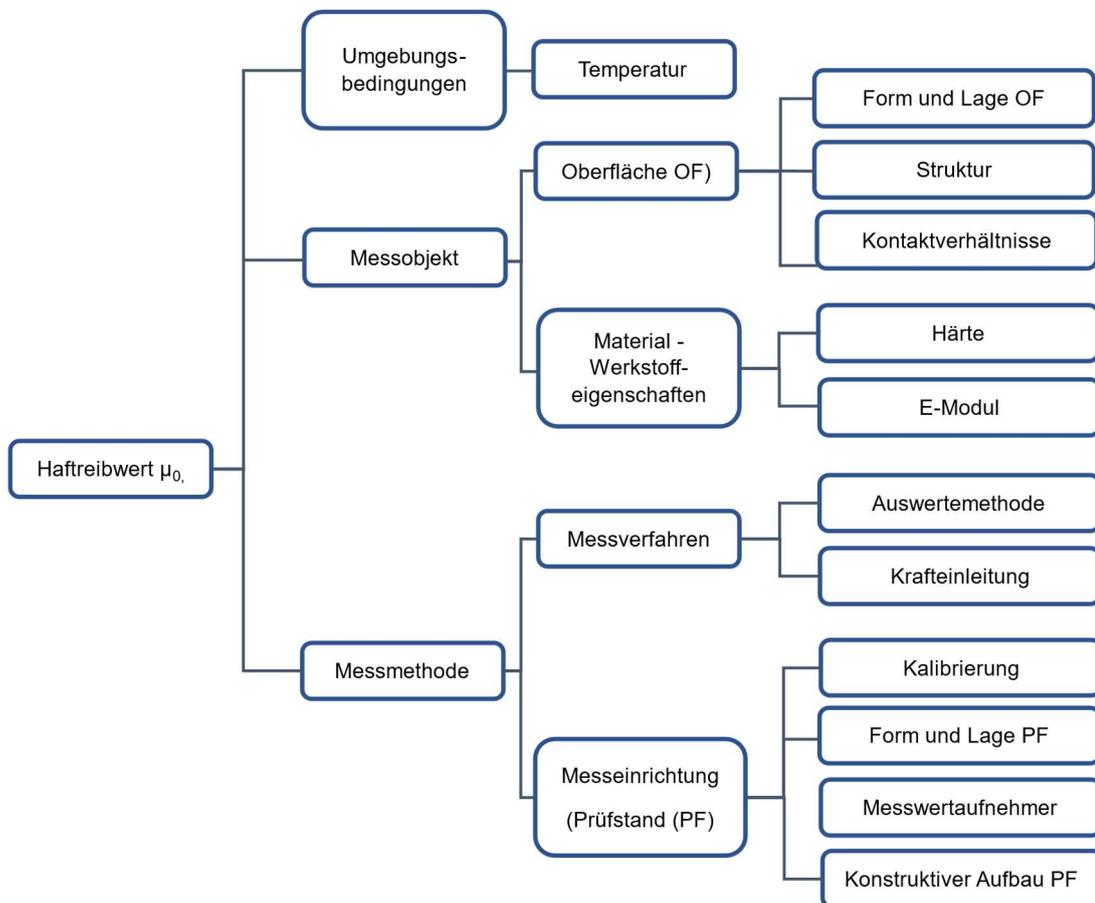


Bild 4-2 Strukturbaum des Haftreibwertprüfprozesses

Die aufgeschlüsselten Einflussgrößen werden als Qualitätskriterien oder auch Zielgrößen in die Matrix des paarweisen Vergleichs eingetragen. Im Anschluss werden immer zwei Einflüsse, Zeile zu Spalte, miteinander verglichen. Eine Wichtung wird anhand einer Einschätzung, ob das Kriterium aus der Spalte oder aus der Zeile gegenüber dem anderen dominanter, gleichrangig oder unterlegen ist, vorgenommen. Anhand der vergebenen Wichtungsfaktoren wird eine Summe aus allen vergebenen Punkten und deren Wichtung gebildet, woraus sich eine Rangfolge ableitet. Die zwölf verbliebenen Zielgrößen des Haftreibwertprüfprozesses sowie der ausführliche dazugehörige paarweise Vergleich finden sich in Anlage 5. Das Ergebnis ist in Tabelle 4-1 aufgezeigt. Für einen funktionsorientierten Forschungsansatz verbleiben aus dieser Bewertung die Zielgrößen bis zur Rangfolge 8 für die Untersuchungen.

Tabelle 4-1: Ergebnis des paarweisen Vergleichs für den Haftreibwertprüfprozess

Zielgröße	Summe	Rang
Temperatur	5	12
Form und Lageabweichungen Oberfläche (OF)	14	1
Struktur der Oberfläche	14	1
Kontaktverhältnis	13	5
Härte	9	9
E-Modul	12	7
Auswertemethode	14	1
Krafteinleitung	6	11
Kalibrierung der MWA	7	10
Form und Lageabweichen des Prüfstandes (PF)	12	7
Messwertaufnehmer (MWA)	14	1
Konstruktiver Aufbau PF	13	5

Bei dem Vergleich zeichnet sich ebenfalls die Wichtigkeit des Prüfstandes und dessen Konstruktion ab. In Vorbereitung auf die Messunsicherheitsbetrachtung und zur weiteren Einflussanalyse wird sich der Methode der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, kurz FMEA, bedient. Hierfür werden nach einer formalisierten Vorgehensweise mögliche Probleme oder Fehlerursachen anhand der Komponenten und der Funktionsweise des Produktes, Prozesses oder der Konstruktion ermittelt und analysiert. Für den Prüfstand und somit den Einfluss auf den Prozess der Haftreibwertmessung wurden die Schritte der Strukturanalyse und der Funktionsanalyse einer Konstruktions-FMEA durchgeführt.

Die Auflistung der Prüfstandskomponenten, ihre Funktionszuordnung und ihre Fehlfunktionen sowie ihre kritischen Komponenten sind in Anlage 7 zu finden. Zudem sind die Fehlfunktionen sowie die Auswirkungen auf den Messprozess beschrieben bzw. es ist angegeben, wie diese sich im Messprozess verhalten und dadurch ausgeschlossen werden können. Durch eine jeweils angepasste Konstruktion können viele Fehlfunktionen ausgeschlossen werden, andere wiederum würden sich durch fehlende Messsignale und ein fehlerhaftes Kraft-Weg-Diagramm abzeichnen. Im Hinblick auf den Haftreibwerteinfluss sind die Messwertaufnehmer und mögliche Signalveränderungen sowie der Versatz von Komponenten entscheidend, die eine mögliche Änderung wirkender Kräfte und Signale nach sich ziehen würden. Somit werden die Vorspannkraft, das Torsionsmoment, die Abstands-/Verdrehwinkelmessung, die Axialkraftschwankungen sowie eine nicht zentrisch aufgebrachte Normalkraft des Druckstempels auf die Kalotte in die Messunsicherheitsbetrachtungen aufgenommen.

Für weitere systematische Untersuchungen hinsichtlich der Korrelation zur Oberfläche ist die Kenntnis über die Streuung des Messprozesses des Haftreibwertes entscheidend. Wesentlich entsteht dies durch den Prüfstand und das Auswerteverfahren (siehe paarweiser Vergleich). Die ermittelten Haftreibwerte bilden dabei die beobachtete Prozessstreuung. Um die entscheidenden Einflüsse und ihre Wirkung auf den Haftreibwert zu identifizieren, ist es wichtig, die Streuung des Messprozesses zu ermitteln und diese von der beobachteten Prozessstreuung zu subtrahieren (Bild 4-3). Übrig bleibt dann die tatsächliche Prozessstreuung, welche abhängig von den tatsächlich einzustellenden Parametern, wie der Form- und Lageabweichung sowie der Oberfläche und den Kontaktverhältnissen, sind. Anhand einer Messunsicherheitsbetrachtung wird der Streuungsanteil des Messprozesses an der Haftreibwertermittlung ermittelt. Auf Basis dessen kann die tatsächliche Prozessstreuung innerhalb einer Oberflächenstrukturierung unter Vergleichsbedingungen ermittelt werden.

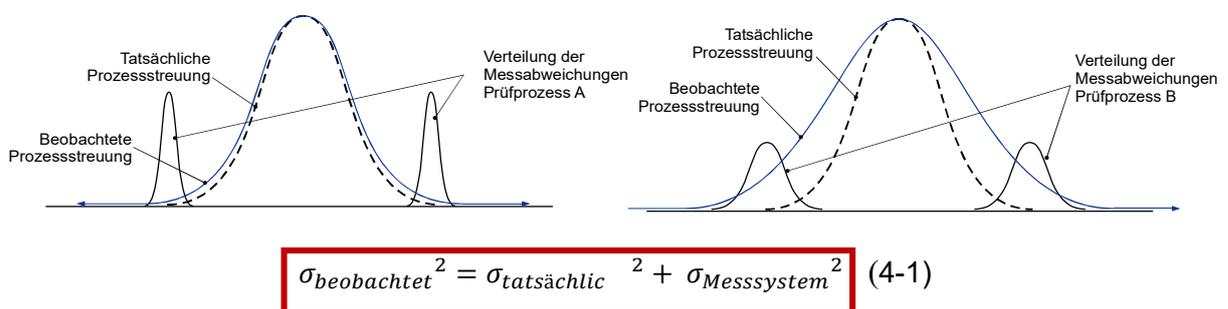


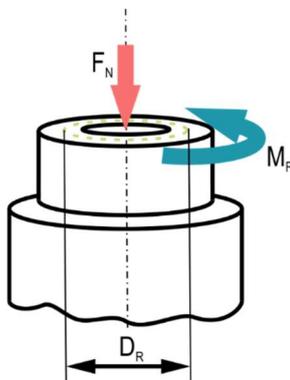
Bild 4-3 Zusammenhang zwischen beobachteter und tatsächlicher Prozessstreuung in Abhängigkeit vom Prüfprozess [qda\_11]

### 4.3 Messunsicherheitsbetrachtung und Eignungsnachweis für den Prozess der Haftreibwertermittlung

Die Einflussfaktoren in Absatz 4.1 wirken auf den Haftreibwert ein. Die Haftreibwertberechnung basierend auf Formel 4-10 ist die Grundlage der Messunsicherheitsbetrachtung und der Herleitung des Messunsicherheitsbilanz für den Prozess der Haftreibwertbestimmung sowie der resultierenden Abweichungen der einzelnen Einflussfaktoren. Für die Bewertung der einzelnen Komponenten stehen Kalibrierscheine, Herstellerangaben sowie statistische Beobachtungen zur Verfügung. Folgend ist die Herleitung der Haftreibwertformel  $\mu_{0,1}$  aufgeführt.

COULOMB'sches Haftreibungsgesetz:  $F_R \leq \mu_0 \cdot F_N$  (4-2)

Allgemeine Drehmomentgleichung  $M = F \cdot l$  (4-3)



$$T_R = M_R = F_R \cdot \frac{D_R}{2} \quad (4-4)$$

$$F_R = \frac{2 \cdot T_R}{D_R} \quad (4-5)$$

$$D_R = \frac{2}{3} \frac{(D_A^3 - D_I^3)}{(D_A^2 - D_I^2)} \quad (4-6)$$

Herleitung von  $D_R$ :

$$M_R = \tau r dA, \quad dA = \varphi r dr$$

$$M_R = \tau \varphi \int r^2 dr = \tau \varphi \int_{D_I}^{D_A} r^2 dr = \frac{1}{3} \tau \varphi \left( \left( \frac{D_A}{2} \right)^3 - \left( \frac{D_I}{2} \right)^3 \right) \quad (4-7)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \text{ und } M_R = F \cdot D_R$$

Nach der Integration von  $M_R$  nach  $dr$ , wobei  $\varphi = 2\pi \cdot 360^\circ$  entspricht, ergibt sich nach dem Einsetzen von  $\tau$ ,  $M_R$  und  $A$ , unter Annahme der Flächenkonstanz folgende Formel:

$$D_R = \frac{2\pi}{3A} \left( \left( \frac{D_A}{2} \right)^3 - \left( \frac{D_I}{2} \right)^3 \right) \quad (4-8) \text{ mit}$$

$$A = \frac{\pi}{2} r^2 = \frac{\pi}{2} (r_A^2 - r_I^2) = \frac{\pi}{2} \left( \left( \frac{D_A}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_I}{2} \right)^2 \right)$$

Aus der Umstellung der Gleichung 3-2 nach dem Haftreibwert und dem Einsetzen der modifizierten Gleichung aus 3-5 ergibt sich:

$$\mu = \frac{2 \cdot T_R}{D_R \cdot F_N} \quad (4-9)$$

Aufgrund der schwankenden Charakteristik der sogenannten Rutschkurve wird ein auf den relativen Verdrehwinkel von  $0,1^\circ$  bezogener Haftreibwert  $\mu_{0,1}$  angegeben. Die Auswertung erfolgt durch das Anlegen einer Geraden an den ermittelten Torsionsmoment-Verdrehwinkel-Graph.

$$\mu_{0,1} = \frac{2 \cdot T_{R0,1}}{D_R \cdot F_N} \quad (4-10)$$

Folglich ergeben sich aus der Formel 4-10 Haupteinflusskomponenten. Mit dem Resultat aus dem paarweisen Vergleich können die dortigen Zielgrößen den Hauptkomponenten zugeordnet werden. Die verwendeten Sensoren zur Ermittlung der Hauptkomponenten und der Messaufbau führen zu systematischen und zufälligen Abweichungen, die bei der Berechnung der Messunsicherheit berücksichtigt werden müssen. Vereinfacht sind daher drei Untermodelle für  $D_R$ ,  $T_{R0,1}$  und  $F_N$  definiert, welche die einzelnen Einflussgrößen berücksichtigen. Ein Auszug der Darstellungen und der Berechnung von Einflussgrößen sowie der Unterbilanzrechnungen findet sich in der Anlage 8 wieder.

<b>Hauptkomponente <math>D_R</math></b>	
Einflussgrößen:	$\delta D_a$ Abweichungen von $D_a$ durch Fertigung $\delta D_i$ Abweichungen von $D_i$ durch Fertigung $D_{R\Delta T}$ Ausdehnung infolge der Temperaturänderung $D_{RV}$ Versatz der beiden Probekörper zueinander basierend auf dem konstruktiven Spielraum des Prüfstandes $\delta D_{RAV}$ Fehler aus der Annahme der Flächenkonstanz
Modellgleichung:	$D_R = D_R - \delta D_a - \delta D_i - D_{R\Delta T} - D_{RV} - \delta D_{RAV}$ (4-11)
Annahmen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unkorrelierte Eingangsgrößen</li> <li>• Additives Modell</li> </ul>
Sensitivitätskoeffizienten $c_i$ :	$c_{Da} = \frac{\partial D_R}{\partial D_a} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3D_a^2 \cdot (D_a^2 - D_i^2) - 2D_a \cdot (D_a^3 - D_i^3)}{(D_a^2 - D_i^2)^2} \quad (4-12)$ $c_{Di} = \frac{\partial D_R}{\partial D_i} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2D_i^2 \cdot (D_a^3 - D_i^3) - 3D_i \cdot (D_a^2 - D_i^2)}{(D_a^2 - D_i^2)^2} \quad (4-13)$ $c_A = \frac{\partial D_R}{\partial A} = -\frac{2\pi}{3A^2} \left( \left( \frac{D_a}{2} \right)^3 - \left( \frac{D_i}{2} \right)^3 \right) \quad (4-14)$
Teilbilanzgleichung:	$u_{(D_R)} = \sqrt{(c_{Da} \cdot u_{(D_a)})^2 + (c_{Di} \cdot u_{(D_i)})^2 + (u_{(D_{R\Delta T})})^2 + (u_{(D_{RV})})^2 + (c_A \cdot u_{RAV})^2} \quad (4-15)$

Die Einzelkomponenten der Messunsicherheitsanteile für  $D_R$  beinhalten die Abweichungen resultierend aus der Fertigung ( $\delta D_a, \delta D_i$ ) sowie dem Zusammenhang, dass neben der Änderung des mittleren Reibdurchmessers  $D_{RV}$  sich gleichwohl die Kontaktfläche  $D_{RAV}$  reduziert, wodurch ein Anstieg der Flächenpressung unter gleichbleibender Kraft erfolgt. Ein möglicher Torsionsmomentanstieg würde sich damit aus der erhöhten Flächenpressung und nicht aus der Oberflächenstruktur und den Verbindungseigenschaften ergeben. Folglich werden diese Anteile in die Unsicherheitsberechnung des Torsionsmomentes und des mittleren Reibdurchmessers  $D_R$  aufgenommen. Analysen wiesen auf Basis konstruktiver Gestaltung einen maximalen Versatz von 2,0 mm auf (worst case). Temperaturschwankungen und die daraus resultierenden Reibdurchmesseränderungen werden in der Komponente  $D_{RAT}$  berücksichtigt.

Für das Verfahren zur Ermittlung des Reibmoments  $T_R$  bei  $0,1^\circ$  relativer Verdrehung wird bei der grafischen Auswertung an das Moment-Weg-Diagramm eine Anstiegsgerade angelegt und um  $0,1^\circ$  relativer Verdrehung nach rechts verschoben. Anschließend wird der  $T_{R0,1}$ -Wert als Schnittpunkt zwischen dem Graph und der verschobenen Geraden abgelesen. Da dieses Verfahren manuell erfolgt, wurde mittels eines programmierten Algorithmus in MATLAB eine statistische Messwertreihe untersucht, bei der eine standardisierte Gaußgerade eingepasst und linear verschoben wurde. Zur Bewertung der Abweichungen wurde die Standardunsicherheit auf Basis des Unterschieds zwischen grafisch-manuell ermitteltem Torsionsmoment und dem Gauß eingepassten Torsionsmoment errechnet. Aufgrund des Stichprobenumfangs wird der Schätzwert um  $a_n$  (für  $n = 25$ ) = 0,99 für  $\delta V_{TR0,1}$  korrigiert (Formel 2-8). Linearitäts-, Auflösungs- und Genauigkeitsabweichungen des Wirbelstromsensors zur Winkelmessung (Wegmessung) werden aufgrund der direkten Einwirkung auf die Berechnung der Drehmoment-Winkel bzw. Weg-Graphen mit  $\delta\varphi_L, \delta\varphi_A, \delta\varphi_G$  berücksichtigt. Die Berechnung der Unsicherheitskomponente der Dehnungsmessstreifen (DMS) fundiert auf den Herstellerdaten von HBM sowie deren Erfahrungen. Eine Anpassung dieser Unsicherheitskomponente auf den Einsatz im Haftreibwertprüfstand erfolgte. Zudem beeinflussen die Abweichungen der Probenkörpergeometrie ( $D_{RV}, \delta D_{RAV}$ ) sowie Anzeigeabweichungen ( $\delta A_{WTR}, \delta S_{WTR}, \delta R_{TW}, \delta A_{TW}$ ) der einzelnen Messgrößen das Ergebnis. Der Einsatz von A/D-Wandlern zur Aufzeichnung aller Signale führt zu einer treppenförmigen Kennlinie, woraus ein Quantisierungsfehler entsteht. Dieser Fehler wurde jedoch in Anbetracht seiner geringen Auswirkung auf die Messunsicherheit aus der Gesamtbetrachtung eliminiert.

<b>Hauptkomponente <math>T_{R0,1}</math></b>	
Einflussgrößen:	$\delta\varphi_L$ Linearitätsabweichungen bei der Winkelmessung $\delta\varphi_A$ Auflösungsabweichungen bei der Winkelmessung $\delta\varphi_G$ Genauigkeitsabweichungen bei der Winkelmessung $\delta A_{WTR}$ relative Anzeigeabweichung $T_R$ $\delta S_{WTR}$ relative Spannweitenabweichung $T_R$ $\delta DMS$ Abweichungen der Dehnungsmessstreifen $\delta R_{TW}$ Restanzeige $T_W$ $\delta A_{TW}$ Anzeigeauflösung $T_W$ $\delta V_{TR0,1}$ Abweichungen aufgrund des Ermittlungsverfahrens für $T_{R0,1}$
Modellgleichung:	$T_{R0,1} = T_R - \delta\varphi_L - \delta\varphi_A - \delta\varphi_G - \delta A_{WTR} - \delta S_{WTR} - \delta DMS - \delta R_{TW} - \delta A_{TW} - \delta V_{TR0,1} \quad (4-16)$
Annahmen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unkorrelierte Eingangsgrößen</li> <li>• Additives Modell</li> </ul>
Teilbilanzgleichungen: Ermittlungsverfahren für $T_{R0,1}$ aus statistischen Untersuchungen:	
$u_{V_{TR,1}} = \frac{s_{T_{R0,1}}}{a_n} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{\text{Abweichung}_i} - \bar{x}_{\text{Abweichung}})^2} \quad (4-17)$	
Mit: $x_{\text{Abweichung}_i} =  T_{R0,1 \text{ Graphisch}_i} - T_{R0,1 \text{ Gaußalgorithmu}_i}  \quad (4-18)$	
$u_{(T_{R0,1})} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{\varphi L}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{\varphi A}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{\varphi G}\right)^2 + \left(\frac{u_{AWTR}}{a_n}\right)^2 + \left(\frac{u_{SWTR}}{a_n}\right)^2 + \dots} \quad (4-19)$ $\sqrt{\dots \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{DMS}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{RTW}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} u_{ATW}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} u_{V_{TR0,1}}\right)^2}$	

Bei der Unsicherheitsbetrachtung der Normalkraft gehen neben den Anzeige- und Signalabweichungen ( $\delta A_{WFN}$ ,  $\delta U_{FN}$ ,  $\delta U_{KMD}$ ,  $\delta S_{KMD}$ ) auch die Abweichungen resultierend aus der Auswertemethodik ( $\delta A_{FN}$ ) mit ein. Die Kräfteinleitung von  $F_N$  erfolgt am oberen Ende des Prüfstandes über einen hydraulischen Druckzylinder, welchem die Kraftmessdose vorgeschaltet ist.

Über einen Druckzylinder wird die Kraft auf eine Kugelkalotte auf den oberen Probekörper gegeben. Durch eine nicht koaxiale und in der Rechtwinkligkeit abweichende Kraftaufbringung auf die Kalotte vermindert sich die tatsächliche Kraft. Es folgt eine nicht zentrische Krafteinleitung auf den Probekörper, die zu Veränderungen im Haftreibwert führt. Hierfür fließt die Komponente der winkelbezogenen Abweichung ( $\delta\alpha$ ) bei der Krafteinleitung in das Messunsicherheitsbilanz ein.

<b>Hauptkomponente <math>F_N</math></b>	
Einflussgrößen:	$\delta A_{WFN}$ relative Anzeigeabweichung $F_N$ $\delta U_{FN}$ relative Spannweitenabweichung $F_N$ $\delta A_{FN}$ Abweichung der Auswertecharakteristik $\delta U_{KMD}$ relative Spannungsabweichung der Kraftmessdose $\delta S_{KMD}$ relative Signalabweichung der Kraftmessdose $\delta\alpha$ winkelbezogene Abweichung der Krafteinleitung
Modellgleichung:	$F_N = F_N - \delta A_{WFN} - \delta U_{FN} - \delta A_{FN} - \delta U_{KMD} - \delta S_{KMD} - \delta\alpha$ (4-20)
Annahmen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unkorrelierte Eingangsgrößen</li> <li>• Additives Modell</li> </ul>
Teilbilanzgleichung:	
$u_{(F_N)} = \sqrt{\left(\frac{u_{AWFN}}{a_n}\right)^2 + \left(\frac{u_{UFN}}{a_n}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}u_{AFN}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}u_{UKMD}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}u_{SKMD}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}u_\alpha\right)^2}$ (4-21)	

<b>Komponente <math>\mu_{0,1}</math></b>	
Einflussgrößen:	$\delta T_{R0,1}$ Unsicherheit resultierend aus dem Torsionsmoment $T_{R0,1}$ $\delta D_R$ Unsicherheit resultierend aus dem mittleren Reibdurchmesser $\delta F_N$ Unsicherheit resultierend aus der Normalkraft
Modellgleichung:	$\mu_{0,1} = \mu - \delta T_{R0,1} - \delta D_R - \delta F_N$ (4-22)
Annahmen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unkorrelierte Eingangsgrößen</li> <li>• Additives Modell</li> </ul>
Sensitivitätskoeffizienten $c_i$ :	$c_{Tr0,1} = \frac{\partial \mu_{0,1}}{\partial T_{R0,1}} = \frac{2}{D_R F_N}$ (4-23)
	$c_{Dr} = \frac{\partial \mu_{0,1}}{\partial D_R} = \frac{-2 T_{R0,1}}{D_R^2 F_N}$ (4-24)
	$c_{FN} = \frac{\partial \mu_{0,1}}{\partial F_N} = \frac{-2 T_{R0,1}}{D_R F_N^2}$ (4-25)
Bilanzgleichung:	
$u_{\mu_{0,1}} = \sqrt{\left(c_{Tr0,1} \cdot u_{(T_{R0,1})}\right)^2 + \left(c_{Dr} \cdot u_{(D_R)}\right)^2 + \left(c_{FN} \cdot u_{(F_N)}\right)^2}$ (4-26)	

Die Berechnung des gesamten Messunsicherheitsbilanz (Formel 4-27) basiert auf dem quadratischen Fortpflanzungsgesetz nach Gauß (Formel 2-11) und stützt sich weiterhin auf die allgemeingültige Formel für die kombinierte Standardunsicherheit:

$$U = u \cdot k \quad (4-27)$$

Zur Bewertung aller Einflüsse auf den Haftreibwert  $\mu_{0,1}$  wird für die Berechnung der kombinierten Standardunsicherheit U ein Vertrauensniveau von 95 % unterstellt. Der Faktor k ist dabei auf 2 festgesetzt. Für die dimensionslose Größe des Haftreibwertes ergibt sich eine Unsicherheit von:

$$U_{0,95} = 2 \cdot u_{\mu_{0,1}} = 2 \cdot 0,002836 = 0,005672 \quad (4-28)$$

Zur Beurteilung der Eignung dieses Prüfprozesses und der mit dem Prüfstand ermittelten Ergebnisse sowie der zielführenden Analyse funktionaler Einflüsse wird ein Eignungskennwert anhand der bereits errechneten erweiterten Messunsicherheit nach folgender Formel ermittelt:

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{0,95}}{TOL} \cdot 100\% \quad (4-29)$$

Zur Berechnung eines toleranzähnlichen Wertes TOL anhand der Statistikreihe (n = 25) wurde, ausgehend vom Mittelwert, die Spanne vom Maximal- zum Minimalwert bestimmt (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Werte aus der Statistikserie

Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert	MW ± toleranzähnlicher Bereich
0,215	0,27	0,16	0,215 ±0,055

Es ergibt sich ein Eignungswert von 10,90 %, welcher unterhalb des vom VDA Band 5 empfohlenen Richtwertes von 15 % liegt. Somit ist die Eignung des Prüfprozesses für den Haftreibwert nachgewiesen.

## 5 Theoretische Vorgehensweise zur geometrischen und funktionalen Bewertung

### 5.1 Konzept zur geometrisch funktionalen Bewertung

Für eine funktionale Bewertung ist es entscheidend, die Funktionseinflüsse zu qualifizieren, zu quantifizieren und Zusammenhänge abzuleiten. Neben der Einflussanalyse in Kapitel 4 ist es für die Herleitung von funktionsbeschreibenden geometrischen Größen wichtig, gezielt die Einflüsse zu verändern und deren Auswirkungen auf das Resultat zu beschreiben. Dabei spielt die infolge von inneren und äußeren Bedingungen sich verändernde Oberfläche die entscheidende Rolle. Vorangestellt ist eine gezielte Einstellung der Oberflächenstruktur. Dafür werden verschiedene Strukturen mittels unterschiedlicher Fertigungsprozesse erzeugt. Um die Oberfläche sowie deren Änderung zu bestimmen, ist es notwendig, die Probekörper mit all ihren geometrischen Abweichungen vor der Reibwertprüfung und danach messtechnisch zu erfassen. Darin sind sowohl die Form- und Lageabweichungen als auch die Oberflächenstruktur enthalten. Für das Wiederauffinden von Strukturen und deren Veränderung infolge der Krafteinwirkung durch die Prüfung sowie das Vereinen aller geometrischen Abweichungen ist ein stabiles Bezugssystem notwendig. Zum besseren Verständnis und um aufeinanderfolgende Prozesse sowie zu untersuchende Größen darzustellen, dient der in Bild 5-1 gezeigte Prozessablauf.

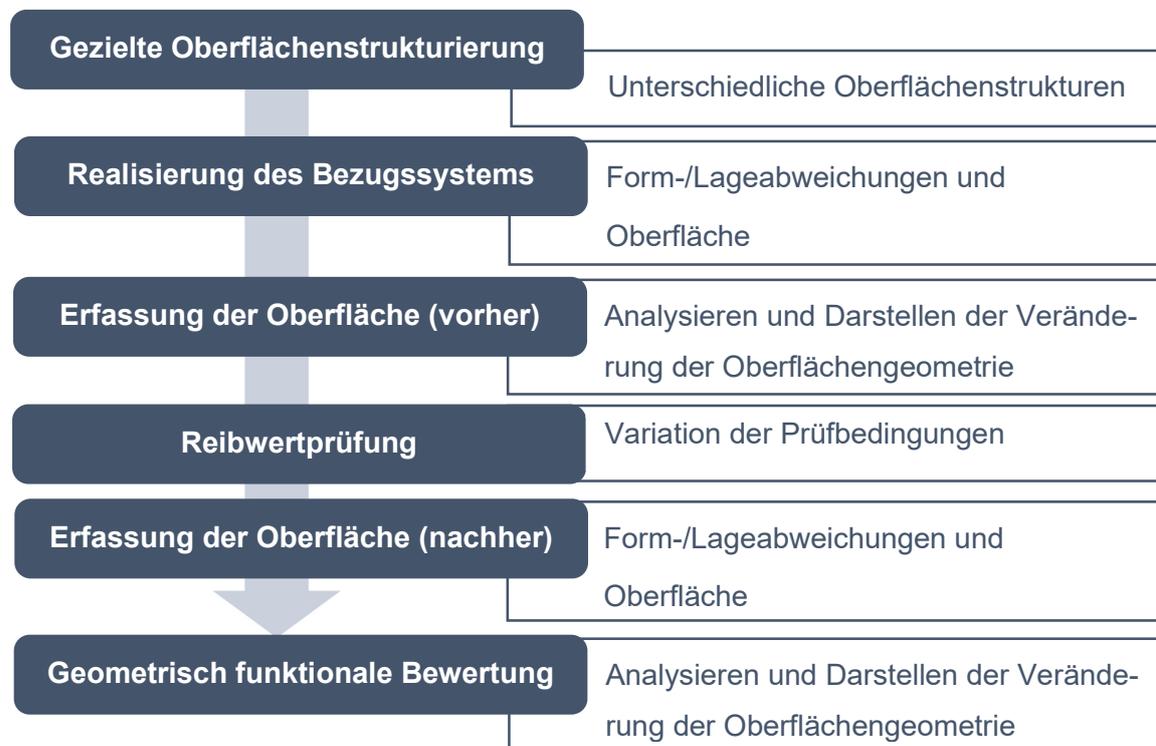


Bild 5-1 Konzept zur geometrisch funktionalen Beschreibung

## 5.2 Definition eines einheitlichen Bezuges

Um die Oberflächenänderungen durch die Strukturierung sowie die Veränderung infolge von Krafteinwirkung durch die Reibwertprüfung zu detektieren und Rückschlüsse auf funktionsrelevante Strukturen zu ziehen, ist eine eindeutige Zuordnung durch einen Bezug notwendig. Zudem können verschiedene Extraktionsmethoden miteinander verglichen werden. Weiterhin kann ein Bezugssystem zur Parameterdefinition unabhängig von der Struktur genutzt werden. Bisher sind die bekannten Oberflächenparameter an einem Mittelliniensystem, das selbst an der Oberflächenstruktur gebildet wird, definiert. Durch einen nicht Mittellinien-orientierten Bezug können alle Abweichungen in einem System erfasst und beschrieben werden. Um all diese Anforderungen an ein Bezugssystem für den Funktionsfall der Haftreibwertprüfung zu vereinen, sind bereits aus den eigenen Vorarbeiten [sch\_12] die folgenden Anforderungen bekannt:

- festgelegten Bereich eindeutig identifizieren (Mess- und Auswertebereich)
- permanent, einfach und systematisch erkennbar
- Anpassung an verschiedene Werkstoffe und Oberflächenstrukturen
- variabel in z-Richtung (Tiefenrichtung) für Verschleißanalysen
- keine Beeinträchtigungen der Mess- und Prüfergebnisse
- geeignet zur Bezugsbildung.

Anhand dessen ist eine Markierung von drei Härteeindrücken nach Vickers systematisch und in Abhängigkeit der Oberflächenstrukturierung auf die Reibfläche aufzubringen. Die drei Vickerseindrücke dienen sowohl vor als auch nach der Reibwertprüfung zur Definition eines Koordinatensystems für die Oberflächenausrichtung und Auswertung, siehe Bild 5-2. Für die Bezugsrealisierung wird ein MatLAB-Programm genutzt. Dafür sind lediglich unterschiedliche Abstände der Markierungen zueinander einzuhalten, um eindeutig und reproduzierbar die Markierung zu erkennen (Anlage 9). Von dem Bezugsnullpunkt sollen die Form-/Lage- und Rauheitscharakteristiken gemeinsam nach der beschriebenen Methode auf Grundlage einer Schnitthöhe definiert werden.

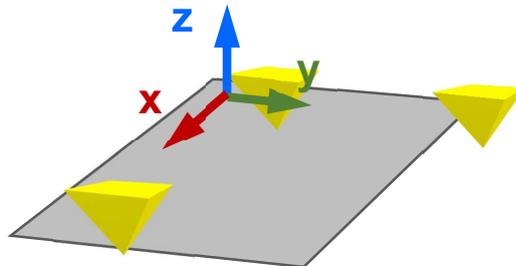


Bild 5-2 Theorie der Bezugsbildung

### 5.3 Ansatz zur geometrischen Oberflächenbewertung

Die in Kapitel 2.1.4 aufgezeigten Oberflächenparameter sind, wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt, statistisch verteilte Kennzahlen, die sich für die Beschreibung unterschiedlich hergestellter Oberflächengeometrien in Bezug zum Haftreibwert nicht eignen. Aus den Vorüberlegungen, eine funktionale Relevanz herauszustellen, ergeben sich für die geometrische Charakterisierung andere Möglichkeiten, Oberflächen zu betrachten und zu beschreiben. Im speziellen Falle des Haftreibwerts sind die in Kontakt tretenden Oberflächen, über die der Haftreibwert ausgebildet wird, signifikant. Ausgangspunkt für die Untersuchungen ist eine ungefilterte Oberfläche, welche jeweils mit einem Punktabstand von 3  $\mu\text{m}$  gesamtflächig und zusätzlich in dem Markierungsfeld mit einem Punktabstand von 1  $\mu\text{m}$  erfasst wurde. Durch die Filterung können Anteile der Oberfläche, die haftreibwertrelevant sind, herausgefiltert oder verzerrt werden. Aus diesem Grund werden für die komplexen Untersuchungen keine Filter verwendet. Des Weiteren sollen die Ebenheit der Reibfläche, die Konzentrizität der Kreisringfläche und die Rechtwinkligkeit der Reibfläche zur Bauteilachse erfasst werden. Sowohl die Oberflächen- als auch die Form- und Lagemessungen erfolgen jeweils vor und nach der Reibwertprüfung. Aus den Vorbetrachtungen wird der Ansatz, Oberflächen in Hügel und Täler zu untergliedern, weiterverfolgt. Zur Segmentierung in Hügel und Täler stehen unterschiedliche Varianten zur Verfügung. Die Schwellwertsegmentierung ist dem Wasserscheidenalgorithmus nach MAXWELL vorzuziehen, um eine dem Kontaktfall nachempfundene Segmentierung vornehmen zu können. Anhand eines zu definierenden Schwellwertes können damit die relevanten Hügel herausgestellt und charakterisiert werden (Bild 5-3).

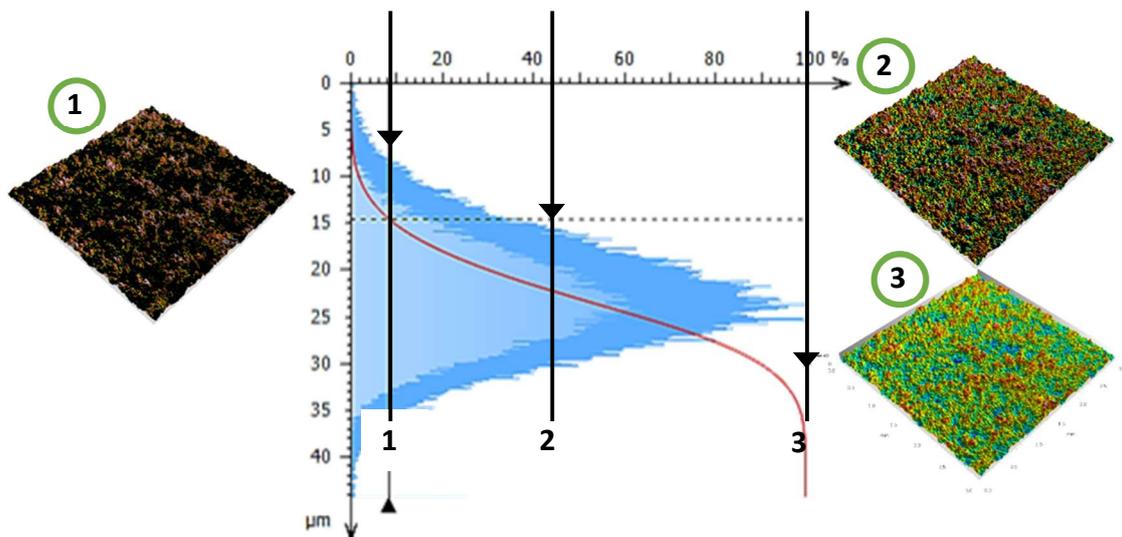


Bild 5-3 Schwellwertsegmentation

Zur Beschreibung dieser Erscheinungen dienen Höhen-, Flächen- und Volumenangaben sowie zur Ausprägung der Textur die Richtungsangaben. Entscheidend für eine funktionale, hier dem Haftreibwert angepasste, Charakterisierung ist die Festlegung des Schwellwertes, auch Schnitt- oder Bewertungshöhe  $c$  genannt. Die Ermittlung der relevanten Schnitthöhe erfolgt aus den Drückversuchen sowie den Betrachtungen der Veränderung der Oberflächenstruktur durch die Reibwertprüfung. Bei einem definierten Prozentsatz wird an der Materialanteilkurve die dazugehörige Bewertungshöhe  $c$  bestimmt. Diese Bewertungshöhe  $c$  dient bei der extrahierten Oberfläche als Bewertungsgrundlage. Dabei beeinflussen die Oberflächenstruktur sowie die Kontaktbedingungen die Bewertungshöhe  $c$  für die funktionale Charakterisierung. Ausgehend vom höchsten Oberflächenpunkt in Richtung des Materials wird die Bewertungshöhe  $c$  als Ebene definiert. Zur Oberflächencharakterisierung stehen alle Anteile oberhalb dieser Ebene zur Verfügung. Die geometrische Charakterisierung erfolgt anhand der Inselanzahl, der projizierten Durchschnittsoberfläche einer Insel und dem Durchschnittsmaterialvolumen einer Insel (Bild 5-4). Alle unterhalb befindlichen Strukturen werden nicht geometrisch bewertet.

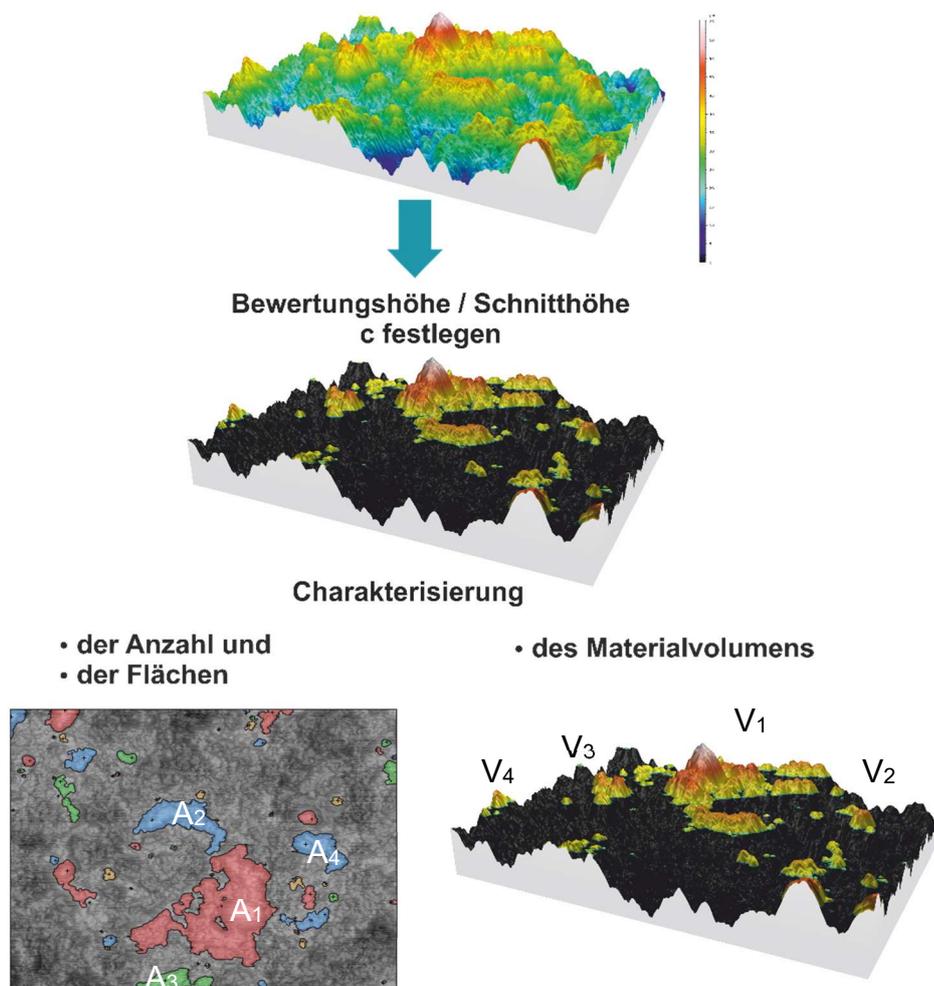


Bild 5-4 Geometrische Charakterisierung

Unter der Prämisse, dass im Funktionsfall nur Segmente der Oberfläche in Kontakt treten, sind diese herauszustellen und zu charakterisieren. Aus den in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Druckversuchen sollen für verschiedene Oberflächenstrukturen mit variierenden Normalkräften resp. Flächenpressungen die Deformationen und die anfangs real wirkenden Kontaktflächen ermittelt werden. Weiterhin wird die Strukturrichtung, verursacht durch die Fertigungsstrategie, und deren auftretende Superposition mit der Gegenstruktur im Falle der Paarung untersucht. Sowohl die Strukturrichtung anhand eines Winkels als auch die in Abhängigkeit des Paarungskontaktes resultierende Kontaktstruktur sind zu analysieren.

Nicht nur die Oberflächentextur, sondern auch die langwelligen Oberflächenanteile der Form beeinflussen die Funktionalität, so dass die Abweichungen der Ebenheit und der Rechtwinkligkeit der Prüffläche mithilfe eines Formmessgerätes Mahr MFU 100 erfasst werden. Durch eine spezielle Konfiguration sind in einer Aufspannung sowohl die Form- und Lageabweichungen als auch die kurzwelligen Oberflächentexturen der Rauheit messbar. Mit dem Wechsel von einem Kugeltaster zu einem Rauheitstaster wird die Kreisringfläche mit ihren Abweichungen dann dreidimensional extrahiert. Mit einer kleineren Auflösung von  $1\ \mu\text{m}$  wird das markierte Oberflächenfeld mittels Mahr Perthometer für eine lückenlose Analyse erfasst (Bild 5-5). Zusätzlich können durch die Integration eines Atomic-Force-Mikroskops inklusive eines taktilem Cantilevers mit Spitze (AFM, dt.: Rasterkraftmikroskop) kontakt- und reibwertrelevante Strukturen im Nanobereich identifiziert und durch die sehr hohe Auflösung von  $25\ \text{nm}$  detailliert beschrieben und quantifiziert werden. Die Nutzung der verschiedenen Messgeräte ist mithilfe der aufgebrachten Vickersmarkierung möglich. Dies stellt sicher, dass ausgehend von dem Bezug die gleichen Oberflächenstrukturen wiedergefunden und bewertet werden können.

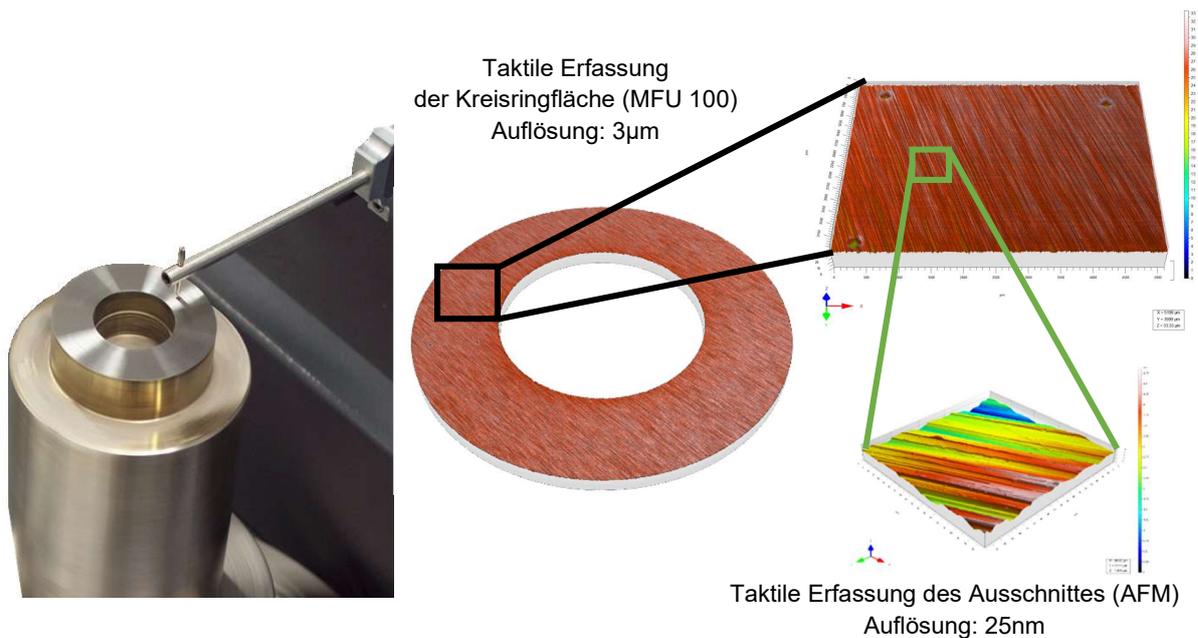


Bild 5-5 Erfassungsstrategie

## 5.4 Variation reibwertbeeinflussender Komponenten

### 5.4.1 Flächenpressung

Um die reibwertrelevanten Strukturen herauszustellen, wurden sogenannte Drückversuche mit unterschiedlichen Flächenpressungen statisch durchgeführt. Für die Untersuchungen wurde eine geometrisch einfach zu beschreibende Oberflächenstrukturierung gewählt. Durch das zuvor beschriebene Markierungssystem kann zu 100 % dieselbe Oberflächenstruktur vor und nach der Druckbeaufschlagung wiedergefunden werden. Dies ermöglicht eine sehr detaillierte und exakte Aussage, welche Strukturen sich um wie viel  $\mu\text{m}$  bei einer spezifischen Belastung plastisch deformiert haben. Des Weiteren sind Rückschlüsse auf die wirkende Kontaktfläche möglich. Beim Versuch werden die Oberflächen entfettet und wie in Kapitel 2.3.5 beschrieben in den Prüfstand eingebaut. Die Besonderheit der Versuche besteht darin, dass nur ein Beaufschlagen mit der Normalkraft, aber keine Verdrehung stattfindet, daher fehlen die tangentialen Schubspannungen. Nach einer Einwirkzeit von 5 Sekunden werden beide Probekörper wieder voneinander getrennt. In Bild 5-6 wird die Vorgehensweise zu den Drückversuchen dargestellt. Für die Auswahl der zu untersuchenden Oberflächenstrukturen eignen sich periodisch wiederkehrende Profile (Drehprofile) oder geometrisch einfach beschreibbare Strukturen.

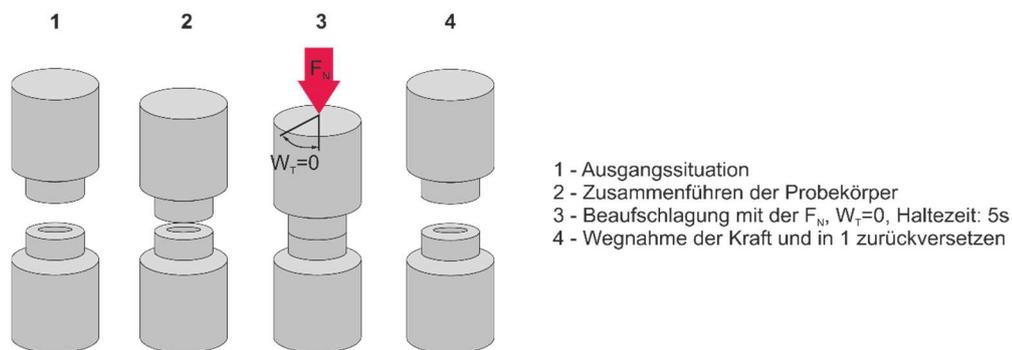


Bild 5-6 Versuchsmethodik zu den Drückversuchen

### 5.4.2 Einfluss des Verdrehwinkels

Der Verdrehwinkel ergibt sich aus dem aufgetragenen Moment zwischen dem Grundkörper und dem Gegenkörper. Dabei verändern sich in Folge wirkender Momente die Oberflächenstrukturen. Einen weitaus größeren Einfluss hat der Winkel jedoch bei der Berechnung des Haftreibwertes. Je nachdem bei welchem relativen Verdrehwinkel das wirkende Torsionsmoment abgelesen wird, ändert sich der daraus berechnete Haftreibwert (Bild 5-7). Um reibwertrelevante Strukturen beschreiben zu können, müssen die Oberflächen und deren gegenseitige Wirkung sowie Veränderung an dem Punkt untersucht werden, bei dem der Reibwert ermittelt wird.

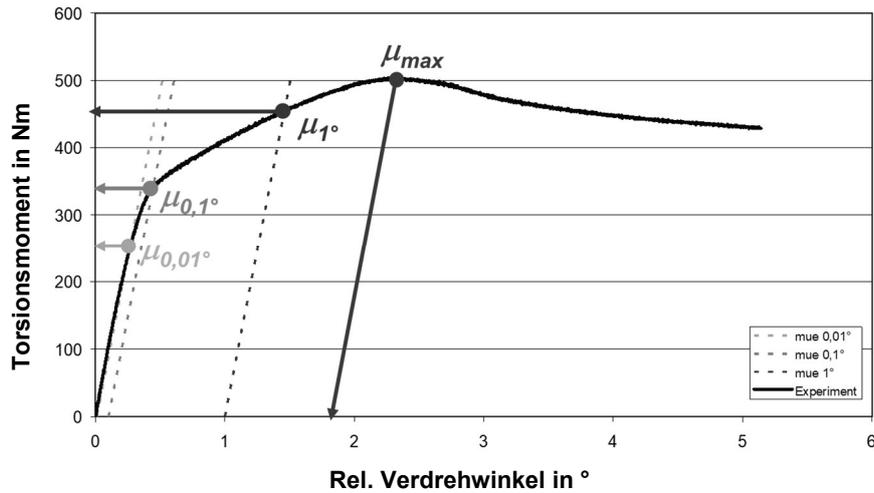


Bild 5-7 Musterdiagramm zur Ermittlung des Verdrehwinkel-abhängigen Haftreibwertes

### 5.4.3 Änderung des Grundmaterials

Die werkstofftechnischen Eigenschaften des Grundmaterials beeinflussen wesentlich den Reibwert. Um diesen Einfluss und dessen Intensität zu untersuchen, gilt es, verschiedene Werkstoffe dafür zu nutzen. Dabei sollen jedoch die Oberflächenstrukturierungen auf allen Werkstoffen gleich sein, um den Werkstoffeinfluss beurteilen zu können. Für die Untersuchungen werden ein Vergütungsstahl mit der Werkstoffnummer 1.7225 (42CrMo4+QT), eine Aluminium-Knetlegierung mit der Werkstoffnummer 3.2315 (EN AW-6082T6) und ein Grauguss mit Kugelgraphit mit der Werkstoffnummer EN-GJS-400 gewählt (Bild 5-8). Daraus ergibt sich eine Anpassung der Fertigungsparameter an den jeweiligen Werkstoff unter der Maßgabe, gleiche Oberflächen zu erzeugen.

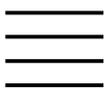
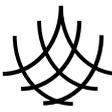


Bild 5-8 Werkstoffvariation der Probekörper

#### 5.4.4 Untersuchung verschiedener Oberflächenstrukturierungen

Für die Untersuchungen ist die Oberflächenstrukturierung ein entscheidender Aspekt. Daher sind eine gezielte Auswahl der Fertigungsverfahren und die Herstellung der Proben entscheidend für die Forschungsergebnisse. Unterschiedliche Oberflächenmaterialien sollen zunächst in die Betrachtungen einfließen. Aus diesem Grund sind die Fertigungsverfahren so zu wählen, dass sich auf unterschiedlichen Materialien vergleichbare Oberflächen herstellen lassen. Damit die Charakteristik eines Fertigungsverfahrens bzw. seiner Oberflächenstruktur eindeutig herausgestellt werden kann, ist die Anforderung durch differenzierte Prozesseigenschaften, die eine Unterscheidung zulassen, notwendig. Dabei bietet die Fertigung für Stahloberflächen vielfältige Möglichkeiten. Repräsentativ und auf Grundlage der entstehenden Strukturen wurde sich für die in Tabelle 5-1 aufgelisteten Verfahren inklusiver einer Prinzipskizze zu den erzielenden Oberflächentexturen entschieden. Des Weiteren wird eine Vorgabe getroffen, dass je Verfahren zwei Varianten, hier als grob und fein deklariert, zu fertigen sind. Im Anschluss soll eine geeignete Struktur auf weitere Materialien wie Gusseisen mit Kugelgraphit (EN-GJS-400) und eine Aluminiumknetlegierung (EN AW 6082T6) übertragen werden.

Tabelle 5-1: Oberflächentexturen

Fertigungsverfahren	Textur	Oberflächenstruktur
Drehen		Fein
		Grob
Schleifen		Fein
		Grob
Fräsen		Fein
		Grob

## 6 Geometrische Charakterisierung

### 6.1 Realisierung der geometrischen Oberflächencharakterisierung

Iterative Bewertungen mit unterschiedlichen Bewertungshöhen wiesen auf, dass für eine Oberflächenbewertung zur Unterscheidung der Oberflächengeometrien die Bewertungshöhe bei 20 % vom Materialtraganteil sich als repräsentativ erwiesen hat. Dies basiert auf der Überlegung, dass nur ein bestimmter Oberflächenanteil an der Haftreibungsfunktion beteiligt ist. Demnach ist der kleine Oberflächenanteil für eine generelle Charakterisierung und Unterscheidung relevant, siehe Bild 6-1. Für die Herstellung eines funktionalen Zusammenhangs ist die entsprechende Bewertungshöhe in Abhängigkeit von der Normalkraft (max. 159 kN) zu nutzen, so dass in Kombination mit werkstofftechnischen Kenngrößen die Verbindung zum Haftreibungswert erfolgen kann. Dies wird in Kapitel 8 näher ausgeführt.

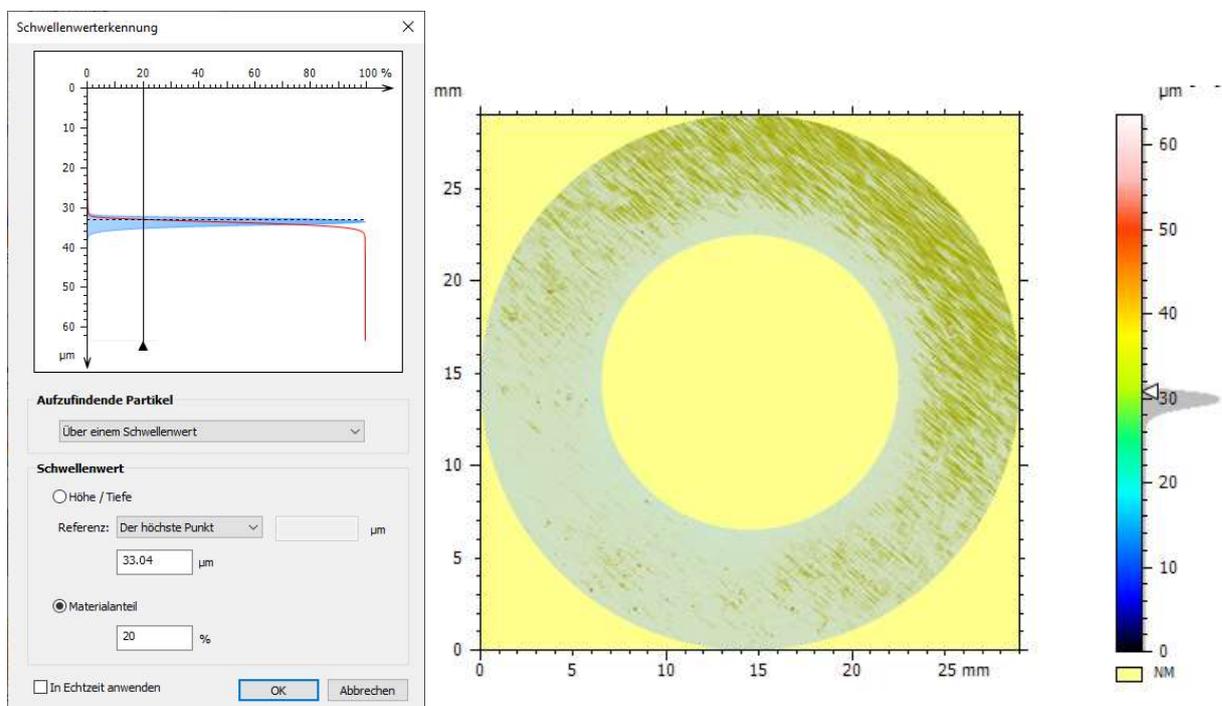


Bild 6-1 Schwellenwert bei 20 % des Materialanteils

Die ermittelte Bewertungshöhe  $c$  bei dem Materialanteil von 20 % wird dann vom höchsten Punkt der Oberfläche aus ins Material angetragen und per Partikelanalyse in Inseln/Partikeln sowie mit den Parametern der Durchschnittsoberfläche und Durchschnittsmaterialvolumen beschrieben. Basierend auf den errechneten Mittelwerten der charakterisierten Oberflächen können die verschiedenen Strukturen resp. Fertigungsverfahren anhand der vorangegangenen Parameter segmentiert werden.

Die Inselanzahl unterscheidet die verschiedenen mechanischen Bearbeitungsverfahren, wobei ebenfalls die Durchschnittsoberfläche dazu dienen kann (Bild 6-2). Anhand des Durchschnittsmaterialvolumens lassen sich die Oberflächen in grob- und feinstrukturiert unterteilen (Bild 6-2). Die geometrischen Parameter wurden für alle unterschiedlichen Oberflächen ermittelt. Die Ergebnisse werden auf ihre Korrelation zum Haftreibwert und ihre Sensitivität hinsichtlich sich verändernder Einflüsse in Kapitel 7 analysiert.

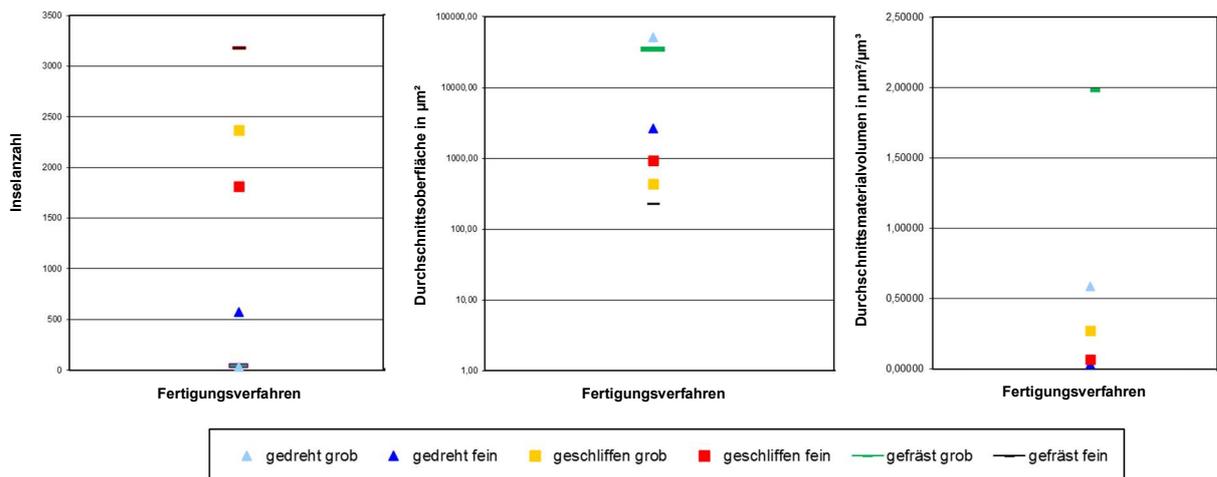


Bild 6-2 Geometrische Charakterisierung bei einem Oberflächenausschnitt von 3 mm x 3 mm

## 6.2 Unsicherheitsbetrachtung für den Prozess der geometrischen Charakterisierung

Zur Entwicklung funktionaler Zusammenhänge ist neben der Unsicherheitsbetrachtung des Funktionswertes, hier der Haftreibungswert, auch die Unsicherheit in der geometrischen Charakterisierung von Bedeutung. Zur Herleitung funktionsorientierter, oberflächenbeschreibender Parameter ist die Ursache-Wirkungsmethode (ISHIKAWA-Diagramm) für die Unsicherheitsbestimmung relevant (Bild 6-3).

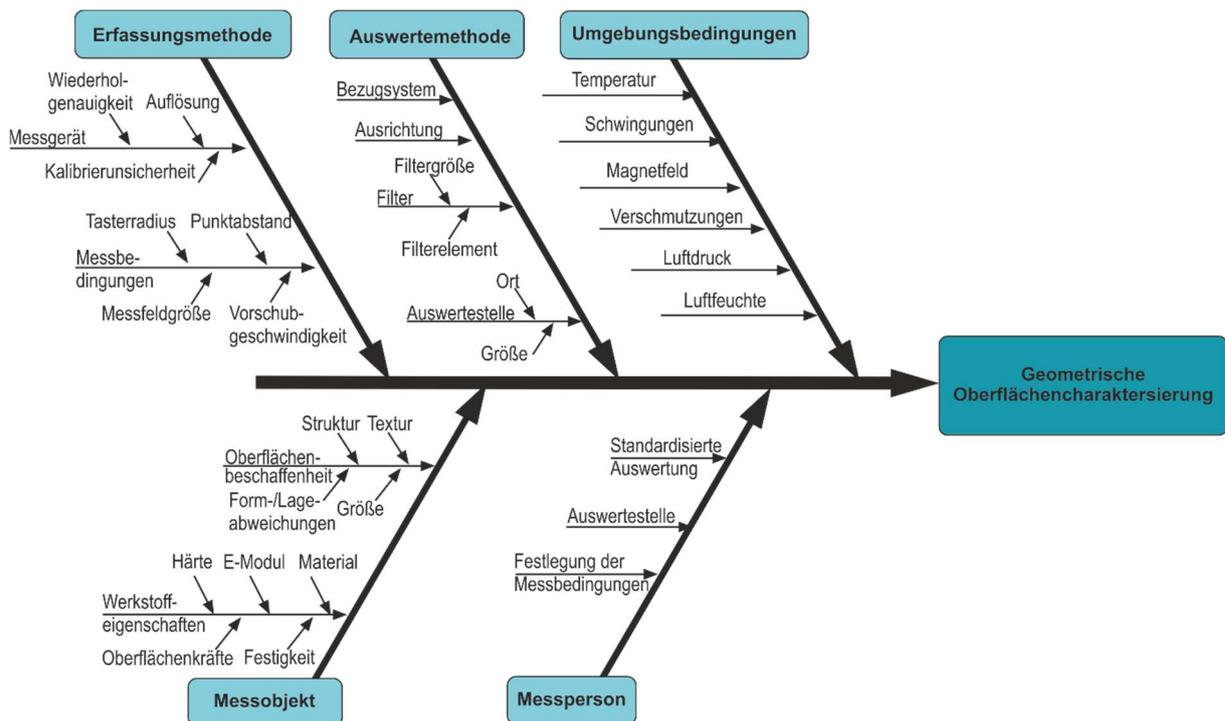


Bild 6-3 Ursache-Wirkungs-Diagramm des Charakterisierungsprozesses

Einflussgrößen der Umgebungsbedingungen können durch die Erfassung in einem vollklimatisierten, temperaturstabilen und schwingungsgedämpften Messraum der Klasse A (lt. VDI 2627) komplett eliminiert werden. Durch eine standardisierte Vorgehensweise sowie die vordefinierten Messbedingungen für die Messung selbst finden die Prüferinflüsse ebenfalls keine Beachtung. Daraus ergibt sich die Abhängigkeit der Parameter von den drei Faktoren des Messobjektes, der Erfassungsmethode und der Auswertemethode. Die wesentlichen Einflussfaktoren werden in einem reduzierten Ursache-Wirkungs-Diagramm in Anlage 19 gezeigt. Zudem basiert die Reihenfolge der Tabelle 6.1 auf einem paarweisen Vergleich (Anlage 10). Schlussfolgernd lassen sich der Werkstoff, die Oberfläche, das Messgerät und die Auswertestelle als vier Effekte gruppieren.

Tabelle 6-1: Ergebnis des paarweisen Vergleichs (geometrische Charakterisierung)

Zielgröße	Summe	Rang	Abkürzung
Werkstoff	13	2	Wkst
Form und Lageabweichungen OF	15	1	OF <sub>FL</sub>
Struktur der Oberfläche	11	5	OF <sub>Str</sub>
Richtung der Oberfläche	12	3	OF <sub>R</sub>
Tasterradius	3	10	R <sub>T</sub>
Punktabstand	8	6	a <sub>P</sub>
Wiederholgenauigkeit des Messgerätes	4	9	R <sub>Mg</sub>
Auflösung des Messgerätes	7	7	R <sub>A</sub>
Kalibrierunsicherheit des Messgerätes	5	8	U <sub>cal Mg</sub>
Ort der Auswertestelle	12	3	Awst

Die Herleitung des Unsicherheitsbilanz für die geometrische Bestimmung erfolgt ebenfalls anhand der quadratischen Unsicherheitsfortpflanzung nach Gauß (Formel 2-11) sowie der bereits in Kapitel 4.3 verwendeten Vorgehensweise.

Hauptkomponente	
Einflussgrößen:	$\delta Wkst$ Schwankungen durch den Werkstoff $\delta OF$ Oberflächenschwankungen $\delta MG$ Abweichungen des Messgerätes $\delta MG_{cal}$ Kalibrierunsicherheit des Messgerätes $\delta Awst$ Abweichungen durch die Auswertestelle
Modellgleichung:	$K_{geom} = K_{geom} - \delta Wkst - \delta OF - \delta MG - \delta MG_{cal} - \delta Awst$ (6-1)
Annahmen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unkorrelierte Eingangsgrößen</li> <li>• Additives Modell</li> </ul>
Bilanzgleichung:	
$u_{K_{geom}} = \sqrt{\left(\frac{u(Wkst)}{3}\right)^2 + \left(\frac{u(OF)}{3}\right)^2 + \left(\frac{u(MG)}{3}\right)^2 + (u_{(MG_{cal})})^2 + \left(\frac{u(Awst)}{3}\right)^2}$ (6-2)	

---

Unter Beachtung des quadratischen Abweichungsfortpflanzungsgesetzes nach Gauß werden Unterpunkte, wie Oberflächenstrukturen, in den Teilbilanz berücksichtigt (Anlage 11). Dabei ergibt sich auf Grundlage eines Vertrauensniveaus von 95 % und des Erweiterungsfaktors von 2 die kombinierte Standardunsicherheit von:

$$U_{0,95} = 2 * u_{K\ geom} = 2 * 0,00867681 = 0,01735363mm \quad (6-3)$$

für den Prozess der geometrischen Charakterisierung anhand der Kenngröße der Durchschnittsoberfläche. Dabei ist aufgefallen, dass die größten Unsicherheitsbeiträge durch die Streuung der Parameter auf der Oberfläche selbst resultieren. Für eine wissenschaftliche Erörterung der Messunsicherheit der geometrischen Größen ist eine explizite Aufstellung zwar richtig, jedoch wird für jede der geometrischen Kenngrößen die Angabe des Streubereiches aus der Standardabweichung auf Basis der Statistikserie erfolgen.

## 7 Statistische Analysen haftreibwertrelevanter und geometrischer Parameter

Grundlegend für die geometrischen Betrachtungen sind die Annahmen aus Kapitel 4.2 und die berechnete Messunsicherheit. Die Streuung des Messprozesses (Haftreibwertprüfung)  $\sigma_{\text{Messsystem}}$  soll von der beobachteten Streuung  $\sigma_{\text{beobachtete}}$  abgezogen werden, damit die restliche Streuung - tatsächliche Streuung  $\sigma_{\text{tatsächlich}}$  - den Prozessgrößen (Oberflächenstruktur, Material, Form, Lage, etc.) zugeordnet werden kann.

$$\sigma_{\text{tatsächlich}}^2 = \sigma_{\text{beobachtete}}^2 - \sigma_{\text{Messsystem}}^2 \quad (7-1)$$

$$\sigma_{\text{tatsächlich}} = \sqrt{\sigma_{\text{beobachtete}}^2 - \sigma_{\text{Messsystem}}^2} \quad (7-2)$$

Die Standardabweichung des Messsystems ist  $u_{\mu,0,1}$  aus Kapitel 4.3. Aus den gesamten Reibwertprüfungen für Stahloberflächen wurde eine  $\sigma_{\text{beobachtet}}$  von 0,05779 ermittelt. Daraus ergibt sich eine tatsächliche Standardabweichung  $\sigma_{\text{tatsächlich}}$  von 0,05772.

### 7.1 Test auf Normalverteilung

Der Shapiro-Wilk-Test  $\hat{W}$  ist ein Signifikanztest, ob die Grundgesamtheit, aus der eine Stichprobe gezogen wird, normalverteilt ist. Dieser eignet sich besonders bei kleinen Stichprobenumfängen bis zu 50 Messwerten. Dabei werden Verteilungen des Quotienten aus zwei  $\delta^2$ -Schätzungen betrachtet. Zum einen ist es das Quadrat der kleinsten Fehlerquadratschätzung für die Steigung einer Regressionsgeraden und zum anderen die Stichprobenvarianz. Wenn eine Normalverteilung der Stichprobenwerte vorliegt, sollte das Verhältnis  $\hat{W}$  rund 1 ergeben. Damit wird die Normalverteilung unterstellt. Zusätzlich werden die p-Werte ermittelt. Kleine Werte  $p < 0,05$  sind signifikant für eine Verteilung abweichend von der Normalverteilung. [sac\_09, gra\_87]

$$\hat{W} = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7-3) \text{ lt. [sac_09]}$$

Eine Erläuterung dieses Tests erfolgt am gemessenen Wert des Torsionsmoments  $T_{R0,1}$ . Anhand der für  $\hat{W}$  zugrunde gelegten Formel (7-3) ergibt sich für die 25 Messungen der Messserie A13 „Statistikserie“ (Stahloberflächen – fein gedreht) ein  $\hat{W}$ -Wert von 0,871. Dieser ist annähernd 1 und somit ist die Normalverteilung zu unterstellen. Vergleichend dazu wurde mit der Minitab Software Version 20 ein Test auf Normalverteilung durchgeführt. Grundlage der Berechnung ist der trennschärfste Statistiktest nach Anderson-Darling. Im Bild 7-1 sind das Wahrscheinlichkeitsnetz und dessen Ergebnisse als Auszug aus Minitab zu sehen.

Die Nullhypothese nimmt an, dass die Häufigkeitsverteilung der Daten einer Normalverteilung unterliegt. Bei einem ermittelten p-Wert kleiner als 0,05 gilt es als signifikante Abweichung, die Nullhypothese wird abgelehnt und es liegen nicht normalverteilte Daten vor. Der p-Wert für das Torsionsmoment von 0,888 bedeutet, dass die Nullhypothese nicht widerlegt werden kann und dass für weitere Analysen die Normalverteilung unterstellt wird.

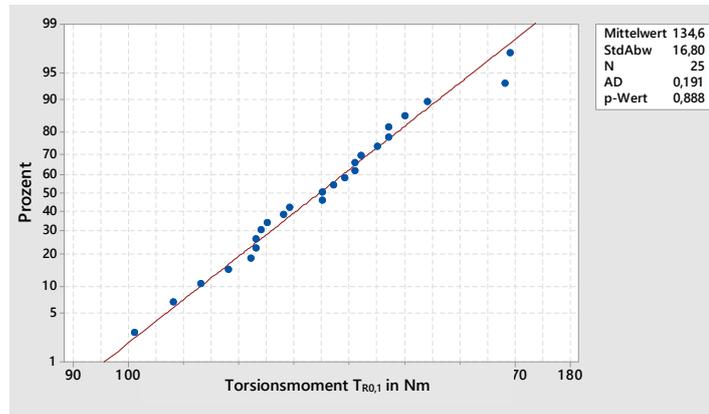


Bild 7-1 Wahrscheinlichkeitsnetz des Torsionsmoments  $T_{R0,1}$

Für die während der Haftreibwertprüfung gemessenen Größen sowie die geometrischen Parameter erfolgten ebenfalls ein Test auf Normalverteilung auf Grundlage von Anderson-Darling und die Einschätzung über die Annahme der Normalverteilung (Anlage 13). Es zeigt sich, dass bei vier Merkmalen die Normalverteilung für weitere Betrachtungen zugrunde gelegt werden kann. Die verbleibenden Parameter wurden mithilfe von qs-STAT sowie Minitab auf ihre Verteilungsform untersucht. Eine Vielzahl an Merkmalen basiert auf einer logarithmischen Normalverteilung. Begründbar ist dies durch die einseitige natürliche Begrenzung bei null, wie zum Beispiel bei Form- und Lageabweichungen. Die Standard-Rauheitsparameter unterliegen der Betragsverteilung 1. Art. Die Berechnungsgrundlage der weiteren statistischen Analysen bezieht sich auf eine Normalverteilung. Daher erfolgt für nicht normalverteilte Merkmale eine Anpassung der Messwertreihen mithilfe einer Transformation. Somit werden die Messdaten nicht verzerrt und keine falschen Rückschlüsse auf mögliche Zusammenhänge gezogen.

## 7.2 Statistische Ausreißertests

Zur mathematisch eindeutigen und objektiven Beurteilung von Ausreißern existiert eine Vielzahl an Ausreißertests, zum Beispiel nach Grubbs, Hampel, auf Basis der Stichprobenwölbung oder auch nach Dixon. Für die zu untersuchenden Kenngrößen liegt die Annahme der meisten Ausreißertests auf einer Normalverteilung. Der Test auf Normalverteilung (Kapitel 7.1) zeigt, dass der Ausreißertest nach Grubbs für den Haftreibwert  $\mu_{0,1}$ , das Torsionsmoment  $T_{R0,1}$ , für die Inselanzahl  $n$  und die resultierende Gesamtfläche  $A_{Ges}$  anzuwenden ist. Für die Prüfung der Nullhypothese, dass die gesamten Daten aus derselben normalverteilten Grundgesamtheit stammen, wird ein Signifikanzniveau mit höherer Trennschärfe von  $\alpha = 0,01$  festgelegt. Mit einem p-Wert von 0,612 wird die Nullhypothese für die Durchschnittsoberfläche (Transformierte Daten) nicht verworfen. Daraus kann laut Test gefolgert werden, dass keine Ausreißer enthalten sind. Bei der Alternativhypothese wird unterstellt, dass der Größt- und/oder Kleinstwert der Stichprobe Ausreißer sind. Die Schwierigkeit bzw. die Begrenztheit des Grubbs-Tests auf normalverteilte Messreihen zeigt sich in Bild 7-2. Aus dem Diagramm der Testergebnisse könnte hingegen geschlossen werden, dass die vier Werte größer als  $12.500 \mu\text{m}^2$  als Ausreißer zu deuten sind.

Variable	N	Mittelwert	StdAbw	Min	Max	G	p
Aon	25	7415	3621	3887	15212	2,15	0,612

\* HINWEIS \* Keine Ausreißer auf dem Signifikanzniveau 1 %

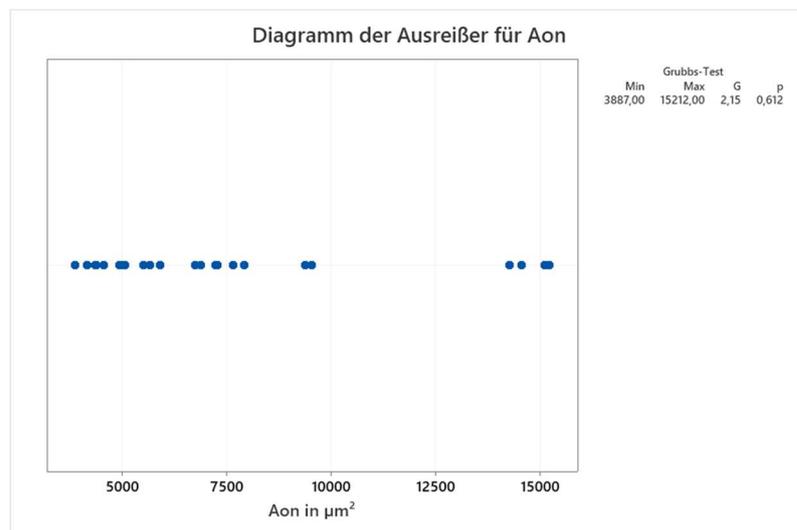


Bild 7-2 Grubbs-Test für die projizierte Durchschnittsoberfläche einer Insel (Aon)

Der Grubbs-Test bezogen auf transformierte Daten ergibt ebenfalls keine anders gartete Ausreißer-Identifizierung als auf nicht transformierte Daten (Anlage 14). Insgesamt zeigen die Tests, dass die Messwerte einer normalen Streuung unterliegen und keine Ausreißer, wie grafisch vermutet, enthalten sind. Für die nicht normalverteilten Größen stehen daher ein Ausreißertest nach Walsh, ein t-Test oder die grafischen Analysen anhand des Matrixplots, des Boxplots oder des Streudiagramms zur Verfügung. Aufgrund des Stichprobenumfangs von 25 fällt der Test nach Walsh heraus. Der Boxplot zeigt den aus dem Stichprobenumfang ermittelten Median sowie den Interquartilsbereich für die mittleren 50 % der Daten. Die sogenannten Whisker repräsentieren den oberen sowie unteren Bereich der Werte mit je 25 % ausschließlich der Ausreißer (Werte  $> 12.500 \mu\text{m}^2$ ). Es werden Datenpunkte als Ausreißer identifiziert, die außerhalb der Whisker liegen. Dabei werden die verschiedenen Verteilungsformen, wie die festgestellte logarithmische Normalverteilung der projizierten Durchschnittsoberfläche (Aon), missachtet, siehe Bild 7-3. Besonders bei Daten mit einer gewissen Schiefe eignet sich die Untersuchung der Lage und Streubreite der Verteilung anhand einer Kombination aus grafischer Analyse und der eigenen Einschätzung als Ausreißer. Für eine umfassende und fundierte Aussage müssten Versuchsreihen mit größerem Probenumfang angelegt werden. Entgegen dem Ergebnis aus dem Grubb-Test werden für die weiteren Analysen die vier Werte oberhalb von  $12.500 \mu\text{m}^2$  als Ausreißer deklariert. Für weiterführende Korrelations- und Regressionsanalysen sowie für die iterative Implementierung in die Haftreibwertformeln werden die Werte ohne die Ausreißer zugrunde gelegt.

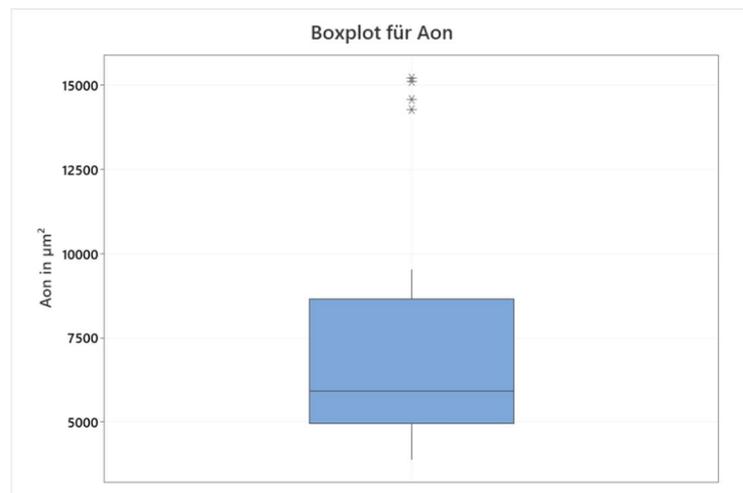


Bild 7-3 Boxplot der projizierten Durchschnittsoberfläche einer Insel (Aon)

### 7.3 Korrelationsanalysen

Die Korrelationsanalyse untersucht die Messgrößen auf ihren wechselseitigen Zusammenhang. Anhand des Korrelationskoeffizienten  $r$  und des  $p$ -Wertes, der mit dem Signifikanzniveau  $\alpha$  verglichen wird, erfolgt die Einschätzung über eine mögliche Korrelation. Grundlage der Korrelationsanalyse sind normalverteilte Messwertreihen. Eine adäquate Transformation nicht normalverteilter Daten bietet die Johnson-Transformation auf Basis des Johnson-Verteilungssystems. Aus drei Verteilungsfamilien (Tabelle 7-1) wird die optimale Verteilung ausgewählt, wobei die Parameter geschätzt werden (Chou-Methode). Die transformierten Messdaten können mittels Anderson-Darling-Methode sowie der  $p$ -Werte berechnet werden. Der größte  $p$ -Wert ist entscheidend für die Transformationsfunktion.

Tabelle 7-1: Algorithmus der Johnson-Transformation [min\_20]

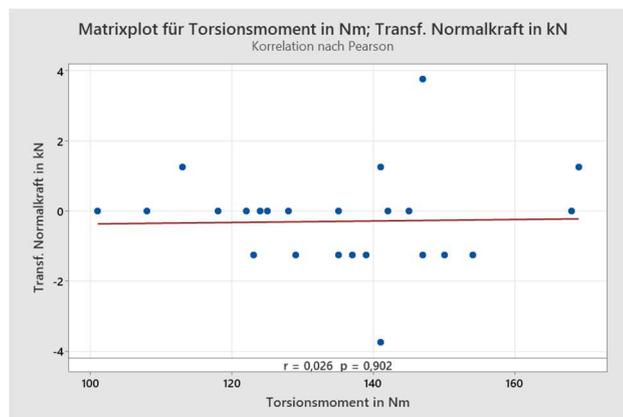
Johnson-Familie	Transformationsfunktion	Spannweite
$S_B$ mit begrenzter Variable (B)	$\gamma + \eta \ln \left( \frac{x - \varepsilon}{\lambda + \varepsilon - x} \right)$	$\eta, \lambda > 0,$ $-\infty < \gamma < \infty,$ $-\infty < \varepsilon < \infty,$ $\varepsilon < x < \varepsilon + \lambda$
$S_L$ mit lognormaler Variable (L)	$\gamma + \eta \ln (x - \varepsilon)$	$\eta > 0,$ $-\infty < \gamma < \infty,$ $-\infty < \varepsilon < \infty,$ $\varepsilon < x$
$S_U$ mit unbegrenzter Variable (B)	$\gamma + \eta \sinh^{-1} \left( \frac{x - \varepsilon}{\lambda} \right)$ wobei $\sinh^{-1}(x) = \ln [x + \sqrt{(1 + x^2)}]$	$\eta, \lambda > 0,$ $-\infty < \gamma < \infty,$ $-\infty < \varepsilon < \infty,$ $-\infty < x < \infty$

Bei der Auswertung aller zur Verfügung stehenden Daten zeigten sich kleinere Auffälligkeiten bei denjenigen des Prüfstandes, die es zu untersuchen gilt. Neben den geometrischen und stofflichen Einflussgrößen werden daher die Variationen der einzustellenden Prüfbedingungen hinsichtlich ihrer Reibwertrelevanz analysiert.

### 7.3.1 Einflüsse der Prüfbedingungen auf das Torsionsmoment

#### 7.3.1.1 Normalkraftschwankung

Der Einfluss der Normalkraft auf das Torsionsmoment und den sich daraus errechnenden Haftreibwert zeigt anhand eines einfachen X-Y-Plots keinen signifikanten wechselseitigen Zusammenhang. Bestärkt wird dies durch die Korrelationsanalyse auf Basis des Pearson-Korrelationskoeffizienten. Der Korrelationskoeffizient  $r$  beträgt 0,026 und der p-Wert 0,902. Auch zeigt die Regressionsgerade keinen signifikanten Anstieg. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine lineare Beziehung zwischen der Normalkraftschwankung und der sich ergebenden Torsionsmomentschwankung sowie den resultierenden Haftreibwerten existiert (Bild 7-4).



#### Methode

Korrelationstyp                      Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen      25

#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korre- lation	95%-KI für p	p- Wert
Transf. Normalkraft in kN	Torsions- moment in Nm	25	0,026	(-0,373; 0,417)	0,902

#### Korrelationen

	Torsionsmoment in Nm
Transf. Normalkraft in kN	$r = 0,026$

Bild 7-4            Korrelationsanalyse der transformierten Normalkraft mit dem Torsionsmoment

Die unterschiedlichen Normalkräfte (15,9 kN; 53,0 kN; 159,0 kN), welche bei den verschiedenen Experimenten genutzt wurden, wirken sich nicht direkt auf den Haftreibwert aus. Die Ursache ist, dass der Haftreibwert eine bezogene Größe ist, die sowohl die Normalkraft als auch das Torsionsmoment (Rutschmoment) bei  $0,1^\circ$  relativer Verdrehung beinhaltet. Steigt nun die Normalkraft und damit die Flächenpressung, steigt auch das daraus resultierende Torsionsmoment. Da das Torsionsmoment und die Normalkraft gleichzeitig steigen, erhöhen sich somit Zähler und Nenner laut Berechnungsformel 2-28, sie haben keine bis geringe Auswirkungen auf den Haftreibwert. Theoretisch ist der Haftreibwert von diesen beiden sich verändernden Faktoren abhängig. Ein Zusammenhang, der sich ergeben sollte, ist nicht nachweisbar.

Die oben genannte Berechnungsformel beinhaltet weiterhin den mittleren Reibdurchmesser als konstante Größe. Dieser könnte die Erklärung für den fehlenden Zusammenhang liefern. Eine Betrachtung der tatsächlich wirkenden Oberflächengeometrie, die sich infolge der wirkenden Kräfte verändert, würde eine Anpassung der Berechnungsformel ermöglichen und einen Zusammenhang herstellen.

### 7.3.1.2 Umgebungstemperatur

Anhand der Messdaten konnte identifiziert werden, dass die Proben für die Messreihe A13 („Statistikserie“) an zwei unterschiedlichen Tagen mit unterschiedlichen klimatischen Voraussetzungen reibwertgeprüft wurden. Aufgespalten in zwei Gruppen und einzeln analysiert, zeigt sich anhand eines X-Y-Plots (Matrixplot) eine zunächst signifikante Abhängigkeit der Messreihe 1. Der p-Wert für die paarweise Korrelation des Torsionsmomentes zur Temperatur beträgt 0,002. Er ist somit kleiner als  $\alpha=0,05$  und damit signifikant. Der dazugehörige Korrelationskoeffizient  $r$  nach Pearson beträgt 0,746 bei einem durchweg positiven Konfidenzintervall, siehe Anlage 15. Laut Diagramm (Bild 7-5) zeigt sich anhand der Regressionsgerade, dass eine Temperaturerhöhung um  $1^\circ\text{K}$  ein Ansteigen des Torsionsmomentes um 15,6 Nm bedingt. Diese Datenbasis würde für eine Korrelation beider Parameter zueinander sprechen.

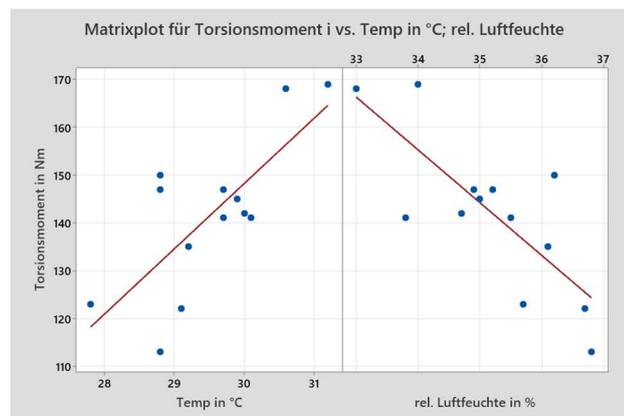


Bild 7-5 Matrixplot: Torsionsmoment  $T_{R0,1}$  - Temperatur - rel. Luftfeuchte (Messreihe 1)

Bei einem niedrig legierten Stahl (1.7225 oder 42CrMo4+QT), der seine stofflichen Eigenschaften, wie Längenausdehnungskoeffizient, E-Modul etc., ab einer Temperaturdifferenz von 30 K geringfügig verändert, kann eine Temperaturschwankung von 4 K nicht einen so bedeutenden Einfluss auf das Torsionsmoment haben. Ein Grund für Temperaturanstieg, Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit und einen Torsionsmomentanstieg kann das Verwenden von entsprechend sensitiven Sensoren sein. Bei der Messung des Torsionsmomentes kommen Dehnungsmessstreifen zum Einsatz. Diese sind in einem hohen Maße sowohl äußerst temperatur- als auch luftfeuchtigkeitssensibel.

Nur eine Wheatstonesche Vollbrückenschaltung mit entsprechender Kalibrierung kann diesen Einfluss kompensieren. Infolge einer gleich großen Widerstandsänderung in allen Brücken-  
zweigen zeigen sich an der Ausgangsspannung  $U_s$  keine Auswirkungen (Bild 7-6). Somit können  
Störeinflüsse auf die gesamte Schaltung hervorragend ausgeglichen werden. Für die  
Messung des Torsionsmomentes wurden temperatur- und biegunskompensierende Deh-  
nungsmessstreifen in Form der gezeigten Wheatstoneschen Brückenschaltung verwendet.

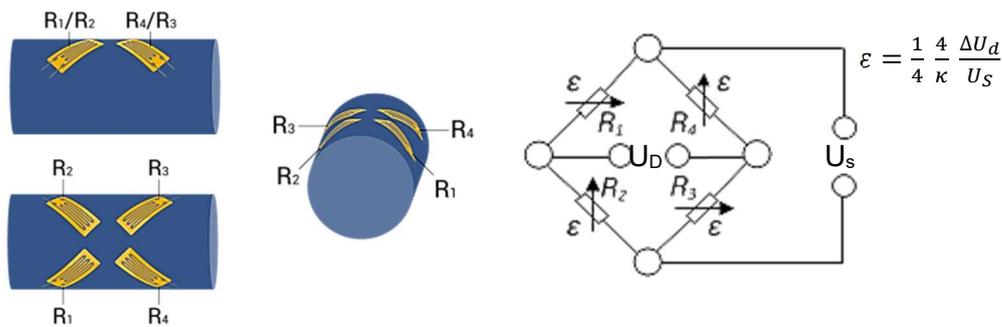
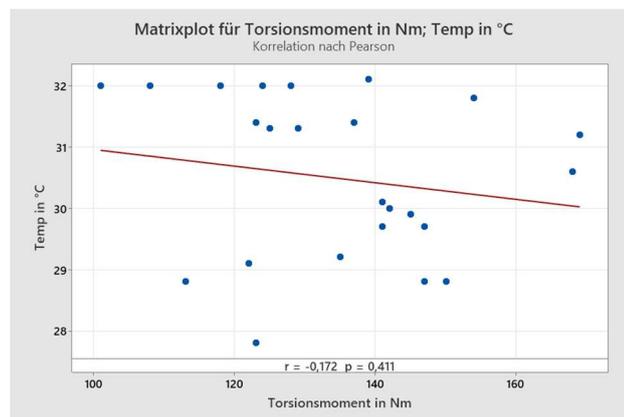


Bild 7-6 Wheatstonesche Brückenschaltung bei einer Torsionsmessung [hbm\_20]

Folglich kann der Einfluss der Temperatur auf die Messung negiert und die Korrelation als  
zufällig angesehen werden. Affirmiert wird dies ebenfalls durch die Untersuchung der zweiten  
Messreihe. Dabei ist keine entscheidende Signifikanz eines Zusammenhangs zwischen Tem-  
peratur und Torsionsmoment zu erkennen. Unter dem Aspekt, alle Messwerte der kompletten  
Serienmessreihe gemeinsam zu betrachten, zeigt sich, dass die Werte teilweise sehr stark  
streu und eine Abhängigkeit sehr gering und eher zufällig ist (Bild 7-7).



**Methode**

Korrelationstyp  
Anzahl der verwendeten Zeilen

Pearson  
25

**Paarweise Korrelationen nach Pearson**

**Korrelationen**

	Temp in °C
Torsionsmoment in Nm	r = -0,172

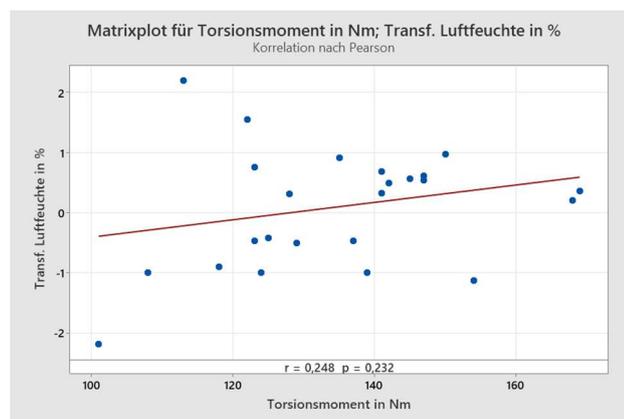
Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrela- tion	95%-KI für p	p- Wert
Torsionsmo- ment in Nm	Temp in °C	25	-0,172	(-0,531; 0,240)	0,411

Bild 7-7 Korrelationsanalyse der gesamten Messreihe: Temperatur zu Torsionsmoment

Der Korrelationswert nach Pearson beträgt für die gesamte Messreihe  $r = -0,172$ . Dabei wird deutlich, dass bei einer Einzelbetrachtung der Messreihe 1 aus einer stark positiven ( $r = 0,746$ ) eine schwach negativ latente Abhängigkeit ( $r = -0,172$ ) bei einer gesamtheitlichen Betrachtung beider Messreihen resultiert. Zudem weist die gesamtheitliche Betrachtung einen Wechsel des Konfidenzintervalls und einen p-Wert größer  $\alpha$  auf. Zur Bekräftigung dieser Feststellung zeigen weitere Untersuchungen der Reibwertprüfungen mit ähnlichen klimatischen Voraussetzungen keine Korrelation zwischen der Temperatur und dem resultierenden Torsionsmoment.

### 7.3.1.3 Relative Luftfeuchte

In der Beurteilung der Korrelation zwischen Torsionsmoment und der transformierten relativen Luftfeuchte zeigt sich mithilfe des X-Y-Plots und des Pearsonwertes ein geringer positiver Zusammenhang (Bild 7-8). Theoretisch würde dies bedeuten, dass bei einer Zunahme der Luftfeuchtigkeit das Torsionsmoment steigt. Aber hier sind diese Aussagen nicht valide und zu hinterfragen, da nur 25 Werte vorliegen und diese stark streuen. Weiterhin widerspricht es der Überlegung, dass bei steigender relativer Luftfeuchte und sinkenden Temperaturen das Wasser kondensiert. Kondensat auf den technischen Oberflächen würde eine Reibungsminimierung und bei längeren Zeiträumen eine Korrosion bedingen. Daher kann der Zusammenhang unter Berücksichtigung des Konfidenzintervallwechsels als zufallsbedingt und irrelevant erachtet werden.



#### Methode

Korrelationstyp	Pearson
Anzahl der verwendeten Zeilen	25

#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korre- lation	95%-KI für p	p- Wert
Transf. Luftfeuchte	Torsionsmoment in Nm	25	0,248	(-0,163; 0,586)	0,232

#### Korrelationen

	Torsionsmoment in Nm
Transf. Luftfeuchte in %	$r = 0,248$

Bild 7-8 Korrelationsanalyse: transformierte relative Luftfeuchte – Torsionsmoment

## 7.3.2 Einflüsse der Geometrie

### 7.3.2.1 Form- und Lageabweichungen

Die makrogeometrischen Abweichungen der Testkörper haben neben den mikrogeometrischen Oberflächenstrukturen eine entscheidende Funktionsrelevanz. Eine Gegenüberstellung der Ebenheitsabweichung in Verbindung zum Haftreibwert zeigt bereits, dass für die Funktion zwar gleiche Ausgangsbedingungen vorliegen (Bild 7-9), jedoch weitere Faktoren, z. B. Rechtwinkligkeitsabweichung, hinzukommen. Durch die wirkenden Kräfte sowie die Geometrie des Gegenkörpers verändern sich je nach Zusammenwirken die Geometrien des Prüfkörpers. Dies wird bei dem Vergleich der Ebenheitsabweichung vor und nach der Reibwertprüfung deutlich. Nicht nur Ebenheitsabweichungen, sondern auch Rechtwinkligkeitsabweichungen und Konzentritäten, welche die verfügbare Kontaktfläche mindern, werden auf die Reibwertrelevanz mithilfe statistischer Methoden untersucht.

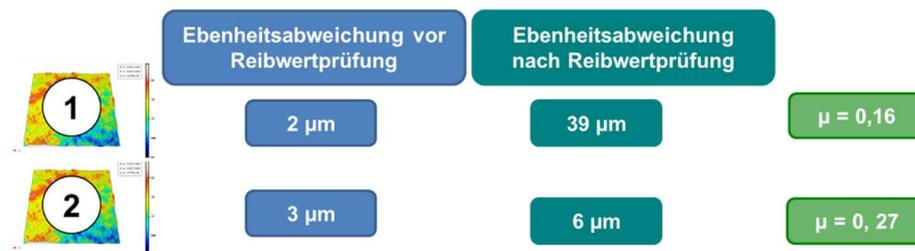


Bild 7-9 Ebenheitsabweichungen fein gedrehter Stahlproben inklusive Haftreibwert

### Ebenheitsabweichung

Die Formabweichung der konzentrischen Stirnfläche als Ebenheitsabweichung hat aus rein theoretischer Betrachtung einen relevanten Einfluss auf die Ausbildung der Kontaktfläche zwischen den beiden Probekörpern. Die Größe der Kontaktfläche könnte dabei entscheidend für die Höhe des Haftreibwertes sein. Folgende Erscheinungen hinsichtlich der Ebenheitsabweichung dienen als Hypothese zur Einflussbewertung. Rein statistisch gesehen könnten 15 mögliche Paarungskombinationen der beiden Probekörper mit je unterschiedlichen Ebenheitsabweichungen entstehen. Beispielhaft sind in Bild 7-10 fünf mögliche stereotypische Ebenheitsabweichungen aufgezeigt, die durch die Fertigung entstehen können. Dabei sind sie mit einer idealen Gegenfläche gepaart. Die verschieden ausgeprägten Oberflächen infolge von unterschiedlichen Ebenheitsabweichungen bedingen eine Verringerung der Kontaktfläche, so dass eine höhere Flächenspannung auftritt. Bis zur zulässigen Spannung kann der Haftreibwert ansteigen, aber bei Überschreiten der lokalen Spannungen darüber tritt plastisches Fließen (Bauteilversagen) ein und der Reibwert minimiert sich.

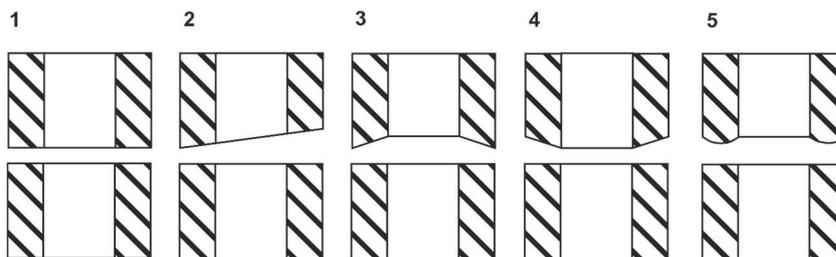
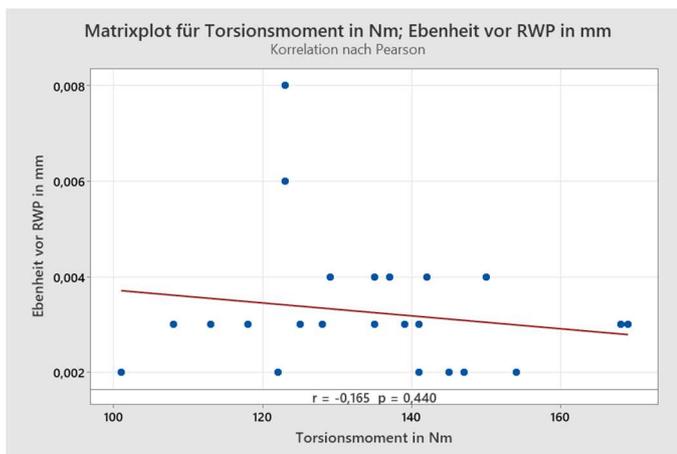


Bild 7-10 Variationsmöglichkeiten theoretischer Ebenheitsabweichungen bei gleichbleibenden, ebenen Gegenkörpern

Sowohl der Matrixplot als auch die dazugehörigen Korrelationswerte (p-Wert: -0,440, r-Wert: -0,165) weisen auf einen Zusammenhang hin (Bild 7-11). Höhere Ebenheitsabweichungen bedingen eine Abnahme des Torsionsmomentes, der daraus berechnete Haftreibwert sinkt. Eine ideale Fläche ohne Ebenheitsabweichungen würde daher theoretisch unter alleiniger Betrachtung der Ebenheit das größtmögliche Torsionsmoment und einen hohen Haftreibwert erzielen. Weiterhin zeigt sich eine Streuung und, bedingt durch die gröbere Auflösung, eine Diskretisierung der Ebenheitsabweichungen. Die Ursachen eines geringen Torsionsmomentes bei vorliegender geringer Ebenheitsabweichung können in der Streuung der Oberflächenstruktur oder/und der Ebenheitsabweichung des Gegenkörpers liegen.



**Methode**

Korrelationstyp Pearson  
 Anzahl der verwendeten Zeilen 24

**Paarweise Korrelationen nach Pearson**

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für p	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Ebenheit v in mm	24	-0,165	(-0,533; 0,255)	0,440

**Korrelationen**

	Torsionsmoment in Nm
Ebenheit v in mm	r = -0,165

Bild 7-11 Korrelationsanalyse: Ebenheit vor RWP – Torsionsmoment

Weiterhin lässt sich festhalten, dass die Ebenheitsabweichungen nur den maximalen Wert zweier angelegter Ebenen unter der Tschebbycheff-Approximation an die Abweichungen wiedergeben. Eine Aussage über die Ausprägung oder Art der Ebenheitsabweichung wie in Bild 7-10 ist nicht möglich. Daher wurden in Anlehnung an diese fünf Ebenheitsvariationen die Probekörper daraufhin analysiert und klassifiziert. Die Korrelationsanalyse zur Ebenheitsform (Anlage 16) mit einem P-Wert von 0,188, einem r-Wert von 0,272 mit wechselndem Konfidenzintervall spiegelt die Vermutung einer Abhängigkeit zunächst nicht wider. Dies liegt natürlicherweise an der Eingruppierung auf Basis einer Ordinalskala (Rangskala) und nicht auf tatsächlichen metrischen Werten. Anhand eines 3D-Streudiagrammes (Bild 7-12) zeigt sich, dass die Form resp. die Ausprägung der Ebenheit eine entscheidende Rolle für die Kontaktgeometrie und somit auf das Funktionsverhalten (Haftreibwert) hat. In dem Streudiagramm lassen sich entsprechende Kategorien erkennen. Probekörper mit einer Form 3 (konkav) sowie 1 (eben) erzielen tendenziell ein höheres Torsionsmoment als Ebenheitsformen mit einer Mischform zwischen 1-5 (eben mit lokalen Materialanhäufungen) und 3-5 (konkav mit lokalen Materialanhäufungen). Diese Ergebnisse sind in Anlage 16 im Diagramm - Gegenüberstellung der Ebenheitsform zum Torsionsmoment - zu finden. Eine Analyse der Veränderung der Ebenheitsabweichung infolge der Reibwertprüfung bringt keine zusätzlichen verwertbaren Aussagen zur Korrelation (Anlage 16, Diagramm, Gegenüberstellung der Ebenheitsabweichung nach RWP zum Torsionsmoment'). Allerdings findet eine Veränderung statt und dies wird sowohl auf den Oberflächen als auch an den Messergebnissen der Ebenheitsabweichung deutlich. Es lässt sich nicht quantifizieren, dass geringere Torsionsmomente und damit Reibwerte aus einer starken Veränderung der Ebenheit infolge der Krafteinwirkung resultieren. Vielmehr sind die Beschaffenheit des Gegenkörpers und das tatsächliche Aufeinandertreffen der verschiedenen Abweichungen und Oberflächenstrukturen entscheidend.

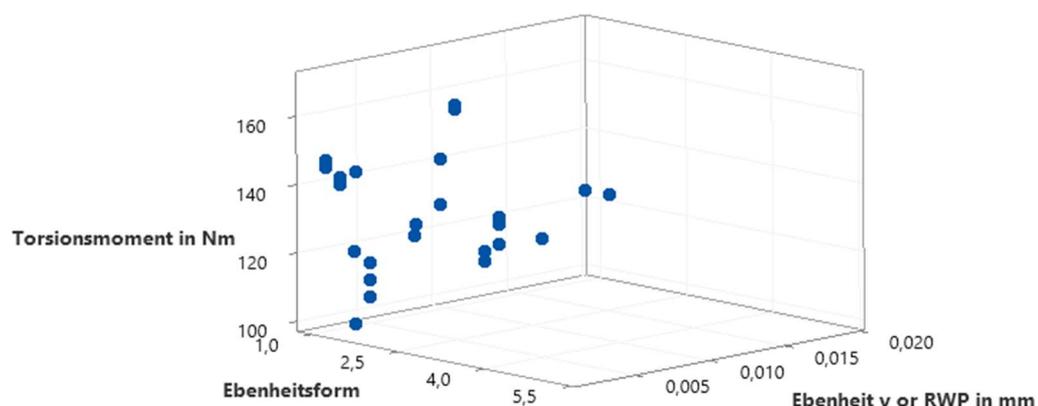


Bild 7-12 3D-Streudiagramm: Torsionsmoment-Ebenheit-Ebenheitsform

Des Weiteren zeigt sich, dass ein Zusammenspiel aus der Form der Kreisringfläche und einer Kombination aus Ebenheitsabweichung und Rechtwinkligkeitsabweichung, siehe Formel 7-4, die niedrigeren Reibwerte erklärt. Ist der Quotient ER (Formel 6-4) größer als 2000 und hat die Oberfläche die Mischform von 1 und 5, sind niedrige Reibwerte das Resultat (Bild 7-13). Für eine exakte Voraussage, welche Abweichungen sich wie in einem tribologischen System mit den Abweichungen des Gegenkörpers verhalten, müssen umfangreichere Studien mit einer höheren Auflösung der Abweichungen sowie der Funktionsgröße (hier: Haftreibwert) und die gezielte Herstellung der Abweichung mit Untersuchung der beiden Körper und deren realen Kontaktverhältnissen durchgeführt werden.

$$ER = \frac{\frac{1}{\text{Ebenheit}} + \frac{1}{\text{Rechtwinkligkeit ohne Form}}}{\frac{\text{Ebenheit}}{\text{Rechtwinkligkeit ohne Form}}} \quad (7-4)$$

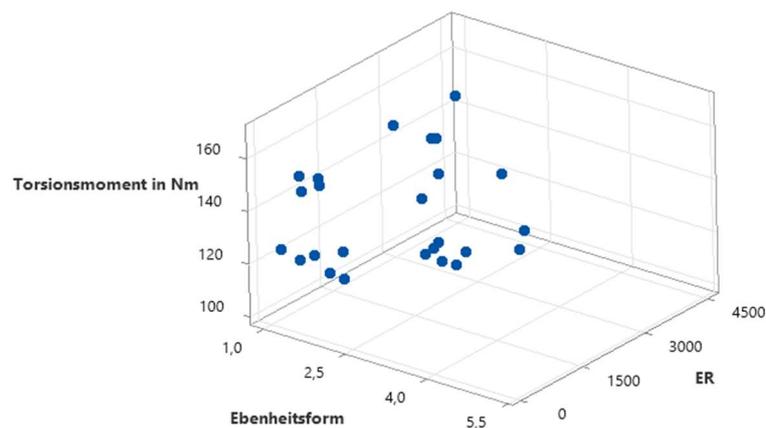
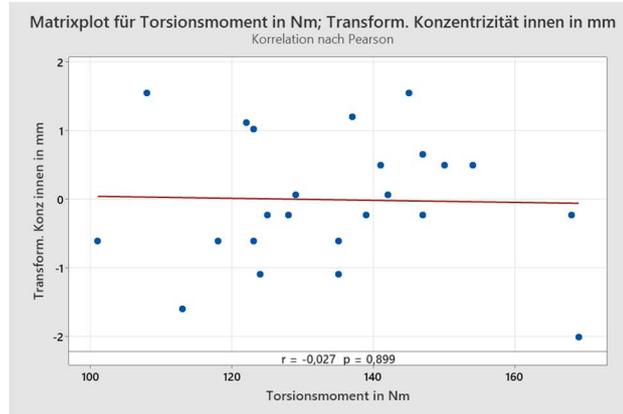


Bild 7-13 3D-Streudiagramm: Torsionsmoment-Quotient ER-Ebenheitsform

### Konzentritätsabweichungen - innen (Innendurchmesser zur Bauteilachse)

Die Untersuchung der Konzentritätsabweichung - innen (transformierte Daten) per Matrixplot und mittels Pearson zeigt keine Korrelation zum Torsionsmoment (Bild 7-14). Die Wertestreuung ist sehr groß, so dass diese in keinem Zusammenhang stehen. Die These, eine hohe Konzentritätsabweichung führe zu einer Minimierung der kontaktierenden Fläche und einer Verringerung des Torsionsmoments sowie des Haftreibwertes, kann damit nicht bestätigt werden. Begründet ist dies in der Annahme, dass die Kontaktfläche nicht allein von den Konzentritätsabweichungen abhängt, vielmehr im Zusammenspiel von Ebenheitsabweichung, Oberflächenstruktur und der generellen Beschaffenheit des Gegenkörpers sowie der Paarungssituation. Untersuchungen der Veränderung der Konzentritätsabweichung - innen nach der Reibwertprüfung zeigten ebenfalls keine Korrelationen zum Torsionsmoment (Anlage 17).



**Methode**

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 25

**Paarweise Korrelationen nach Pearson**

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korre-lation	95%-KI für p	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	transf Konzentrität innen	25	-0,027	(-0,418; 0,372)	0,899

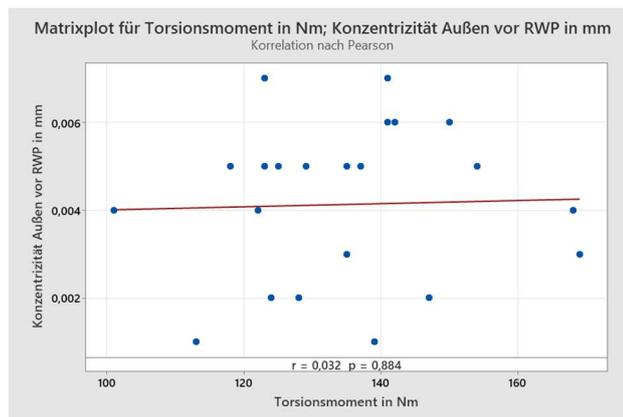
**Korrelationen**

	Torsionsmoment in Nm	r
Transf. Konzentrität innen		-0,027

Bild 7-14 Korrelationsanalyse: transformierte Konzentrität innen – Torsionsmoment

**Konzentritätsabweichungen - außen (Außendurchmesser zur Bauteilachse)**

Eine gleiche Tendenz wie bei der Konzentrität - innen zeigt sich bei der Analyse der Außenkonzentrität. Beide Auswertungen (Bild 7-15) zeigen keinen Zusammenhang zwischen einer Veränderung in der Konzentritätsabweichung und einer resultierenden Änderung des Torsionsmomentes. Die Betrachtung der Veränderung der Konzentritätsabweichung vor und nach der Reibwertprüfung (RWP) gibt keinen Aufschluss über einen möglichen Zusammenhang zum Torsionsmoment und lässt ebenfalls keine Tendenzen erkennen, siehe Anlage 17.



**Methode**

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 23

**Paarweise Korrelationen nach Pearson**

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korre-lation	95%-KI für p	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Konzentrität Außen vor RWP in mm	23	0,032	(-0,385; 0,439)	0,884

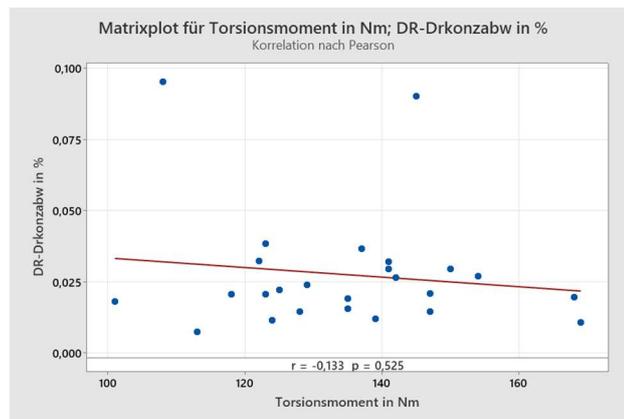
**Korrelationen**

	Torsionsmoment in Nm	r
Konzentrität Außen vor RWP in mm		0,032

Bild 7-15 Korrelationsanalyse: Konzentrität außen – Torsionsmoment

## Kombination der Konzentrititätsabweichungen

Im Folgenden werden verschiedene Kombinationen der Konzentrititätsabweichungen in Bezug auf den Einfluss auf das Torsionsmoment untersucht. Dazu zählen zum einen die zuvor einzeln betrachteten Konzentrititätsabweichungen und zum anderen das gleichzeitige Wirken beider Konzentrititätsabweichungen. Diese Abweichungen führen zu einer Veränderung der Kontaktfläche und der Kontaktverhältnisse während der Reibwertprüfung. Die Addition der beiden Konzentrititätsabweichungen in Verbindung auf die Wirkung zum Torsionsmoment zeigten anhand des Pearsonwertes und des r-Wertes keinen Zusammenhang (Anlage 18). Folgend wurden ein Produkt und ein Quotient berechnet und hinsichtlich der Korrelation untersucht. Bei beiden Auswertungen zeigten sich ebenfalls keine Abhängigkeiten und Tendenzen zum Torsionsmoment (Anlage 18). Aus diesem Grund wurden die einzelnen Abweichungen auf die Berechnung der jeweiligen Durchmesser und deren Auswirkung auf die Berechnung des Reibdurchmessers angewendet, damit diese in Beziehung zum jeweiligen Torsionsmoment gesetzt werden können. Die Korrelationsanalyse nach Pearson zeigt keine signifikante Verbindung zwischen den beiden Einflussgrößen, siehe Bild 6-16. Dabei wurde das Verhältnis des idealen Reibdurchmessers (DR) zum verminderten Reibdurchmesser infolge der Konzentrititätsabweichungen (Drkonzabw) in Prozent ermittelt. Schlussfolgernd üben die Konzentrititätsabweichungen keinen Einfluss auf das Torsionsmoment und den daraus resultierenden Haftreibwert aus.



### Methode

Korrelationstyp	Pearson
Anzahl der verwendeten Zeilen	25

### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korre- lation	95%-KI für p	p- Wert
Torsionsmoment in Nm	DR-Drkonzabw in %	25	-0,133	(-0,502; 0,276)	0,525

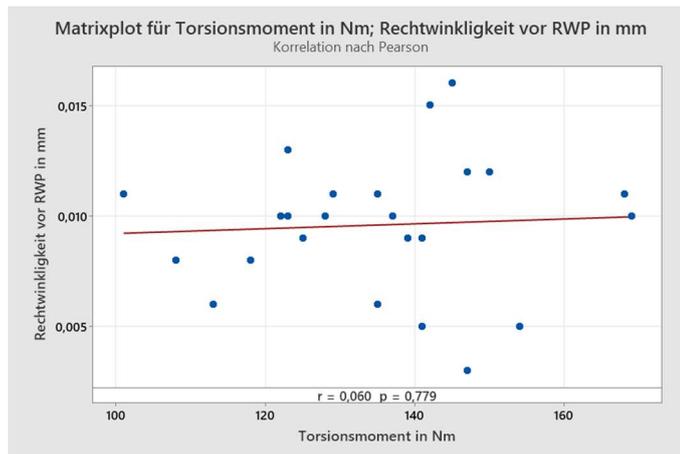
### Korrelationen

	DR-Drkonzabw in %
Torsionsmoment in Nm	r = -0,133

Bild 7-16 Korrelationsanalyse: Verhältnis des Reibdurchmessers zu vermindertem Reibdurchmesser in % – Torsionsmoment in Nm

## Rechtwinkligkeitsabweichungen

Das Ergebnis der Korrelationsuntersuchung zwischen der Rechtwinkligkeit (mit Form) vor der Reibwertprüfung (RWP) und dem Torsionsmoment zeigt keine Signifikanz (Bild 7-17). Eine zusätzliche Auswertung der Rechtwinkligkeit (ohne Form) zeigt ebenfalls keine Korrelation anhand des r- und des Pearson-Wertes, siehe Anlage 19.



### Methode

Korrelationstyp	Pearson
Anzahl der verwendeten Zeilen	24

### Paarweise Korrelationen nach Pearson

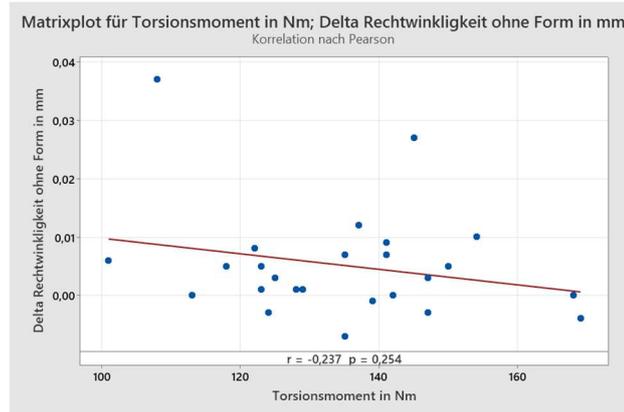
Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korre- lation	95%-KI für p	p- Wert
Torsionsmo- ment in Nm	Recht- winkligkeit v in mm	24	0,060	(-0,352; 0,453)	0,779

### Korrelationen

	Torsionsmoment in Nm
Rechtwinkligkeit v in mm	r = 0,060

Bild 7-17 Korrelationsanalyse: Rechtwinkligkeit (mit Form) vor der RWP – Torsionsmoment

Die Untersuchung der Veränderung der Rechtwinkligkeitsabweichungen (Delta der Rechtwinkligkeitsabweichungen) vor und nach der Reibwertprüfung weist eine geringe Korrelation zum Torsionsmoment auf, siehe Bild 7-18. Die errechnete Abweichungsspanne zwischen der Rechtwinkligkeit vor und nach der Reibwertprüfung zeigt den Einfluss der Kontaktgeometrie während der Prüfung von Grund- und Gegenkörper auf. Dabei scheint es unerheblich, wie stark die Rechtwinkligkeit sich durch die Krafteinwirkung verändert. Selbst bei großen Änderungen von 54 µm liegt das dementsprechende Torsionsmoment im hohen Bereich bei 150 Nm, siehe Tabelle Anlage 19. Dies bekräftigt die in Kapitel 4 getroffene Aussage, dass sich durch den Prüfstandaufbau die Abweichungen in der Rechtwinkligkeit sehr gut kompensieren lassen.



**Methode**

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 25

**Paarweise Korrelationen nach Pearson**

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korre- lation	95%-KI für p	p- Wert
Torsions- moment in Nm	Delta Recht- winkligkeit ohne Form in mm	25	-0,237	(-0,578; 0,174)	0,254

**Korrelationen**

Torsionsmoment in Nm	Delta Rechtwinkligkeit ohne Form in mm
	$r = -0,243$

Bild 7-18 Korrelationsanalyse: Delta Rechtwinkligkeit (ohne Form) – Torsionsmoment

Anhand der vorliegenden Rechtwinkligkeitsabweichungen wurden die dazugehörigen Winkel zur Probenkörperachse errechnet und diese auf ihre Wechselwirkung zum Torsionsmoment untersucht. In der Korrelationsanalyse zeigt sich keine Abhängigkeit, siehe Anlage 19. Die fehlenden Korrelationen zwischen dem Torsionsmoment und den Rechtwinkligkeitsabweichungen mit und ohne Formabweichungen sowie den untersuchten Abweichungsänderungen (Deltawerte) und der berechneten Winkel sind auf die konstruktive Gestaltung des Prüfstandes zurückzuführen. Die einzelnen Spannbuchsen, in welche die Probekörper montiert werden, lassen eine Bewegung und Ausrichtung zueinander zu, so dass sich die Oberflächen aufeinander ausrichten lassen und die Rechtwinkligkeit der Reibfläche zur Probenkörperachse teilweise oder ganz kompensiert werden kann. Weiterhin kann es in der Modellvorstellung im ungünstigsten Fall dazu kommen, dass die Form- und Lageabweichungen beider Kontaktpartner ungünstig aufeinandertreffen, die Kraft sich auf einer minimalen Fläche verteilt, so dass die lokale Flächenpressung die Fließgrenze des Werkstoffes überschreitet und es zum vorzeitigen Abscheren der Oberflächen kommt, wie bereits bei der Untersuchung der Ebenheitsabweichung erwähnt. Die Folge wären ein Abfall der Haftreibwertkurve und ein verminderter Haftreibwert. Auf dem Bild 7-19 ist die zuvor beschriebene Modellvorstellung eingetreten. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die Superposition der Ebenheitsabweichungen sowohl die Oberflächenstrukturierung als auch die geometrische Oberflächenstruktur des Gegenkörpers ungünstig zueinander ausgerichtet waren, was zu einem Versagen durch Abscheren der beiden Oberflächen führte. Als Ergebnis konnte kein Haftreibwert  $\mu_{0,1}$  aufgrund des frühzeitigen Versagens („Durchrutschen“) ermittelt werden.



Bild 7-19 Superposition der geometrischen Abweichungen und Oberflächenversagen

### 7.3.2.2 Differenzierte Oberflächenstrukturierungen

Die vorherigen Untersuchungen zeigten, dass bei einer Messwertreihe von 25 Versuchen die Statistik und deren Methoden für eine Korrelationsfindung keine exakten Abhängigkeiten aufzeigen. Gründe hierfür sind die wenigen Messwerte (25) und eine große Streuung der einzelnen geometrischen Parameter. Daher wird nachfolgend bei dem Vergleich unterschiedlicher Oberflächenstrukturen (Bild 7-20) darauf verzichtet. Die Charakterisierung der Oberflächen erfolgt nach dem in Kapitel 5.3 beschriebenen Ansatz der Segmentierung in Hügel und Täler.

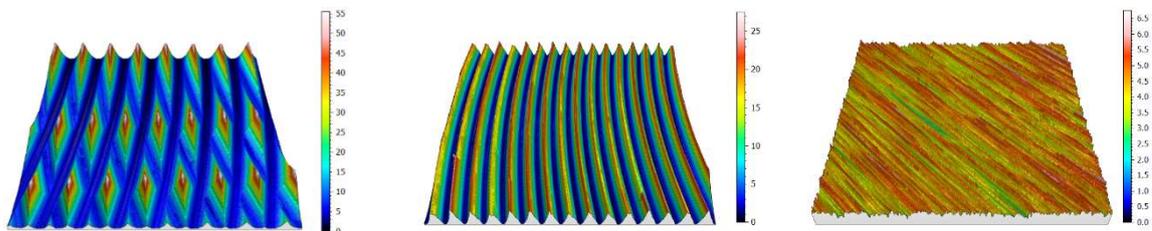


Bild 7-20 grob zirkulargefräste, grob gedrehte und grob geschliffene Oberflächen auf Vergütungsstahl (42CrMo4+QT) v. I.

Die geometrischen Kenngrößen sind die Inselanzahl  $n$ , die projizierte Durchschnittsoberfläche  $A_{on}$ , das Durchschnittsmaterialvolumen  $V_{Mat}$  und die gesamte Kontaktfläche  $A_{Ges}$ , welche sich aus der Inselanzahl und der projizierten Durchschnittsoberfläche ergibt. Für die Unterscheidung der einzelnen geometrischen Oberflächenbeschaffenheiten der unterschiedlichen Strukturen wurden Analysen durchgeführt, um einen Ansatz für die Wahl der Bewertungshöhe  $c$  zu finden. Hierfür standen die in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Drückversuche sowie die Untersuchung der Oberflächenstrukturen vor und nach der Reibwertprüfung zur Verfügung.

Anhand geometrisch einfach beschreibbarer und wiedererkennender Strukturen wurden grob gedrehte Stahloberflächen für die Druckversuche mit drei unterschiedlichen Normalkräften beaufschlagt. Weiterhin sind Probekörper mit einer geometrisch definierten Pyramidenstruktur für diese Zwecke angefertigt worden. Beide Oberflächenstrukturierungen dienen dazu, auf den Oberflächenanteil zu schließen, der für den Kontakt relevant ist. In Bild 7-21 sind Bilder der tatsächlichen und der gemessenen Oberflächen zu sehen.

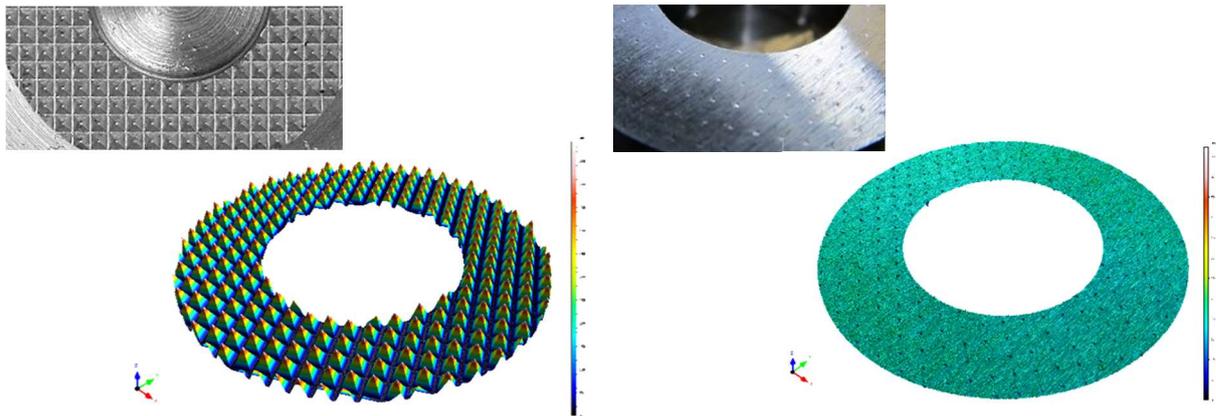


Bild 7-21 Pyramidenstruktur (links), Gegenkörper nach Druckversuch bei 15,9 kN (rechts)

Infolge der unterschiedlichen Normalkräfte konnten sowohl bei den Pyramidenstrukturen als auch bei den Drehstrukturen und den geschliffenen Strukturen in den Konturanalysen die Veränderung der Geometrie am strukturierten Probekörper und/oder die verschiedenen Eindringtiefen im Gegenkörper ermittelt werden, siehe Tabelle 7-2. Die Untersuchungen der Oberflächenstrukturen vor und nach den Reibwertprüfungen zeigten bei den unterschiedlichen Strukturen, dass die Oberflächenstruktur unterschiedlich tief in den Gegenkörper bei gleicher Normalkraft eingedrückt wird. Dies lässt sich anhand der Kontaktfläche erklären.

Tabelle 7-2: Ergebnisse der Oberflächenveränderung aus den Konturanalysen (Mittelwerte)

Oberflächenveränderung	15,9 kN FP: 30 MPa	53,0 kN FP: 100 MPa	159,0 kN FP: 300 MPa
Grundkörper: geschliffene Struktur Gegenkörper (geschliffen)	Sichtbar Nicht messbar	0,4 $\mu\text{m}$	0,9
Grundkörper: gedrehte Struktur Gegenkörper (geschliffen)	1,5 $\mu\text{m}$	2,5 $\mu\text{m}$	7,3 $\mu\text{m}$
Grundkörper: Pyramidenstruktur Gegenkörper (geschliffen)	5,6 $\mu\text{m}$	11 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$

Je größer die Kontaktfläche bei gleicher Normalkraft ist, desto kleiner ist die vorliegende Spannung resp. Flächenpressung. Daher dringen die Oberflächenstrukturen weniger stark in den Gegenkörper. Weiterhin sind die Strukturierungsrichtung, die Struktur auf der Oberfläche und die Funktions- oder Wirkrichtung entscheidend. Unter der Funktions- oder Wirkrichtung ist die Bewegungsrichtung der Oberflächenstrukturierung von Grund- und Gegenkörper zu verstehen. Versuche zeigten, dass der Reibwert höher ist und die Reibwertkurve einen anderen Verlauf hat, wenn sich die geschliffenen Oberflächenstrukturen von unterem und oberem Probekörper in einem Versatz von 90° zueinander befinden (Bild 7-22).

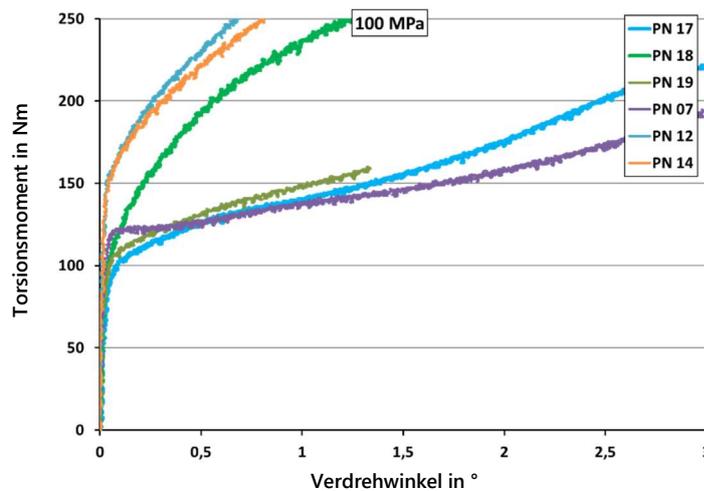


Bild 7-22 Reibwertkurven mit unversetzter (PN 07, PN 17, PN 19) und um 90° versetzter Struktur (PN12, PN 14, PN 18) aus den Prüfberichten des Teilprojektes I

Des Weiteren weist bei einem Vergleich zwischen gefrästen, gedrehten und geschliffenen Oberflächen, welche immer gegen eine geschliffene Referenzoberfläche getestet wurden, die Oberflächenstruktur einen höheren Reibwert auf, welche mit dem Referenzkörper eine gekreuzte Struktur ergibt (geschliffen, zirkulargefräst), siehe Tabelle 7-3. Außerdem erzielen die größeren Strukturen eines Fertigungsverfahrens höhere Reibwerte.

Tabelle 7-3: Mittelwerte des Haftreibwertes für die verschiedenen Oberflächenstrukturen

Oberflächenbearbeitung	Strukturierung	Mittelwert
Flachschleifen	fein	0,34
Flachschleifen	grob	0,37
Drehen	grob	0,26
Drehen	fein	0,19
Stirnfräsen	grob	0,35
Stirnfräsen	fein	0,28

### 7.3.3

#### 7.3.3 Werkstoffbedingte Eigenschaftsänderungen

Für die Untersuchung der Streuungsanteile verschiedener Werkstoffe wurde für Stahl, Sphäroguss (Grauguss mit Kugelgraphit) und Aluminium ein Bearbeitungsverfahren gewählt, welches gleiche Oberflächenstrukturen erzeugt. Mithilfe einer sorgfältig gewählten Prozessparameterkonfiguration, wie gleichbleibender Werkzeugschneide, Schnitttiefe und Vorschub, konnten annähernd gleiche Oberflächen mittels Drehen jeweils für eine Fein- und eine Grobbearbeitung hergestellt werden. Das Bild 7-23 zeigt hier exemplarisch nur die Grobbearbeitung. Trotz gleicher Strukturierung spiegelt der Haftreibwert die werkstofftechnologischen Komponenten und nicht nur die Oberflächenstruktur allein wider (Anlage 12).

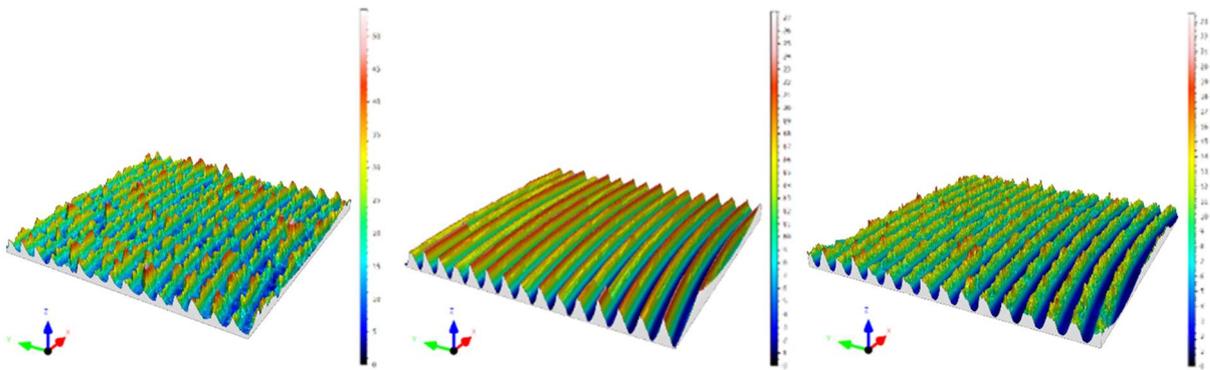


Bild 7-23 Grob gedrehte Strukturen auf Grauguss (EN-GJS-400), Vergütungsstahl (42CrMo4+QT) und Aluminium (EN AW-6082T6)

Im Ergebnis zeigt sich, dass Stahl (Standardabweichung=0,2) eine größere Streubreite des Haftreibwertes als Guss und Aluminium (Standardabweichung=0,1) aufweist. Bei Aluminium liegt der Wert im Mittel um 11,5 % unter den beiden anderen Haftreibwerten, was auf die werkstofftechnischen Eigenschaften zurückzuführen ist. Die geringe Streuung der geometrischen Parameter kann auf die gleichbleibende Oberflächenstrukturierung bezogen werden, so dass diese in Kombination mit den Formabweichungen wirken. Die Streubreite des Haftreibwertes lässt sich auf die Lageabweichungen zurückführen, da bei einem Material mit geringem E-Modul diese besser ausgeglichen werden und sich die kontaktierenden Flächen annähern. Nicht nur der Grundkörper, sondern auch der Gegenkörper und dessen Charakteristiken sind ausschlaggebend. Analysen zeigen die Veränderungen der Ebenheit und der Rechtwinkligkeit infolge des Kontaktes mit dem Gegenkörper. Jedoch kann nicht gänzlich geschlossen werden, dass bei kleinen Reibwerten die Rechtwinkligkeit durch den Gegenkörper nach der Reibwertprüfung größer geworden ist oder aber höhere Reibwerte sich durch einen relativ gleichbleibenden Kontakt (keine wesentlichen Veränderungen der Form- und Lageeigenschaften) erklären lassen.

Daraus ergibt sich ein Zusammenspiel der Form- und Lageeigenschaften sowie der Oberflächencharakteristiken und der Charakteristiken des Gegenkörpers, die den Haftreibwert bilden. Um die Eigenschaften miteinander verknüpfen zu können, werden die gleich strukturierten Oberflächen der verschiedenen Grundmaterialien geometrisch nach den vorangegangenen Eigenschaften in Fein- und Grobstrukturen charakterisiert. Die Tabelle 7-4 enthält die geometrische Charakterisierung der drei gleich strukturierten Oberflächen. Trotz gleicher Fertigungsparameter schlagen sich die Werkstoffeigenschaften in den geometrischen Kenngrößen nieder, so dass eine Unterscheidung der Strukturen möglich ist. Die Inselanzahl  $n$  bei Stahloberflächen ist deutlich geringer als bei Guss- und Aluminiumoberflächen, jedoch anhand der Durchschnittsoberfläche der Inseln deutlicher resp. größer ausgeprägt. Bei den Guss- und Aluminiumoberflächen liegen die Inselanzahlen relativ nahe beieinander. Am deutlichsten sind die unterschiedlichen Werkstoffe anhand der Durchschnittsoberfläche je Insel unterscheidbar. Multipliziert man die Inselanzahl mit der Durchschnittsfläche, ergibt sich eine Gesamtfläche, welche sich ebenfalls bezüglich der drei Oberflächen nur geringfügig unterscheidet.

Tabelle 7-4: Geometrische Charakterisierung der grob gedrehten Oberflächen

PK-Nummer	Grundwerkstoff	$\mu_{0,1}$	Materialanteil in %	c in $\mu\text{m}$	Inselanzahl n	Durchschnittsoberfläche Aon in $\mu\text{m}^2$	Durchschn. Materialvolumen $V_{\text{Mat}}$ in $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	Ages in $\text{mm}^2$
A03-02	Stahl	0,24	20,000	7,940	33,000	48.046,000	0,555	1,586
A03-07	Stahl	0,28	20,000	10,600	27,000	57.996,000	0,581	1,566
A03-13	Stahl	0,27	20,000	8,970	28,000	55.421,000	0,621	1,552
A03-14	Stahl	0,25	20,000	13,500	34,000	46.260,000	0,603	1,573
<b>Mittelwert</b>		<b>0,26</b>			<b>30,500</b>	<b>51.930,750</b>	<b>0,590</b>	<b>1,569</b>
Standardabweichung		0,02			3,512	5.663,267	0,028	0,014
A-06-01	Guss	0,25	20,000	23,820	480,000	2.103,000	0,693	1,009
A-06-02	Guss	0,26	20,000	26,540	272,000	3.786,000	0,703	1,030
A-06-08	Guss	0,26	20,000	25,040	314,000	3.259,000	0,701	1,023
A-06-13	Guss	0,27	20,000	27,140	274,000	3.762,000	0,682	1,031
<b>Mittelwert</b>		<b>0,26</b>			<b>335,000</b>	<b>3.227,500</b>	<b>0,695</b>	<b>1,023</b>
Standardabweichung		0,01			98,583	788,058	0,010	0,010
A07-01	Aluminium	0,23	20,000	13,450	142,000	10.774,000	0,510	1,530
A07-07	Aluminium	0,24	20,000	12,090	387,000	3.411,000	0,368	1,320
A07-08	Aluminium	0,22	20,000	11,460	319,000	4.786,000	0,456	1,527
A07-14	Aluminium	0,22	20,000	10,980	259,000	5.890,000	0,459	1,526
<b>Mittelwert</b>		<b>0,23</b>			<b>276,750</b>	<b>6.215,250</b>	<b>0,448</b>	<b>1,476</b>
Standardabweichung		0,01			103,943	3.203,881	0,059	0,104

Ein Vergleich mit dem Reibwert lässt vermuten, dass nicht nur die Gesamtfläche, bestehend aus den Einzelparametern der Inselanzahl und der Durchschnittsoberfläche, entscheidend ist, sondern auch das Materialvolumen. Trotz ähnlich hoher Gesamtfläche (Mittelwert Stahl: 1,57 mm<sup>2</sup>; Mittelwert Aluminium: 1,48 mm<sup>2</sup>) verzeichnet der Haftreibwert einen größeren Unterschied im Mittel (Stahl: 0,26; Aluminium: 0,23), was auf das Materialvolumen zurückzuführen ist (Bild 7-24). Die 3D-Streudiagramme zeigen auf, dass die groben und feinen Strukturen unterschiedliche Parameter aufweisen und sich anhand der geometrischen Parameter ein-gruppieren lassen. Zudem kann aus den Daten entnommen werden, dass bei einer sehr fein strukturierten Aluminiumoberfläche (Bild 7-25) die Haftreibwerte deutlich höher liegen als bei den Vergleichsgruppen (Stahl, Guss). Nicht zu vergessen sind die werkstoffspezifischen Kennwerte, wie der E-Modul oder die Streckgrenze, die funktional wirken, jedoch spiegeln die sich in der Oberflächengeometrie indirekt wider. Lediglich die Flächenpressung (Normalkraft), welche indirekt im Reibwert (normiert) enthalten ist, muss für die funktionale Betrachtung berücksichtigt werden.

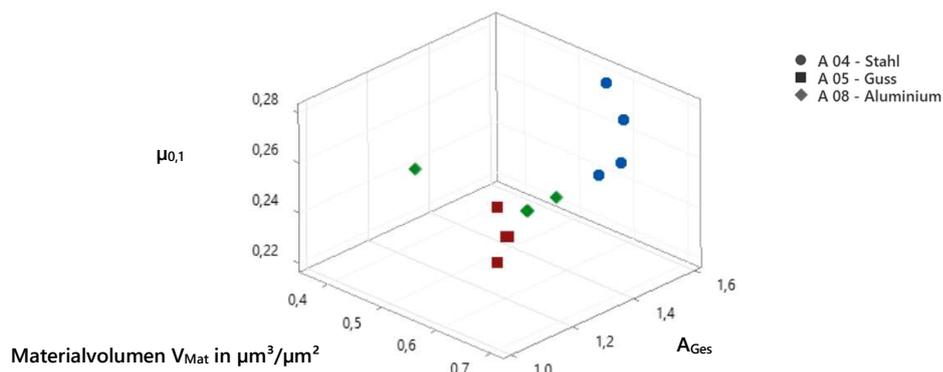


Bild 7-24 3D-Streudiagramm grob gedrehte Oberflächen ( $\mu_{0,1}$ - $A_{Ges}$ -  $V_{Mat}$ )

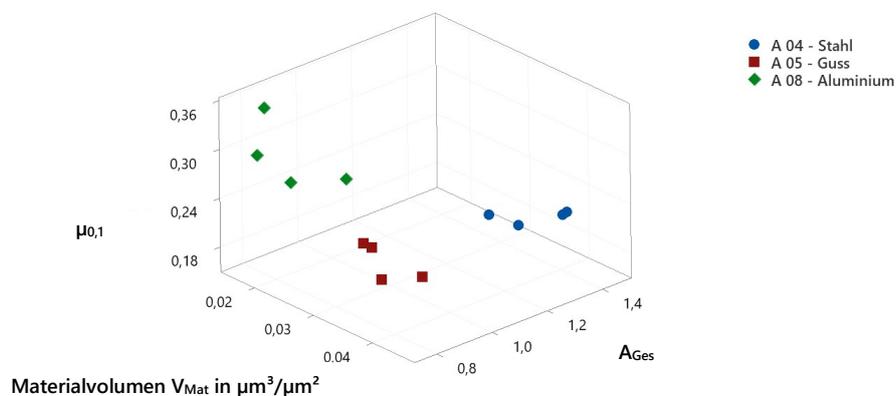


Bild 7-25 3D-Streudiagramm fein gedrehte Oberflächen ( $\mu_{0,1}$ - $A_{Ges}$ -  $V_{Mat}$ )

### 7.3.4 Einfluss der Erfassungsstrategie

Für die Bewertung des Einflusses der Erfassungsstrategie in Bezug auf die Herausstellung der reibwertrelevanten Strukturen und des Funktionseinflusses wurden drei verschiedene Messgeräte mit unterschiedlichen Auflösungen genutzt. Durch die aufgebrachte Vickersmarkierung war es möglich, ein und dieselben Oberflächenstrukturen, welche mittels drei verschiedener Geräte erfasst wurden, miteinander zu vergleichen. Die einzelnen Spezifikationen der drei Messgeräte und Verfahren sind in Tabelle 7-5 aufgeführt.

Tabelle 7-5: Übersicht: verwendete Messgeräte mit technischen Spezifikationen

	<b>AFM JPK Nano-wizard 2</b>	<b>Mahr Perthometer PGK-120</b>	<b>Mahr MFU-100</b>
<b>Verfahren</b>	Taktil	Taktil	Taktil
<b>Antastkraft</b>	<1 mN	1,5 mN	3 mN
<b>Tasterradius</b>	10 nm	2 µm	5 µm
<b>Auflösung</b>	0,3 nm (x, y) <0,15 nm (z)	1 µm x 1 µm	5 µm x 5 µm
<b>Messfeldgröße</b>	99 µm x 99 µm	3,5 mm x 4 mm	Ø 16 mm - Ø 29 mm

Auf den ersten Blick ist die geringere Auflösung der Strukturfeinheiten in Bild 7-26 der fein geschliffenen Oberfläche von links nach rechts zu erkennen. Dabei ist ein Unterschied in der z-Höhe von der AFM- zur PGK-erfassten Oberfläche von 1,41 µm (ca. 29 %) und bei den MFU-Erfassungen von 1,73 µm zu verzeichnen. Dies entspricht einer prozentualen Verringerung um circa 29 % für PGK- und circa 35,6 % bei MFU-Oberflächen. Bei größeren Strukturen ist der Unterschied wesentlich geringer. Setzt man dabei die Höhe des Oberflächenausschnittes von 3 mm x 3 mm mit 9,29 µm dazu ins Verhältnis, sind es je 15,2 % bzw. 18,6 % für die PGK- bzw. MFU-Oberflächen. Bei einer Gesamtflächenbetrachtung verringert sich der Erfassungsunterschied auf 11,75 % und 13,3 %. Aufgrund des als verhältnismäßig gering zu erachtenden Informationsverlustes von PGK zu AFM und dem gegenüberstehenden hohen Erfassungsaufwand des AFMs für kleine Oberflächen wurde sich auf die Extrahierung mittels PGK120 und MFU100 konzentriert.

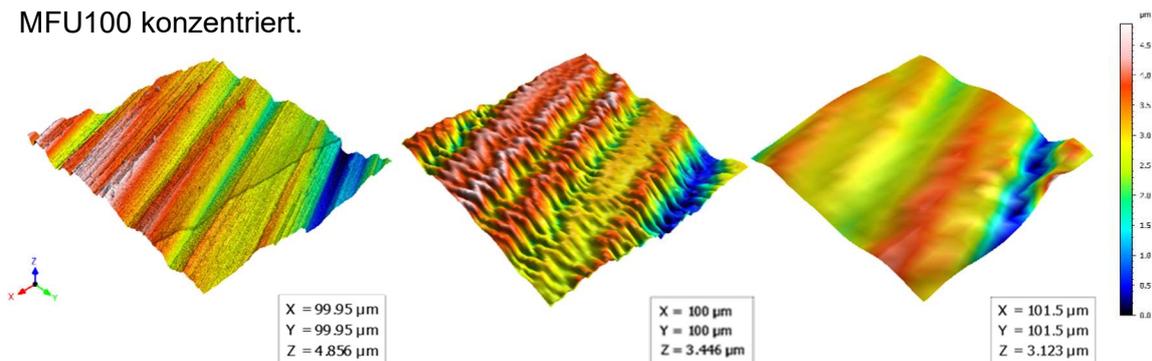


Bild 7-26 Erfassung der geschliffenen Oberfläche mit AFM, PGK und MFU 100 (v.l.)

Jedoch wirkt sich diese Reduzierung auf die geometrische Charakterisierung vor allem durch das Fehlen eines von außen anliegenden Bezuges, welcher sich nicht an den Oberflächeneigenschaften ausrichtet, aus. Zusätzlich erfolgte eine Analyse des Punktabstandes (laterale Auflösung), bei der nachträglich die Messpunkte anhand der PGK-erfassten Oberfläche mit  $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$  reduziert wurden. Die in Anlage 20 befindliche Tabelle zeigt die Auswirkungen der kontinuierlichen Ausdünnung der Messdaten sowie die Auswirkung auf die geometrische Charakterisierung anhand der Inselanzahl. Zusätzlich wurde dies für die unterschiedlichen Oberflächenstrukturierungen durchgeführt. Bei fein geschliffenen Oberflächen wird ab einem Punktabstand von  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  die Fehlergrenze von 10 % bei der Inselcharakterisierung überschritten, siehe Bild 7-27. Jedoch ist bei anderen Oberflächenstrukturen, z. B. grob geschliffenen, diese Grenze ab einem Punktabstand von über  $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$  bereits erreicht. Als Vergleich wurde ebenfalls Sz für die Punktereduzierung ausgewertet (Anlage 20). Aufgrund der statistischen Mittelung der Höheninformation ergibt sich trotz Punktereduzierung keine signifikante Änderung, erst ab  $20\ \mu\text{m}$  Punktabstand ist ein prozentualer Fehler von 12 % zu verzeichnen. Somit können relevante Oberflächeninformationen durch die statistische Mittelung außen vorgelassen werden und sie würden sich nicht in der funktionsrelevanten Beschreibung niederschlagen. Eine funktionale Oberflächencharakterisierung bedingt eine präzise Erfassung der relevanten Oberflächenstrukturen. Für die charakterisierten Flächen bildete die Erfassung mit  $1\ \mu\text{m}$  Punktabstand die Basis.

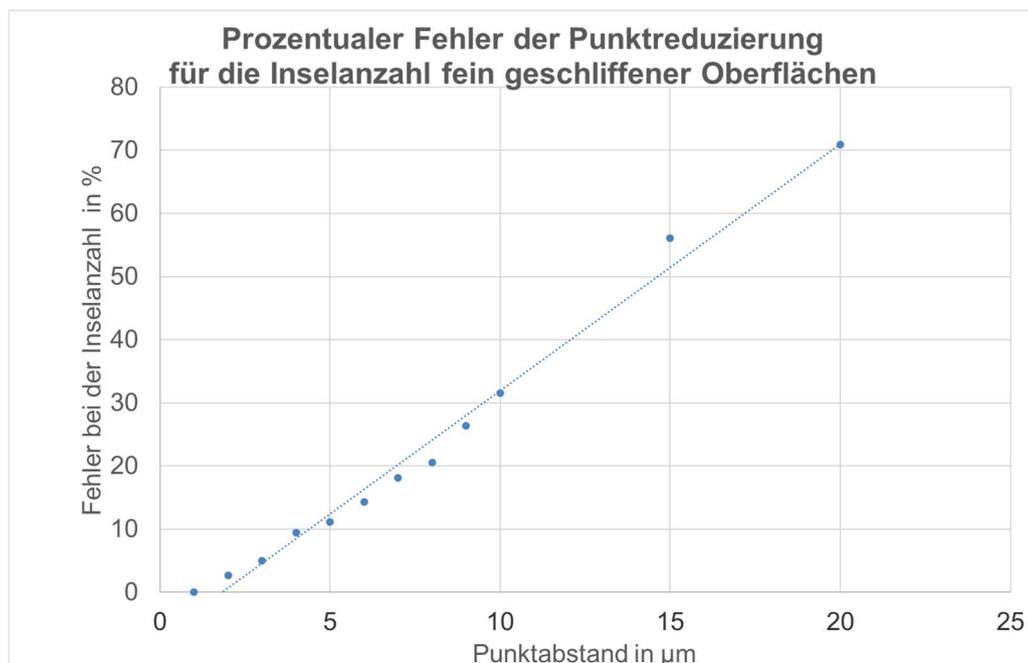


Bild 7-27 Prozentuale Veränderung der Inselanzahl durch Punktereduzierung

Die statistische Verteilung der Informationen auf der Oberfläche war ebenfalls Gegenstand der Analysen. Hierfür wurden jeweils auf einer Kreisringfläche vier auf den Durchmesser verteilte Auswerteflächen von 3 mm x 3 mm ausgewählt und charakterisiert. Neben den Einzelparametern sind die Kontaktfläche, welche sich aus der Inselanzahl und der durchschnittlichen Fläche je Insel berechnet, und das Kontaktvolumen (Inselanzahl x durchschnittliches Materialvolumen je Insel) als Bewertungskriterien für die Streuung der Parameter auf der Oberfläche herangezogen worden. Für die Parameter der Inselanzahl liegt der Mittelwert bei 219 Inseln mit einer Standardabweichung von 48,4. Für das Materialvolumen beträgt der Mittelwert  $2.302 \mu\text{m}^3$  je Insel und die Standardabweichung  $995,8 \mu\text{m}^3$  und für die Durchschnittsoberfläche je Insel ist der Mittelwert  $8.344 \mu\text{m}^2$  mit einer Standardabweichung von  $2.255,2 \mu\text{m}^2$ . Die berechneten Standardabweichungen, bezogen auf den jeweiligen Mittelwert (Variationskoeffizient), sind prozentual betrachtet relativ hoch und belaufen sich auf 22,1 % (Inselanzahl), 43,3 % (Materialvolumen) und 27,0 % (Durchschnittsoberfläche). Der prozentuale Anteil verringert sich jedoch auf 14,7 % für das gesamte Materialvolumen (durchschnittliches Materialvolumen x Inselanzahl) und für die gesamte Oberfläche auf 2,6 % (Durchschnittsoberfläche x Inselanzahl) bezogen auf den Oberflächenausschnitt von 3 mm x 3 mm, siehe Diagramme in Anlage 21. Aus diesen Untersuchungen lässt sich festhalten, dass eine relativ große Parameterstreuung in Abhängigkeit der erfassten Oberflächenstrukturen vorliegt. Jedoch minimiert sich dieser Effekt bei der Berechnung einer Gesamtfläche und des Gesamtmaterialvolumens eines Oberflächenausschnitts. Trotz der einheitlichen Oberflächenbearbeitung entstehen unterschiedliche Oberflächenstrukturen, die sich in den Parametern, wie gezeigt, unterschiedlich ausprägen. Ebenfalls ist die Streuung der Parameter auf einer Oberfläche in den vier Ausschnitten auf die nicht vorliegende Homogenität der Oberfläche, bedingt durch die Fertigung und das Material, zurückzuführen. Zudem wurden keine Filteroperationen verwendet, um Oberflächenerscheinungen herauszufiltern. Entscheidend ist, ob sich die minimalen Oberflächenunterschiede in der Funktionalität unter Berücksichtigung aller geometrischen Eigenschaften niederschlagen. Eine vollständige Aussage, ob diese minimalen Oberflächenänderungen signifikant den Haftreibwert beeinflussen, ist noch nicht final geklärt.

Einen Mehrwert im Hinblick auf das Herausstellen funktionaler Strukturen liefert die Simulation des Teilprojektes III nicht. Die simulierten Ausschnitte betragen maximal  $100 \mu\text{m}$ . Weiterhin ist die Informationsdichte der real erfassten Probekörperoberflächen zu groß für die Simulation und eine entsprechende Skalierung der Simulationsergebnisse auf größere Ausschnitte ist nicht möglich. Ein Rückschluss, welche Strukturen funktional relevant sind und in welcher Höhe dies der Fall ist, ist ausgehend von der kleinen simulierten Fläche auf einen größeren Ausschnitt oder die gesamte Kreisringfläche nicht möglich. Zudem werden dabei die Einflüsse von Ebenheits- und Rechtwinkligkeitsabweichungen komplett außer Acht gelassen.

## **7.4 Regressionsanalysen**

Bei einer Regressionsanalyse besteht ein gerichteter Zusammenhang zwischen den Größen, das heißt die eine Größe wird durch die andere beeinflusst. Durch die Berechnung einer Regressionsfunktion wird die Abhängigkeit der beiden Größen beschrieben. Damit lässt sich eine sehr gute statistische Vorhersage für die resultierende Größe, in dem Fall der Haftreibwert, treffen. Des Weiteren können neue Prognosen aufgestellt und abgeschätzt werden. In den meisten Fällen wird die lineare Regression nach der Schätzmethode der kleinsten Quadrate angewendet. Die Ergebnisse der Regression enthalten die Richtung, die Größe und die Signifikanz des Zusammenhangs zwischen den Größen. Die Richtungsbeziehung wird durch das jeweilige Vorzeichen der einzelnen Koeffizienten angezeigt. [min\_20]

Für die Funktion des Haftreibwertes unterliegen die Einflussgrößen dem statistischen Begriff der Regression. Gegenseitige gerichtete Abhängigkeiten einzelner Einflussgrößen würden sich ebenfalls untersuchen lassen. Jedoch zeigte sich bereits bei der Korrelationsanalyse die Begrenztheit in der geringen Datenbasis, so dass daraus keine zuverlässige Prognose für die Abschätzung der einzelnen Einflussfaktoren mittels Regressionsfunktion möglich ist. In Kombination mit der errechneten tatsächlichen Streuung am Anfang des Kapitels könnten durch diese Vorgehensweise alle Einflüsse sicher und präzise vorhergesagt werden. Weitergedacht könnte der Haftreibwert dadurch errechnet werden und vor allem im Toleranzdesign wirksam werden.

## 8 Modell zur Integration geometrischer Parameter in die Berechnung des Haftreibungswertes

Eine mathematische Implementierung der neu entwickelten geometrischen Parameter soll unter Modifikation der Formeln aus Kapitel 2.3.4 den funktionalen Zusammenhang in einem tribologischen System mit der Oberflächengeometrie aufzeigen. Der Dualitätsansatz von Deformation und Adhäsion (Formel 2-21) und die allgemeine Beschreibung aus Formel 2-14 gilt als Basis.

$$\mu = \frac{F_{Ri}}{F_N} = \frac{(F_{Def} + F_{Adh})}{F_N} \quad (8-1)$$

Für die Herleitung der Beziehung zwischen topografischen Oberflächenparametern und der Haftreibung wird ein Ansatz gewählt, bei dem die Kennwerte der Oberfläche, des Materials und der Einstellparameter des Prüfstandes in die Berechnungsgleichungen einfließen. Zudem werden die ermittelten Werkstoffkennwerte aus einer Versuchsreihe (Anlage 14) genutzt. Neben den Prüfbedingungen, wie Normalkraft, Verdrehwinkel etc., sind auch die geometrischen Oberflächenparameter sowie die Werkstoffeigenschaften maßgebend für den Haftreibungswert. Zur Verdeutlichung der Abhängigkeit dient die nachfolgend vereinfachte Formulierung:

$$\mu_{0,1} = f(A_{Real}, V_{mat}, E_{\square}, E_{\square}, E - Modul, Kontaktgeometrie) \quad (8-2)$$

### 8.1 Modifikation der Adhäsions- und Deformationskomponente

Auf Basis des Kapitels 2 ergeben sich für die Funktion des Haftreibungswertes die Einflussgrößen der Deformation von Oberflächen und der Adhäsionsneigung zwischen diesen. Für beide reibwertbeeinflussenden Eigenschaften können geometrische Kenngrößen zur Beschreibung gefunden werden. Die Oberflächendeformation ist abhängig von der Härte beziehungsweise der Fließspannung des Werkstoffs, der aufgetragenen nominellen Kraft und der resultierenden Flächenpressung. Daraus entsteht die Überlegung, dass sich die Deformationskomponente anhand des zu verdrängenden Materials charakterisieren lässt. Für die Funktion resp. den Anwendungsfall ist entscheidend, wie sich die Oberflächenstruktur ausbildet und ob die Strukturen ineinandergreifen, sich „verhaken“, oder aneinander abgleiten. Im Falle einer „Oberflächenverhakung“ (Bild 8-1a) würde ein größerer Widerstand gegen Verdrehung entstehen, welcher reibwerterhöhend wirkt. Die Widerstandsverringerung mit einhergehender Reibwertstagnation bzw. -minimierung wäre bei einem Aufeinanderabgleiten der Oberflächen denkbar (Bild 8-1b). Bei beiden Varianten sind unterschiedliche Anteile der Oberfläche am Reibwertprozess sowie an den jeweiligen Adhäsions- und Deformationskomponenten beteiligt.

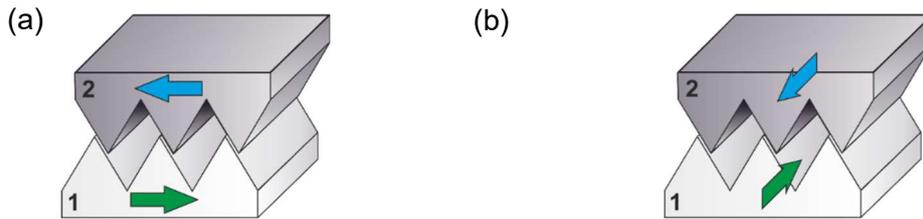


Bild 8-1 Relativbewegung der beiden Reibpartner anhand der Oberflächenstruktur

(a) gegen die Strukturrichtung (gegeneinander)

(b) in Strukturrichtung (resp. Inneandergleiten)

Richtigerweise müssten zur differenzierten Betrachtung der realen vorherrschenden Verhältnisse, während der Reibwertprüfung zwei Lastfälle unterschieden werden. Im ersten Fall wirkt eine reine Druckbeanspruchung durch die Normalkraft auf die Probenkörper (Bild 8-2 a). Im zweiten Schritt erfolgt die Einleitung des Torsionsmomentes, wobei die Normalkraft immer noch anliegt (Bild 8-2 b)). Die im Nachgang verwendeten Formeln berücksichtigen die gleichzeitig wirkenden Beanspruchungen. Aufgrund der unterschiedlich an der Oberflächenstruktur angreifenden Kräfte ergeben sich unterschiedliche Kontaktflächen. Jedoch ist dieser Unterschied zu vernachlässigen, da die geometrische Beschreibung auf der geschnittenen Oberfläche beruht und im Vergleich zur Flankenfläche größer ist, siehe Vergleich Anlage 22.

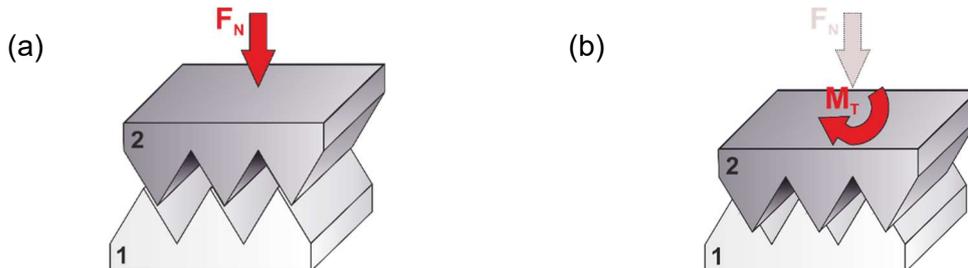


Bild 8-2 Lastfälle/Krafteinleitungen während des Funktionsfalles (Reibwertprüfung)

(a) Einleitung der Vorspannkraft  $F_N$ (b) Einleitung des Torsionsmomentes  $M_T$ 

### 8.1.1 Deformationskomponente

Die deformative Komponente der Reibungsarbeit setzt sich aus elastischer und plastischer Deformation zusammen (Abschnitt 2.3.4.1). Beide Komponenten werden mithilfe verschiedener Ansätze beschrieben. Anhand der klassischen Festigkeitshypothesen, die sich an der Art des Versagenskriteriums orientieren, wird bei der vorliegenden Betrachtung die Gestaltänderungsenergiehypothese lt. MISES zugrunde gelegt. Die im Element gespeicherte Energie ist dabei als Formänderungsenergie  $W_F^*$  bezeichnet. [win\_06]

Laut MAXWELL lässt sich diese in die Volumenänderungsenergiedichte  $W_V^*$  und die Gestaltänderungsenergie  $W_G^*$  aufgliedern (8.3). Es wird die Annahme getroffen, dass der Werkstoff beim Erreichen eines bestimmten werkstoffabhängigen Grenzwerts zu fließen beginnt  $W_G^* = W_{G \text{ kritisch}}$  (8-4). [win\_06]

$$W_F^* = W_V^* + W_G^* \quad (8-3)$$

$$W_G^* = W_{G \text{ kritisch}} = \frac{\sigma_{VG}^2}{6G} \quad (8-4)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ mit } \nu = 0,2 \quad (8-5)$$

Für den mehrachsigen Spannungszustand bei duktilen Werkstoffen wird eine Vergleichsspannung wie in Formel (8-6) ermittelt. Anhand der vorliegenden Beanspruchungen kann diese Formel auf diejenige für Linientragwerke reduziert werden, so dass die Normalspannung und die Torsionsspannung erhalten bleiben (8-7). [win\_06]

$$\sigma_{VG} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( [\sigma_x - \sigma_y]^2 + [\sigma_y - \sigma_z]^2 + [\sigma_z - \sigma_x]^2 + 6[\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2] \right)} \quad (8-6)$$

$$\sigma_{VG} = |\sigma| \sqrt{1 + 3 \left( \frac{\tau}{\sigma} \right)^2} \quad (8-7)$$

Die Torsionsspannung  $\tau$  wird mithilfe des Torsionsmoments und des Torsionsträgheitsmoments berechnet (8-8). Das Torsionsträgheitsmoment bezieht sich auf das Schweresystem einer Fläche und ist mathematisch für einen Stab mit  $\frac{\pi}{4} r^4$  angegeben. Setzt man dies in die Formel (8-8) ein, kürzt es sich zu  $r^3$ , welches einheitentechnisch einem Volumen entspricht (8-9). Aus dieser Herangehensweise und der Überlegung, dass sich ein veränderndes Materialvolumen als stärkerer oder schwächerer Widerstand gegen die aufgebrachte Torsion auswirkt, wird die geometrische Kenngröße des Materialvolumens  $V_{Mat}$  eingesetzt. Dabei entspricht  $\frac{\pi}{4}$  aus der Formel (8-9) einer kompletten Kreisringfläche für das Torsionsträgheitsmoment, basierend auf dem Radius. Da jedoch das Auswertefeld einen Teil dieses Kreisringes bereits beschreibt, muss dieser Nenner auf 3 minimiert werden (Formel 8-10). [win\_06]

$$\tau = \frac{M_x}{I_T} r = \frac{T_{R0,1}}{I_T} r \quad (8-8)$$

$$\tau = \frac{T_{R0,1}}{\frac{\pi}{4} r^4} r = \frac{T_{R0,1}}{\frac{\pi}{4} r^3} \quad (8-9)$$

$$\tau = \frac{T_{R0,1}}{\frac{\pi}{3} V_{Mat}} \quad (8-10)$$

Für die in Formel (8-7) erwähnte Spannung wird anstatt der geometrisch idealen Fläche  $A$  die reale Fläche/Kontaktfläche  $A_{Real}$  eingesetzt (8-11). Weiterhin gilt es, die Volumenänderungsenergiegedichte  $W_V^*$  (8-12) zu vernachlässigen, da eine plastische Deformation Volumenkonstanz bedingt. Daher ist nur der Fließbeginn  $W_G^*$  von Relevanz. [win\_06]

$$\sigma = \frac{N(x)}{A(x)} = \frac{F_N}{A_{real}} \quad (8-11)$$

$$W_V^* = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) \quad (8-12)$$

Für die elastische Deformationsarbeit bilden die wirkenden Kräfte und Momente mit den jeweiligen mittleren Verschiebungen  $s_D$  (u. a. Ergebnis aus den Drückversuchen) und Verdrehungen ( $0,1^\circ$ ) die Grundlage (8-13). Die mittlere Verschiebung hat, basierend auf den Drückversuchen, gezeigt, dass diese von der Oberflächenstruktur, der aufgetragenen Kraft und dem Torsionsmoment abhängen. Erkennbar ist, dass sich maximal 2 % der Spitzen infolge der Krafteinbringung in ihrer Höhe verändern. Daher erfolgt die Berechnung anhand der Oberflächenhöhe  $Sz$ . Aus den Überlegungen heraus, welche Eigenschaften entscheidend für die elastische Deformationsarbeit sind, wurde die Grundformel der virtuellen Arbeit um die elastische Dehnung, basierend auf den Werkstoffdaten des Spannungs-Dehnungs-Diagramms und unter Anwendung des Hook'schen Gesetzes (8-14), ergänzt. Die Drückversuche sowie die Untersuchungen vor und nach der Reibwertprüfung zeigten, dass ebenfalls die Oberflächenstruktur und deren Dimension entscheidend sind. Daher wurden zunächst die elastische Dehnung  $\varepsilon$ , die reale Oberfläche  $A_{Real}$  sowie die maximale Höhe zum Quadrat ( $Sz$ ) in die Formel als Faktor  $\varepsilon * \frac{Sz^2}{A_{real}}$  integriert. Bei einer Berechnung wurde ersichtlich, dass der zuvor genannte Faktor mit einem Wert von 0,016 dem Hystereseffaktor nahekommt. Demzufolge wurde er wieder aus der Formel eliminiert. Der Hystereseffaktor  $\alpha_{Hys i}$  wird in einschlägiger Literatur für Stahlwerkstoffe mit 2 % bzw. 0,02 angegeben, so dass dies auch für die nachfolgenden Rechnungen gilt.

$$W_{elast} = F_N * s_D + T_{R0,1} * \varphi_{0,1^\circ} \quad (8-13) \text{ mit } s_D = \frac{F_N * Sz^2 * 0,02}{T_{R0,1}}$$

$$\sigma = \varepsilon * E \quad (8-14)$$

$$F_{def} = \frac{(\alpha_{Hys i} * W_{elast}) + W_G}{\Delta x} \quad (8-15)$$

### 8.1.2 Adhäsionskomponente

Die Adhäsionskomponenten werden, wie bei SOLOVYEV angegeben, nach der Formel 2-25 berechnet. Für die Integration der Geometrie wird die geometrische Kenngröße der realen Kontaktfläche eingesetzt. Diese entspricht der Gesamtfläche, die aus der Inselanzahl und der projizierten Durchschnittsoberfläche besteht, welche auf die Probenkörpergröße hochgerechnet wird. Die Werte für  $\beta$  und  $\tau_0$  zur Berechnung der Scherfestigkeit  $\tau_S$  laut Formel 2-26 wurden im Projekt GECKO vom Teilprojekt 1 Professur für Konstruktionslehre experimentell für 42CroMo4 bestimmt (Tabelle 8-1). Der Kontaktdruck  $p$  ergibt sich statisch aus der Normalkraft über die Probenkörperfläche in drei verschiedenen Stufen, welche in den Reibwertprüfungen genutzt wurden (Tabelle 8-1). Jedoch wird der Kontaktdruck auf Basis der mathematisch idealen Oberfläche für einen Kreisring berechnet.

$$F_{Adh} = \tau_S * A_{Real} \quad (8-16)$$

$$\tau_S = \tau_0 + p * \beta \quad (8-17)$$

Tabelle 8-1: Adhäsionsparameter (Quelle: Abschlussbericht Aif Gecko (fvv\_14))

Parameter	Wert
$\beta$	0,16
$\tau_0$	3,5 MPa
$p$	30 MPa, 100 MPa, 300 MPa

Für die Adhäsionskomponente bewirkt die gegenseitige Verdrillung der beiden Körper eine Erhöhung aufgrund der Vergrößerung der Kontaktfläche. Weiterhin ist die Oberflächenvergrößerung winkelabhängig, so dass für die untersuchten Oberflächen der Reibwert bei  $0,1^\circ$  Verschiebung angegeben und dies mit dem Faktor  $f_{0,1}$  einberechnet wird (8-18). Jedoch konnte die Vergrößerung der Kontaktfläche nicht adäquat und hinreichend genau mit den zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethodiken ermittelt werden. Für die weiterführenden Berechnungen findet dieser Faktor erst einmal keine Verwendung.

$$F_{Adh} = \tau_S * A_{real} * f_{0,1} \quad (8-18)$$

Zur Berechnung der realen Kontaktfläche (8-22) dienen die geometrischen Parameter der Inselanzahl und der Durchschnittsoberfläche je Insel (8-21). Weiterhin müssen die Parameter von der kleinen Auswertfläche (3 mm x 3 mm) auf die Gesamtfläche mittels des Faktors  $f_A$  extrapoliert werden. Dabei ergibt sich eine Probenkörperoberfläche  $A_{PK}$  in Form eines Kreisringes, siehe Formel (8-20).

$$f_A = \frac{A_{PK}}{A_w} \quad (8-19)$$

$$A_{PK} = \frac{\pi}{4} * (D_A^2 - D_I^2) \quad (8-20)$$

Diese Extrapolation beinhaltet automatisch, dass eine Gleichverteilung angenommen wird und zunächst die gesamte Kreisringfläche mit dem Gegenkörper in Kontakt tritt. Durch die Faktoren für Form- und Lageabweichungen findet dennoch eine Korrektur statt, so dass kein Vollkontakt unterstellt wird. Abweichungen in der Form und der Lage von der idealen Oberfläche bedingen eine Reduzierung der Kontaktfläche. Daraus resultieren die Faktoren  $f_{1\text{□}}$  und  $f_{1\text{■}}$ , die mit der tatsächlichen Abweichung der Ebenheit  $E_{1\text{□}}$  und Rechtwinkligkeit  $E_{1\text{■}}$  in die Berechnung eingehen. Je nachdem, ob die Form oder die Lage bei dem Kontakt überwiegt, ist dieser Faktor zu verwenden. Unerlässlich sind auch die Abweichungen der Gegenfläche mit  $f_{2\text{□}}$  und  $f_{2\text{■}}$ , die geometrischen Abweichungen  $E_{2\text{□}}$  und  $E_{2\text{■}}$  sind ebenfalls zu berücksichtigen. Auf Basis des derzeitigen Forschungsstandes sind zu wenige Daten des Gegenkörpers und dessen Geometrie vorhanden, so dass vorerst diese Faktoren unberücksichtigt bleiben. Die Kontaktgeometrie  $f_K$  beschreibt, wie die beiden Oberflächen aufeinanderliegen. Derzeit können nur qualitative Aussagen dazu getroffen werden, jedoch ist  $f_K$  als Einflussfaktor der Vollständigkeit halber berücksichtigt. Unter der derzeitigen Annahme einer idealen Gegenfläche ist die Komponente der Kontaktgeometrie obsolet.

$$A_{Ges} = \text{Inselanzahl} * \text{Durchschnittsoberfläche} \quad (8-21)$$

$$A_{Real} = A_{Ges} \cdot f_A \cdot f_{1\text{□}} \cdot E_{1\text{□}} \cdot f_{1\text{■}} \cdot E_{1\text{■}} \cdot f_{2\text{□}} \cdot E_{2\text{□}} \cdot f_{2\text{■}} \cdot E_{2\text{■}} \cdot f_K \quad (8-22)$$

## 8.2 Haftreibwertberechnung mittels geometrischer Parameter

Die Haftreibwertberechnung erfolgte auf Grundlage der Messreihe A13 („Statistikserie“) aus 42CrMo4+QT (Werkstoffnummer 1.7225). Beispielhaft wird es an der Probe A13-01 gezeigt. Die geometrische Charakterisierung (Tabelle 8-2) bezieht sich auf die Oberfläche eines 3 mm x 3 mm Ausschnitts vor der Reibwertprüfung. Die vom Prüfstand ausgelesenen Daten sowie die werkstofftechnischen Daten (Anlage 22) sind in Tabelle 8-3 zusammengefasst. Alle Messwerte dieser Probe wurden in die aufgestellten Gleichungen aus Kapitel 8.1 eingesetzt.

### Geometrische Charakterisierung

Tabelle 8-2: Geometrische Charakterisierung von A13-01

KenngroÙe	Nennwert	Einheit
Inselanzahl n	15345	
Fläche je Insel A <sub>on</sub>	5116	µm <sup>2</sup>
Fläche je Insel A <sub>on</sub>	0,005116	mm <sup>2</sup>
Gesamte Fläche A <sub>Ges</sub>	0,301357275	mm <sup>2</sup>
Materialvolumen V <sub>Mat</sub>	1168	µm <sup>3</sup>
Materialvolumen der Inseln auf 9 µm <sup>2</sup>	17922960	µm <sup>3</sup>
Materialvolumen	0,01792296	mm <sup>3</sup>
Gesamtes Materialvolumen	1,05574949	mm <sup>3</sup>
Sz	5,6	µm
Sd	0,000269747	mm
A <sub>real</sub>	82,36	mm <sup>2</sup>
Ebenheit 1	0,006	mm
Rechtwinkligkeit 1	0,009	mm
Ebenheit 2	0,06	mm
Rechtwinkligkeit 2	0,011	mm

Tabelle 8-3: Prüfstanddaten zur Prüfung von A13-01

Kenngröße	Nennwert	Einheit
$F_N$	52,9	kN
$T_{R0,1}$	123	Nm
$\beta$	0,16	
$\tau_0$	3,5	MPa
$\varphi_{0,1}$	0,020362175	mm
E	207585	N/mm <sup>2</sup>
$\nu$	0,2	

### Deformationskomponente

Die Torsionsspannung ergibt sich mit 6553,40 N/mm<sup>2</sup>. Die Normalspannung beträgt 642,28 N/mm<sup>2</sup>. Daraus wird eine Vergleichsspannung mit 11368,98 N/mm<sup>2</sup> berechnet. Mit einem Schubmodul von 86493,75 N resultiert eine Gestaltänderungsenergie von 249,06 Nmm. Daraus erhält man mit einer elastischen Deformationsarbeit von 16,77 Nmm eine deformativ Reibkraft von 12283,48 N.

### Adhäsionskomponente

Mit einer Flächenpressung von 99,78 MPa und einer Scherfestigkeit von 19,46 MPa bei den experimentell ermittelten Parametern  $\beta$  und  $\tau_0$  wird eine Adhäsionskraft von 1603,23 N berechnet. Die reale Kontaktfläche ergibt sich mit 82,3628mm<sup>2</sup>.

### Errechneter Haftreibwert

Durch die Addition der deformativen und adhäsiven Reibwertkomponente und deren Teilung durch die Normalkraft ergibt sich der errechnete Haftreibwert  $\mu_{0,1}$  von 0,26. Im Vergleich zum experimentell ermittelten Reibwert von  $\mu_{0,1}$  von 0,2 ergibt sich ein Delta von 0,06. Im Vergleich dazu liegen die Schwankungen in der Messreihe A13 selbst zwischen dem höchsten Reibwert von 0,27 und dem niedrigsten Reibwert 0,16 bei einem Delta von 0,11. Die Standardabweichung  $\sigma$  beträgt dabei 0,027. Ein Delta von 0,06 ist daher als eine gering zu bezeichnende Abweichung einzustufen. Schlussfolgernd erweist sich die Vorgehensweise, die geometrischen Kenngrößen in die modifizierte Haftreibwertberechnung zu integrieren, als eine sehr gute Möglichkeit. Der theoretisch berechnete Haftreibwert ist sehr gut mit dem per zerstörender Haftreibwertprüfung ermittelten Wert vergleichbar.

Die Ergebnisse einer statistische Regressionsanalyse könnten hier eingebunden werden und zur Detaillierung des theoretisch berechneten Haftreibungswertes beitragen. Zur Validierung der Gleichungen wurden die entsprechenden Messwerte der verbleibenden 24 Proben der Messreihe A13 ebenfalls eingesetzt. Die Ergebnisse wiesen ein ähnliches Delta zwischen dem theoretisch und dem praktisch ermittelten Reibwert auf. Weiterhin führen die Annahmen der Faktoren (für Rechtwinkligkeit, Ebenheit etc.) zu einer anderen errechneten realen Kontaktfläche  $A_{\text{real}}$  und damit zu einem anderen theoretischen Reibwert. Zudem konnten mit den Analysen noch nicht die direkten Kontaktverhältnisse sowie deren Auswirkungen untersucht und in die Betrachtungen vollends einbezogen werden. Jedoch zeigt sich eine sehr gute Näherung des errechneten Haftreibungswertes zum versuchstechnisch ermittelten. Dennoch könnte der versuchstechnisch ermittelte Haftreibungswert in seiner Berechnung modifiziert werden. Der experimentell ermittelte Reibwert basiert auf der Annahme einer immer gleichbleibenden Kontaktfläche, die sich aus einer gesamten Kreisringfläche mit  $530,14 \text{ mm}^2$  ergibt. Die Versuche zeigten, dass diese Annahme hinfällig ist. Resultierend daraus würde sich die Differenz zwischen theoretischem und versuchstechnisch ermitteltem Reibwert weiterhin minimieren. Wünschenswert wäre eine statistische Regressionsanalyse für eine exakte Validierung und Schließung der noch bestehenden Lücken beziehungsweise für die Ergänzung offener Fragestellungen hinsichtlich der Einflusshöhe einzelner Komponenten.

## 9 Ergebnisdiskussion und Zusammenfassung

Bereits aus den eigenen Voruntersuchungen war bekannt, dass sich aufgrund der Komplexität der Oberflächen die Standard-2D- und 3D-Oberflächenparameter zur Haftreibwertbeschreibung wahrscheinlich nicht eignen. Jedoch wurden bei allen Untersuchungen die gängigen 2D- und 3D-Parameter ermittelt. Der Vorteil statistischer Parameter, hier die genormten 2D- und 3D-Oberflächenparameter, und deren Unempfindlichkeit gegenüber Ausreißern sind für eine Einschätzung, ob gleichgefertigte Oberflächen in den Spezifikationen liegen, hervorragend geeignet. Für eine Beurteilung der Funktion bei multivariaten Oberflächenstrukturierungen zeigte sich, dass die statistischen Größen merklich an ihre Grenzen stoßen. Einzelne Parameter verraten sehr wenig über die tatsächliche Oberfläche und eignen sich für einen komplexen funktionalen Zusammenhang nur schwer. Lokale Oberflächengegebenheiten und Strukturierungsvariationen resp. Strukturierungsrichtungen sowie die Interaktion im tribologischen/technischen System üben ihren funktionellen Einfluss aus und finden derzeit noch keine Berücksichtigung, obgleich sie von großer Bedeutung für das Kontaktverhältnis resp. die Kontaktfläche sind. Aus diesem Grund wurden neue Ansätze für ein Bezugssystem, das alle geometrischen Abweichungen enthält, und für eine Geometrie beschreibende Parameterdefinition, die den funktionalen Teil abbildet, verfolgt.

Die Idee eines gemeinsamen Bezuges anhand einer permanenten Markierung erwies sich nicht als zielführend. Die Vickerseindrücke boten die Möglichkeit, die Oberflächenstrukturen eindeutig zu identifizieren und die Veränderungen infolge der Reibwertprüfung für jede Struktur zu beobachten und auszuwerten. Die Bildung eines Bezugssystems zur Parameterdefinition anhand der Vickerseindrücke gestaltete sich schwierig. Die Eindrücke sind auf unterschiedlichen Proben mit gleicher Oberflächenbearbeitung nie in der gleichen Tiefe zu realisieren. Dadurch wird das Koordinatensystem auf jedem Probekörper anders definiert, wodurch eine eindeutige und vergleichbare Parameterdefinition nicht abgesichert ist. Jedoch gilt der Kerngedanke, alle geometrischen Abweichungen einer Oberfläche in einem Bezug zu erfassen und diese zu bewerten, für komplexe tribologische Systeme als zukunftsweisend. Hingegen dienen, wie bereits aufgeführt, die Vickerseindrücke dazu, die Oberflächenveränderung infolge der Momenteinwirkung zu quantifizieren. Oberflächenstrukturen und deren Veränderung konnten eindeutig und detailliert aufgezeigt herausgestellt werden. Deutlich zeigte sich, dass nur ein geringer Oberflächenanteil mit dem Gegenkörper in Kontakt tritt und für die Funktion verantwortlich ist.

In Kombination mit den Drückversuchen, die unter Aufbringung der drei verschiedenen Normalkräfte erfolgten, wurde ebenfalls herausgearbeitet, dass nur ein geringer Oberflächenanteil den Gegenkörper berührt. Bei zunehmender Normalkraft steigt folgerichtig auch die kontaktierende Oberfläche. Aufgrund der beschriebenen Untersuchungen erfolgte der Ansatz, dass ein geringer prozentualer Anteil der Oberfläche funktional charakterisiert werden sollte. Ein zu geringer prozentualer Anteil bereitet ebenfalls bei der Parameterdefinition Schwierigkeiten, da einzelne Oberflächenstrukturen deutlicher herausgestellt und bewertet werden. Diese sind jedoch nicht immer repräsentativ für die gesamte Oberfläche. Bei einer Oberflächencharakterisierung an einem anderem Oberflächenausschnitt unterscheiden sich die Parameter sehr stark und nicht unempfindlich gegenüber einzelnen Strukturen. Aus diesem Grund wurde von einem zu geringen prozentualen Anteil für die Charakterisierung abgesehen. Mithilfe der Materialanteilkurve und der Möglichkeit, die Oberfläche in Inseln bzw. Partikeln zu segmentieren, konnten geometrisch beschreibende Parameter definiert werden.

Die geometrische Kenngröße des Durchschnittmaterialvolumens kann Oberflächen in grob und fein strukturiert unterscheiden. Es lassen sich zudem die charakteristischen Merkmale der Fertigungsverfahren anhand der Inselanzahl und der Durchschnittsoberfläche nachweisen. Weiterhin ist es möglich, anhand dieser geometrischen Parameter eine Kontaktfläche zu berechnen. Einen direkten Zusammenhang zwischen einer einzelnen geometrischen Kenngröße und der Wirkung des Haftreibwertes nachzuweisen, war nicht möglich. Jedoch sind Tendenzen anhand der ermittelten Kontaktfläche sichtbar. Bei gleich strukturierten Oberflächen, welche auf drei Probekörpern mit verschiedenen Werkstoffen realisiert wurden, zeigte sich, dass die werkstofftechnischen Eigenschaften zwar einen Teil der Reibwerthöhe ausmachen, aber die Oberflächenstruktur ebenso dazu beiträgt. Insbesondere wird das deutlich bei den Aluminiumproben, wobei die fein gedrehten Strukturen einen höheren Reibwert als die grob gedrehten Oberflächen erzielen. Die Streubreite der Haftreibwerte ist bei Guss- und Aluminiumoberflächen geringer. Diese Haftreibwertstreuung lässt sich auf eine Kombination aus Form- und Lageabweichungen zurückführen. Bei Materialien mit einem geringen E-Modul werden diese Abweichungen deutlich besser ausgeglichen und die kontaktierenden Flächen können sich besser annähern. Bei der geometrischen Oberflächenbeschreibung zeigt sich eine geringe Streubreite der Parameter auf den unterschiedlichen Oberflächen, die mit gleichen Prozessparametern gefertigt wurden. Damit unterstreicht es die Wirksamkeit und Reliabilität der geometrischen Kenngrößen.

Ausgehend von dem Gedanken, dass größere Gestaltabweichungen sich entsprechend auf die reale Kontaktfläche auswirken, wurden Ebenheit, Rechtwinkligkeit und Konzentrität auf ihren Einfluss hinsichtlich des Haftreibungswertes untersucht. Erste Ergebnisse deuteten auf einen signifikanten Zusammenhang hin. Größere Rechtwinkligkeitsabweichungen hinterließen auf den Probekörpern deutlich sichtbare Abdrücke nach der Reibwertprüfung, welche auf eine geringe Auflagefläche beziehungsweise eine verkleinerte Kontaktfläche hinwiesen. Ebenso zeigten Ebenheitsabweichungen der Reibfläche, dass sie zu einer Reduzierung der Kontaktfläche führen. Die entsprechenden Reibkurven waren flacher und wiesen ein geringeres Torsionsmoment zu Beginn auf. Im Verlauf der Prüfung und mit Zunahme des Verdrehwinkels stieg das Torsionsmoment an. Dies kann auf eine Zunahme der Kontaktfläche unter Annäherung der beiden Flächen der Reibwertproben zurückzuführen sein. Durch das eingebrachte Moment und die vorherrschende Normalkraft werden die Ebenheits- und Rechtwinkligkeitsabweichungen gegeneinandergedrückt und bei der Verdrehung verschoben, so dass eine Zunahme der Kontaktfläche mit einer Zunahme des Torsionsmoments einhergeht.

Die Form der Ebenheitsabweichungen rückte ebenfalls in den Fokus der Betrachtungen. Dabei wurden diese in fünf Kategorien unterteilt und auf ihre Wirkung untersucht. Konkave und ebene Formen der Ebenheitsabweichungen wiesen dabei tendenziell einen höheren Reibwert auf als die Mischformen mit lokalen Materialanhäufungen. Diese Zusammenhänge konnten per statistischer Auswertung nicht untersetzt werden. Neben den Gestaltabweichungen eines Körpers sind auch die des anderen Funktionspartners (Reibpartners) und deren Zusammenwirken (Überlagerung oder Auslöschung) funktionsentscheidend. Zukünftig sollten diese näher sowie in einem größeren Umfang untersucht werden. Als möglicher Ansatz zur Interpretation aller Gestaltabweichungen wird eine Auswertung anhand eines gemeinsamen Bezugssystems gesehen, um die realen Kontakte und somit die an der Funktion beteiligten Oberflächenanteile bewerten zu können.

Die statistischen Untersuchungen zeigten, dass die Vielzahl der Einflussfaktoren keine eindeutigen, sondern eher schwache bis keine Korrelationen (wechselseitig) sowie Regressionen (gerichtet) aufzeigt. Dies kann auf den geringen Probenumfang zurückgeführt werden. Daher empfiehlt es sich für weitere Grundlagenforschungen hinsichtlich der Regression zwischen geometrischen Eigenschaften und dem resultierenden Haftreibungswert resp. der Funktion, die Komplexität zu reduzieren. Ein zielorientierter statistischer Versuchsplan ist die Basis für die detaillierte Erforschung der einzelnen Einflüsse. Die Anzahl der einzelnen Versuche sollte dabei auf einen Probenumfang von mindestens 100 Versuche je Einflussgröße erhöht werden.

Zudem ist die Kombination aus der geringen Messdatenbasis und der geringen Auflösung der Messdaten am Reibwertprüfstand z. B.: 123 Nm, dem sich daraus resultierenden Reibwert 0,26 sowie den geometrischen Abweichungen der Ebenheit von 0,005 mm (FLTt) als nicht vorteilhaft zu beurteilen. Eine höhere Auflösung der Daten würde unter Umständen zu einer besseren und eindeutigeren Klassifizierung der einzelnen Einflüsse führen. Damit wird der konkrete Zusammenhang für die Dimension einzelner Einflüsse und deren Wirkung auf den Haftreibwert unterstützt. Die Versuchskombinationen sind dann mit geeigneten statistischen Methoden z. B. Hauptkomponentenanalysen, Clusteranalysen, Korrelations- und Regressionsanalysen detaillierter zu analysieren und zu erforschen.

Durch die Integration der geometrischen Parameter in die Haftreibwertberechnung zeigt sich, dass eine gute Näherung an die realen Versuchsdaten erfolgt. Daher wird eine Aussage in Höhe des zu erreichenden Haftreibwerts mittels vorheriger Berechnung möglich. Das ist für die Bauteilauslegung anhand des tatsächlichen Haftreibwertes und der damit verbundenen möglichen Kraft- und Momentübertragung sinnvoll. Zudem würde bei einer entsprechend genaueren Anpassung eine zerstörende Reibwertprüfung, so wie sie aktuell erfolgt, hinfällig. Besonders bei sehr teuren Materialien und komplizierten Verbindungen ist hier eine deutliche monetäre und zeitliche Einsparung möglich. Zur Relativierung der per Prüfstand ermittelten Reibwerte sei gesagt, dass für die Berechnungsgrundlage eine konstante Fläche von ca. 530 mm<sup>2</sup> genutzt wird und dies nicht dem realen Fall entspricht. Die Kontaktfläche ist nicht konstant, sondern abhängig von den bereits erwähnten Ebenheits- und Rechtwinkligkeitsabweichungen, der Oberflächenstruktur und den wirkenden Normalkräften. Demzufolge müsste die Formel zur Haftreibwertberechnung um die geometrischen Parameter, wie in Kapitel 7 erfolgreich dargestellt, ergänzt werden. Die Faktoren für die Haftreibwertberechnung mittels geometrischer Parameter, insbesondere die Einbindung der Ebenheit und der Rechtwinkligkeit sowie die Einführung des Faktors des Kontaktverhältnisses, sollten in den Fokus der weiteren Analysen rücken. Insbesondere bietet sich eine fundierte Regressionsanalyse bei entsprechend großer Messdatenbasis an. Die Integration der geometrischen Oberflächeneigenschaften sowie der Kontaktverhältnisse (Form, Lage) in die mathematische Auslegung des Haftreibwertes erzielt die gewünschte Wirkung und erfüllt damit den Ansatz der funktionalen Charakterisierung.

Es wurde nachgewiesen, dass die geometrischen Parameter Einfluss auf das Funktionsverhalten nehmen und diese als solche in die bisherige Haftreibwertberechnung zu integrieren sind. Zudem kann dieser Ansatz auch auf andere Funktionen übertragen werden.

---

Für die Zukunft ist es vorstellbar, mit den Gleichungen ebenfalls die Toleranzen für Rechtwinkligkeit und Oberfläche bei gleichzeitiger Richtungsorientierung von Oberflächenstrukturen für einen einzustellenden oder anzustrebenden Haftreibwert festzulegen. Zudem lässt sich in Erwägung ziehen, diesen Ansatz, geometrische Parameter in die Funktion zu integrieren, im Entwicklungsprozess zu verifizieren. Letztlich bietet hier die dimensionelle und geometrische Spezifizierung im Designprozess mithilfe der neu entwickelten geometrischen Parameter eine Möglichkeit, neue Erkenntnisse zu integrieren und die Ressourcen effizient zu nutzen. Durch ein wohlüberlegtes Toleranzdesign werden Einsparpotenziale schon am Anfang des Produktlebenszyklus aufgezeigt. Weiterhin erhöht sich die Sicherheit bei der Bauteilauslegung, da die Dimensionen der gezielten Einflüsse bekannt und vorhersagbar sind.

Zusammenfassend liefert diese Arbeit einen wichtigen Beitrag zur Identifizierung und Quantifizierung der Einflussgrößen bei der Haftreibwertbestimmung. Dabei sind die neuen geometrisch beschreibenden Oberflächenparameter ein Schlüssel für den funktionalen Ansatz. Weiterhin beschreiben die geometrischen Parameter nicht, wie sonst üblich, die gesamte Oberflächentextur, sondern nur den funktional relevanten Anteil der Oberfläche. Diese Herangehensweise ist entscheidend für die Integration der Oberflächengeometrie sowie der Form- und Lageabweichungen in die bisherigen Berechnungen von Reibwerten bzw. dafür, diese generell bei konstruktiven Auslegungen (Toleranzdesign) zu berücksichtigen.

## 10 Ausblick

Die Auswertung der Forschungsergebnisse zeigt, dass eine allgemeingültige funktionsübergreifende Charakterisierung noch nicht möglich ist. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Einflussfaktoren, die auf die verschiedenen Funktionen, hier die reibschlüssige Verbindung, wirken und geometrisch nicht immer mit einem Parameter abgebildet werden können. Ein Beispiel hierfür sind, neben den Form- und Lageeinflüssen, die adhäsiven und deformativen Wechselwirkungen, welche die Haftreibwerthöhe wesentlich beeinflussen, sowie die im Zusammenspiel wirkende Gegenfläche mit deren Abweichungen. Die geometrische Charakterisierung zur Beschreibung des Funktionsverhaltens kann daher nur durch spezifizierte Versuche für eine eng definierte Anwendung aufgestellt werden. Dabei sind grundlegende Forschungen zu dem Gebiet der Form- und Lageeinflüsse sowie der Superposition zweier Oberflächen auf das funktionale Verhalten dringend notwendig.

Ebenfalls wurde deutlich, dass bei der ungünstigen Konstellation der Reibpartner eine Haftreibwertminderung die Folge ist. Ferner gilt es im Sinne des tribologischen Systems, den Gegenkörper und dessen Einfluss stärker zu untersuchen und zu quantifizieren. Dementsprechend wären verschieden strukturierte Grund- und Gegenkörper herzustellen und Untersuchungen zur Bestimmung der realen Kontaktfläche (Kontaktverhältnis) inklusive der wirkenden Adhäsions- und Deformationskräfte durch Nutzung von Zwischenmedien von Bedeutung. Eine detaillierte Analyse der Oberflächenzusammensetzung diene der Ergänzung der Untersuchung des Adhäsions- und Deformationsvermögens der Verbindung. Hierfür gilt eine gesamtheitliche Extraktion aller Gestaltabweichungen in einem Bezugssystem als wegweisend. Voraussetzung ist dabei die Entwicklung und Realisierung eines einheitlichen Bezugs.

Zukünftige Forschungen könnten die Lücke zwischen den geometrischen und werkstofflichen Eigenschaften für einen gesamtheitlich funktionalen-regressiven Ansatz zur Vorhersage des Funktionsverhaltens schließen. Nicht nur stehen dabei Reibwertmaximierung oder eine Minimierung der Hafteigenschaften im Fokus, sondern es können jegliche Funktionen mittels des ganzheitlichen Ansatzes beschrieben werden. Von maßgeblicher Bedeutung sind dabei die Quantifizierung der Einflüsse von Orts-, Richtungs- und Formabweichungen, der Oberflächenstrukturen sowie adhäsiver, deformativer und prüfbedingter Komponenten (Normalkraft, Werkstoff etc.) auf die Funktion.

---

## 11 Literaturverzeichnis

- [10360] DIN EN ISO 10360-1:2003-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1: Begriffe (ISO 10360-1:2000 + Corr 1:2002) (enthält Berichtigung AC:2002).
- [1101] DIN EN ISO 1101:2017-09: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101:2017).
- [12085] DIN EN ISO 12085: 1998/05: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Motifkenngrößen (ISO 12085:1996).
- [12180] DIN EN ISO 12180:2011-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Zylindrizität - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Zylinderform (ISO 12180-1:2011)
- [12181-1] DIN EN ISO 12181-1:2011-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Rundheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Rundheit (ISO 12181-1:2011).
- [12780] DIN EN ISO 12780-1:2014-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geradheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Geradheit (ISO 12780-1:2011).
- [12781-1] DIN EN ISO 12181-1:2011-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Rundheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Rundheit (ISO 12181-1:2011).
- [1302] DIN EN ISO 1302:2002-06: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation (ISO 1302:2002).
- [1319] DIN 1319-1:1995-01: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe.
- [13565] DIN EN ISO 13565-1:1998-04: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 1: Filterung und allgemeine Meßbedingungen (ISO 13565-1:1996).
- [14406] DIN EN ISO 14406:2011-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Erfassung (ISO 14406:2010).

- 
- [16610-1]** DIN EN ISO 16610-1:2015-11: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte (ISO 16610-1:2015).
- [16610-21]** DIN EN ISO 16610-21:2013-06: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-21:2011).
- [16610-28]** DIN EN ISO 16610-28:2017-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 28: Profilfilter: Endeffekte (ISO 16610-28:2016).
- [16610-40]** DIN EN ISO 16610-40:2016-12: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 40: Morphologische Profilfilter: Grundlegende Konzepte (ISO 16610-40:2015)
- [17450]** DIN EN ISO 17450-1:2012-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung (ISO 17450-1:2011)
- [21920-1]** ISO 21920-1:2021: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 1: Indication of surface texture
- [21920-2]** ISO 21920-2:2021-12: Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- [21920-3]** ISO 21920-3:2021: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 3: Specification operators
- [25178-2]** DIN EN ISO 25178-2:2012-09: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2:2012).
- [2617]** VDI/VDE 2617 Blatt 2.1:2014-03: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360-2 zur Messung von Längenmaßen.
- [2631]** VDI/VDE 2631 Blatt 1:2016-08: Formmesstechnik - Grundlagen
- [2768]** DIN ISO 2768-1:1991-06: Allgemeintoleranzen, Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragungen.
- [3274]** DIN EN ISO 3274:1998-04: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996).

- 
- [4287]** DIN EN ISO 4287:2010-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009).
- [4288]** DIN EN ISO 4288:1998-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4288:1996).
- [4760]** DIN 4760:1982-06: Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem.
- [5458]** DIN EN ISO 5458:2018-11: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Geometrische Tolerierung - Elementgruppen und kombinierte geometrische Spezifikation (ISO 5458:2018).
- [5459]** DIN EN ISO 5459:2013-05: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Bezüge und Bezugssysteme (ISO 5459:2011);
- [6507]** DIN EN ISO 6507-1:2018-07, Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6507-1:2018).
- [6892]** DIN EN ISO 6892-1:2020-06; Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2019.
- [98\_3]** ISO/IEC Guide 98-3:2008-09: Messunsicherheit - Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, 2008.
- [99]** ISO/IEC Guide 99:2007-12: Internationales Wörterbuch der Metrologie - Grundlegende und allgemeine Konzepte und zugehörige Begriffe (VIM),2007.
- [abo\_72]** Abou-Aly, M.: Die Bestimmung der wahren Berührungsfläche zweier rauher Oberflächen und der Änderung einiger ihrer statistischen Parameter in Abhängigkeit von der Belastung; Dissertation; Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1972.
- [adu\_07]** Adunka, F.: Messunsicherheiten; Theorie und Praxis; 3. Auflage; Essen: Vulkan-Verlag, 2007.

- [aif\_01]** AiF/DFG–Gemeinschaftsvorhaben „Gecko“; Rahmenantrag; Antragsteller: Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt/Main- Niederrad; Thema des Clusters: Gestaltung und Ermittlung charakterisierender Kennwerte von reibschlussoptimierten Oberflächen; Kennwort des Clusters: „Gecko“.
- [aif\_02]** AiF /DFG–Gemeinschaftsvorhaben „Gecko“; Teilprojekt II: Messtechnische Beschreibung der geometrischen Eigenschaften reibschlüssiger Oberflächen; DFG-Antrag; Antragssteller: Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt/Main- Niederrad; Thema des Clusters: Gestaltung und Ermittlung charakterisierender Kennwerte von reibschlussoptimierten Oberflächen; Thema des Teilprojekts: Messtechnische Beschreibung der geometrischen Eigenschaften reibschlüssiger Oberflächen; Kennwort des Clusters: „Gecko“.
- [amo\_99]** Amontons, G.: De la resistance causée dans les machines; Historie de l'Academie Royale a Berlin IV, S. 275-282, 1699.
- [arc\_57]** Archard, J. F.: Elastic deformation and the laws of friction. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 243, Issue 1233, S. 190-205, 1957.
- [arc\_61]** Archard, J. F.: Single Contacts and Multiple Encounters. Journal of Applied Physics 32, 1420-1425, 1961.
- [arn\_17]** Arnecke, P.: A measurement method for characterizing micro lead on ground shaft surfaces. Dissertation, Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik - Band 4, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig, TU Kaiserslautern, 2017.
- [ban\_04]** Bantel, M.: Messgeräte-Praxis; Funktion und Einsatz moderner Messgeräte. München/Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004.
- [bar\_10]** Bartz, W. J.: Einführung in die Tribologie und Schmierungstechnik: Tribologie – Schmierstoffe – Anwendungen. 1. Aufl. Renningen: expert-Verlag, 2010.
- [bat\_10]** Bartel, D.: Simulation von Tribosystemen, Grundlagen und Anwendungen, Habilitationsschrift 2009, Universität Magdeburg, Wiesbaden: Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH 2010.

- 
- [bau\_07]** Bauer, N.: Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung: Qualitätssicherung in der Praxis. 1. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007.
- [bau\_17]** Baumann, M.: Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenläufigen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenze. Dissertation, Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik, Bericht Nr. 168, Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Universität Stuttgart, 2017.
- [blu\_20]** Blunt, L.; Liu, Y.; Zhang, Z.; Smith, C.; Knight, D.; Gao, F.; Townsend, A.; Xiangqian, J.: An in-process, layer wise surface metrology system for a new E-Beam additive manufacturing machine. euspen's 20th International Conference & Exhibition, Geneva, CH, June 2020.
- [bod\_92]** Bodschwinn, H.: Oberflächenmeßtechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis. Berlin: Beuth Verlag, 1992.
- [bos\_15]** Robert Bosch GmbH: Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe, Technische Statistik, Heft 8 – Messunsicherheit, 2. Ausgabe 06.2015, vollständig überarbeitete Neuauflage.
- [bos\_94]** Bosse, H.: Aspekte der Filterung in der Formmesstechnik; PTB-Bericht, Abteilung Fertigungsmeßtechnik, Bericht F, Band 13, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, Braunschweig: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für Neue Wissenschaft 1994.
- [bow\_59]** Bowden, F. P., Tabor, D.: Reibung und Schmierung fester Körper, Deutsche durchgearbeitete Übersetzung der zweiten Auflage von E.H. Freitag, Berlin/Göttingen/ Heidelberg: Springer Verlag 1959.
- [bow\_64]** Bowden, F. P.; Tabor, D.: The Friction and Lubrication of Solids. Part. 2; Oxford: Clarendon Press, 1964.
- [bri\_12]** Brinkmann, B: Internationales Wörterbuch der Metrologie, Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) – Deutsch-englische Fassung, ISO/IEC-Leitfaden 99:2007; 4., überarbeitete Auflage; Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und Beuth Verlag, 2012

- 
- [bro\_06]** Brown, C. A.; Childs, B. E.; Bergstrom, T. S.: Experimental Methods Using Scale-Sensitive, Geometric Analysis of Surface Textures for Tribology, STLE/ASME 2006 International Joint Tribology Conference, p. 1183-1184, San Antonio, Texas, USA, October 23–25, 2006.
- [bru\_97]** Brune, D.: Surface characterization; a user's sourcebook. Oslo: Scandinavian Science Publishing, 1997; Weinheim/Berlin: Wiley-VCH, 1997.
- [che\_02]** Chebakov, M.: The three-dimensional contact problems for the surface layer under friction forces in an unknown contact area; Doklady Physics volume 47, pages 238–240, 2002.
- [cou\_57]** Courtney-Pratt, J.S. and Eisner, E., The effect of a tangential force on the contact of metallic bodies, Proceedings Royal Society, Ser. A, vol. 238, pp. 529–550, 1957.
- [cou\_85]** Coulomb, C. A.: Théorie des machines simples; Mémoires de Mathématique et de Physique de l'Académie Royale, S. 161-342, 1785.
- [dzi\_10]** Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch: Reibung und Verschleiß. 3., überarbeitete und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien, 2010.
- [des\_25]** Desaguliers, J. T.: Some experiments concerning the cohesion of lead; Philosophical Transactions of the Royal Society London Vol. 33, S. 345ff., 1725.
- [die\_12]** Dietzsch, M.; Gröger, S.: XIV. Internationales Oberflächenkolloquium, 1. Treffen „Industry meets standardization and science“-IMSAS; Tagungsband, Technische Universität Chemnitz vom 12.03.2012 – 14.03.2012, Chemnitz; Universitätsverlag Chemnitz 2012.
- [die\_17]** Dietrich, E.; Schulze, A: Eignungsnachweis von Prüfprozessen, Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld; 5., überarbeitete Auflage; München: Hanser-Verlag, 2017.
- [dig\_20]** DigitalSurf: MountainsMap Reference Guide, Version 8.2, 2020.
- [dow\_98]** Dowson, D.: History of Tribology. London and Bury St. Edmunds: Professional Engineering Publishing, 1998.

- 
- [eif\_161]** Eifler, M; Schneider, F.; Seewig, J.; Kirsch, B.; Aurich, J.C.: Manufacturing of new roughness standards for the linearity of the vertical axis – Feasibility study and optimization; Engineering Science and Technology an International Journal 19 (4), 2016.
- [eif\_162]** Eifler, M: Modellbasierte Entwicklung von Kalibriernormalen zur geometrischen Produktspezifikation; Dissertation; Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, Band 3; Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, 2016.
- [eif\_19]** Eifler, M: Tendenzen und Herausforderungen in der geometrischen Produktspezifikation am Beispiel der Rauheitsmesstechnik, Berichte aus dem Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, Band 9, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig, Technische Universität Kaiserslautern, 2019.
- [fal\_13]** Fallqvist, M.; Schultheiss, F.; M'Saoubi, R.; Olsson, M.; Ståhl, J.-E: Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting: Part I experimental observations of contact conditions. Wear, Volumes 298–299, Pages 87-98, 2013.
- [fra\_13]** Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, actsmartware GmbH.: Funktionale Laser-Mikrostrukturierung zur Verschleiß- und Verbrauchsreduktion an hochbeanspruchten Bauteiloberflächen: Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes Smartsurf, Apprimus Verlag, 2013.
- [fvv\_14]** Gestaltung und Ermittlung charakterisierender Kennwerte von reibschlussoptimierten Oberflächen, Projektleiter Industrie Dr.-Ing. Christoph Haberling, AUDI AG, Ingolstadt, Arbeitskreis GECKO (FVV), GECKO Forschungsreport 2014 Abschlussbericht, 11.12.2014
- [ger\_08]** Gerlach, M.: Erfassungsstrategie zur Ermittlung des Paarungsmaßes an zylindrischen Oberflächen für die mechanische Antastung; Dissertation, TU Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Chemnitz 2008.
- [gev\_06]** Gevatter, H.-J.; Grünhaupt, U.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion. 2. Aufl. Berlin/ Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [gne\_07]** Gnecco, E.: Fundamentals of friction and wear; with 13 tables. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2007.

- [grä\_15]** Gräfensteiner, M.: Analyse und Synthese charakterisierender Kennwerte zur funktionsgerechten Gestaltung von Wirkflächenpaaren in reibschlüssigen Verbindungen, Abschlussbericht, Abschlussbericht des FVV-Forschungsvorhabens IGF-Nr. 17229 BR/1, Frankfurt, FVV Heft Nr. 1077, 2015.
- [gra\_87]** Graf, Henning, Stange, Wilrich: Formel und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik; 3., völlig neu bearbeitete Auflage von P.-Th. Wilrich und H.-J. Henning, Springer -Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Paris, Tokyo 1987.
- [gre\_66]** Greenwood, J.A.; Williamson, J.B.P.: Contact of nominally flat surfaces. Pro. Royal Society Serie A, Vol. 295, Nr. 1442, S.300, 1966.
- [gre\_70]** Greenwood, J.A.; Tripp, J.H.: The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol.185, p. 625-634, 1970.
- [gro\_09]** Grote, K.-H.; Antonsson, E. K.: Springer Handbook of Mechanical Engineering, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [grö\_17]** Gröger, S.; Weißgerber, M.: XIV. Internationales Oberflächenkolloquium, Tagungsband, Technische Universität Chemnitz vom 30.01.2017 – 01.02.2017, Chemnitz; Universitätsverlag Chemnitz 2017.
- [gro\_21]** Groß, K.; Matthias Eifler, M.; Klauer, K.; Huttenlochner, K.; Kirsch, B.; Ziegler, C.; Aurich, J. C.; Seewig, J.: Determination of the surface topography of ball end micro milled material measures. Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 24, Page 543-555. 2021.
- [grz\_15]** Grzesik, W.; Rech, J.; Żak, K.: Characterization of surface textures generated on hardened steel parts in high-precision machining operations. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 78, pages2049–2056, 2015.
- [gum\_10]** Metrodata GmbH: GUM Workbench, Benutzerhandbuch für Versionen 1.3, 2.3 und 2.4; Weil am Rhein: Metrodata GmbH 2010.
- [har\_97]** Hart, H; Lotze, W; Woschni, E.-G.: Messgenauigkeit; 3., verbesserte und aktualisierte Auflage; München: Oldenburg Verlag, 1997.
- [hat\_97]** Hartmann, T.: Analyse der MOTIF-Methode zur Beschreibung von Rauheit und Welligkeit technischer Oberflächen; Dissertation; Technische Universität Chemnitz; Chemnitz 1997.

- [her\_00]** Hernla, M.: Anwendung von Filtern bei der Auswertung gemessener Oberflächenprofile; Application of Filters in the Evaluation of Measured Surface Profiles. Technisches Messen 67 (2000) 3, S. 128-135, München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH 2005
- [her\_14]** Hernla, M.: Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen, Abschätzung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit mit Hilfe von Berechnungstabellen; 2. Aktualisierte und erweiterte Auflage, Renningen: expert Verlag 2014.
- [her\_82]** Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte, Sitzungsberichte des Vereins zur Förderung des Gewerbefleißes, S. 449-463, Berlin, 1882.
- [her\_95]** Hertz, H.: Gesammelte Werke. Band 1, S. 755, Leipzig, 1895.
- [hof\_07]** Hoffman, J.: Handbuch der Messtechnik. 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [hol\_46]** Holm, R.: Elastische Kontakte. Stockholm: H Grebers 1946.
- [hor\_63]** Hormuth, K.: Härtetabellen: Tabellen zur Bestimmung der Brinell-, Vickers- und Rockwellhärte für Wissenschaften und Praxis. Leipzig: VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1963.
- [ind\_16]** Autorenkollektiv: Industrielle Fertigung; Fertigungsverfahren, Mess- und Prüftechnik, 7. überarbeitete Auflage, Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 2016.
- [jia\_12]** Jiang, X. J.; Whitehouse, D. J.: Technological shifts in surface metrology. CIRP Annals, Volume 61, Issue 2, Pages 815-836, 2012.
- [joh\_71]** Johnson, K.L., Kendall, K.; Roberts, A. D.: Surface energy ant the contact of elastic solids, Proceedings Royal Society London A. 324, S. 301-313, 1971.
- [joh\_85]** Johnson, K. L.: Contact mechanics. Cambridge: University Press, 1985.
- [kef\_15]** Keferstein, C. P., Marxer, M.: Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 8., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2015.
- [kei\_17]** Keil, S.: Dehnungsmessstreifen; 2., neu bearbeitete Auflage; Heidelberg: Springer Vieweg Verlag 2017.

- [kir\_07]** Kirchner, E.: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben - Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten; Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg Verlag 2007.
- [köh\_05]** Köhler, M.: Beitrag zur Bestimmung des Coulomb'schen Haftreibungskoeffizienten zwischen zwei metallischen Festkörpern; Dissertation; Göttingen: Cuviller Verlag, 2005.
- [koh\_98]** Koch, A. W.; Ruprecht, M.W.; Toedter, O.; Häusler, G.: Optische Messtechnik an technischen Oberflächen: Praxisorientierte lasergestützte Verfahren zur Untersuchung technischer Objekte hinsichtlich Form, Oberflächenstruktur und Beschichtung. 1. Aufl. Renningen-Mallmheim: expert-Verlag, 1998.
- [kra\_60]** Kragelski, V.; Demkin, N. B.: Contact Area of Rough Surfaces. Wear, 3 (1960) S. 170-187, 1960.
- [kra\_80]** Krause, H.; Poll, G.: Mechanik der Festkörperreibung; VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1980.
- [kra\_82]** Kragelski, V.; Dobyčín, M. N.; Kombatov, V. S.: Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß; Berlin: VEB-Verlag, 1982
- [kre\_02]** Kreißg, R.; Benedix, U.: Höhere technische Mechanik, Lehr- und Übungsbuch; Wien: Springer-Verlag, 2002.
- [kry\_15]** Krystek, M.: Berechnung der Messunsicherheit; Grundlagen und Anleitung für die praktische Anwendung; 2., erweiterte Auflage; Berlin; Wien; Zürich; Beuth Verlag, 2015.
- [kry\_97]** Krystek, M.: Verschiedene, in Diskussion befindliche Filterverfahren zur Formmessung. DIN-Tagung Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS), Erlangen 1997.
- [kus\_16]** Kusnezowa, T.: Möglichkeiten und Herausforderungen bei der taktilen 2D Rauheitsmessung auf Konturen. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern 2016.
- [lei\_12]** Leidich, E.; Vidner, J.; Gräfensteiner, M.: „Endlich vergleichbare Werte -Standardisiertes Prüfverfahren für Reibungszahlen“, Antriebstechnik, 1-2/2012.
- [lei\_14]** Leidich, E.; Gräfensteiner, M.: Gestaltung und Ermittlung charakterisierender Kennwerte von reibschlussoptimierten Oberflächen, FVV-Gesamtabschlussbericht, FKM-Nr.: Frankfurt a. M., 2014.

- 
- [lem\_92]** Lemke, E.: Fertigungsmesstechnik. 2. Aufl. Braunschweig/ Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1992.
- [leo\_05]** León, F. P.; Beyerer, J.: Oberflächencharakterisierung durch morphologische Filterung. *Technisches Messen* 72 (2005) 12, S. 663-670, München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH 2005
- [mat\_11]** Mathia, T. G.; Pawlus, P.; Wieczorowski, M.: Recent trends in surface metrology, The 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, *Wear*, Volume 271, Issues 3–4, 3 June 2011, p. 494-508, 2011.
- [min\_20]** Minitab Statistik Software, Hilfe/Benutzerhandbuch/Support by Minitab 20 ©, Minitab Inc. 2020.
- [mol\_09]** Molitor, M; Machado, N. C.; Szyminski, S.; Wengler, S.: Messtechnik: ingenieurstechnische Grundlagen: Berichte aus dem Institut für Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung Magdeburg. Band 17, Aachen: Shaker Verlag, 2009.
- [moo\_51]** Moore, A.J.W.; Tegart, W. J.: Relation between friction and hardness; *Proceedings of the Royal Society, London, Series A*, 212 (1952), S. 452-458.
- [muh\_07]** Muhs, D.; Wittel, H.; Jannasch, D.; Voßiek, J.: Roloff/ Matek Maschinenelemente: Normung Berechnung Gestaltung. 18., vollständig überarbeitete Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- [mur\_04]** Muralikrishnan, R.; Raja, J.: Process diagnostics and functional correlation in surface metrology: novel techniques, case studies and analysis system development. *Measurement*, Volume 36, Issue 2, Pages 175-183, 2004.
- [nit\_83]** Nietzsche, G.: Beiträge zur Bestimmung geometrischer Abweichungen an Oberflächenprofilen, Dissertation, Fakultät für Maschineningenieurwesen, Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt; Chemnitz 1983.
- [pan\_01]** Panin, V.; Kolubaev, A. V.; Tarasov, S.; Popov, V.: Subsurface layer formation during sliding friction. *Wear* Band 249, S. 860-867, 2001.
- [par\_08]** Parthier, R.: Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure. 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2008.

- [pau\_13]** Pausch, M.: Untersuchung des Einflusses von definiert gefertigten Mikrostrukturen auf Schmierfilmbildung und Kontaktpressung in hoch belasteten Wälzkontakten; Dissertation erschienen in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr.417; Düsseldorf: VDI Verlag, 2013.
- [pes\_03]** Persch, B.: Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM, Grundlagen der Metrologie; Norderstedt: Books on Demand 2003.
- [pfe\_01]** Pfeiffer, T.: Fertigungsmesstechnik. 2. Aufl. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2001.
- [pfe\_93]** Pfeifer, T. u.a.: Optoelektronische Verfahren zur Messung geometrischer Größen in der Fertigung: Grundlagen, Verfahren, Anwendungsbeispiele. 1. Aufl. Ehningen: expert-Verlag, 1993.
- [ple\_10]** Pleul, R.: Funktionsorientierte Beschreibung und Herstellung technischer Oberflächen am Beispiel von EDT (Electrical Discharge Texturing) Oberflächenstrukturen; Dissertation; Freiberg: Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2010.
- [pop\_09]** Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung, Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation; Berlin: Springer Verlag, 2009.
- [qda\_11]** Stockhaus, F.: Vergrößerung der beobachteten Prozessstreuung durch einen Prüfprozess mit größeren Messabweichungen, Folie FMT 4.1.4a aus dem Foliensatz zur Messsystemanalyse mit Solara, Stand: 28.10.2011, Eigentum der Q-DAS GmbH.
- [qda\_19]** Conrad, S; Pfeilsticker, T.: Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM und Praxisübungen mit solara.MP®, Foliensatz 029-FMT, Stand: 13.08.2019, Eigentum der Q-DAS GmbH.
- [qda\_20]** Pleul, R.: Messung technischer Oberflächen mit Tastschnittgeräten; Modul FMT 7.3; Stand: 08.10.2019, Eigentum der Q-DAS GmbH
- [qda\_22]** Effenberger, G.: Form- und Lagetoleranzen, Grundlagen; Modul FMT 6.11; Stand: 24.10.2022, Eigentum der Q-DAS GmbH
- [rad\_00]** Råde, L.; Westergren, B.: Springers Mathematische Formeln; Taschenbuch für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Informatiker, Wirtschaftswissenschaftler. Dritte, durchgesehene Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2000.

- 
- [rah\_09]** Rahlves, M; Seewig, J.: Optisches Messen technischer Oberflächen: Messprinzipien und Begriffe. 1. Aufl. Berlin/ Wien/ Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [reb\_14]** Rebeggiani, S; Rosén, B-G: Quantitative evaluation of the surface finish of high gloss polished tool steels, Surface Topography: Metrology and Properties 2, 2014.
- [red\_02]** Redlich, A. C.: Simulation von Punktkontakten unter Mischreibungsbedingungen, Dissertation; Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2002.
- [roi\_08]** Roithmeier, R.: Messstrategien in der taktilen Koordinatenmesstechnik. 2. Aufl. Aalen: Opferkuch GmbH Verlag, 2008.
- [ros\_11]** Rosén, B-G; Garnier, J.: Uncertainties and optimized sampling in surface roughness characterization, The 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Wear, Volume 271, Issues 3–4, 3 June 2011, p. 610-615, 2011.
- [sac\_09]** Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik, Methodensammlung mit R, 13. Aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer -Verlag, Berlin, Heidelberg 2009. S.398 Formel (7.30.)
- [san\_93]** Sander, M: Oberflächenmesstechnik für Praktiker. 2. Aufl. Göttingen: Feinprüf Perthen GmbH, 1993.
- [sch\_12]** Schiefer, S.: Ermittlung und Bewertung einer Erfassungsstrategie zur Beschreibung geometrischer Eigenschaften reibschlüssiger Oberflächen; Diplomarbeit, TU Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Chemnitz 2012.
- [sch\_13]** Schiefer, S.; Gerlach, M.; Gröger, S: Marking System: the key to repeatable measurements and the basis of a functional surface characterization. In: ISMTII 2013, 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Metrology - Master Global Challenges, July 1st - July 5th, 2013, RWTH, Aachen, Germany, S. 305-306. ISBN 978-3-86359-138-0, Aachen, 2013.

- [sch\_14]** Schiefer, S.; Gerlach, M.; Gröger, S.; Gräfensteiner, M.; Leidich, E.: THE TACTILE TOPOGRAPHY MEASUREMENT OF FUNCTIONAL ENGINEERING SURFACES AND THE OPPORTUNITIES OF A 3D CHARACTERISATION; Zeszyty Naukowe w Bielsku-Białej Budowa i Eksploatacja Maszyn. Konferencje. Poland. 2014
- [sch\_15]** Schiefer, S., Gerlach, M., Gräfensteiner, M., Leidich, E.: Ganzheitlicher Ansatz zur Beschreibung von Oberflächengeometrien und deren Einfluss auf das Reibwertverhalten von gleichgepaarten Stahloberflächen. Gesellschaft für Tribologie e.v. Tribologie-Fachtagung 2014 mit internationaler Beteiligung Reibung, Schmierung und Verschleiß Forschung und praktische Anwendungen 22. bis 24. September 2014 in Göttingen GfT Gesellschaft für Tribologie e.v., Göttingen, 2014.
- [sch\_10]** Schuller, S.: Haftreibwerte: Ermittlung von Haftreibungszahlen und Reibungscharakteristiken sowie deren Einflussparametern auf Basis eines neuen Standardprüfverfahrens, Abschlussbericht, Heft 906 – 2010, Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.
- [sct\_13]** Schultheiss, F.; Fallqvist, M.; M'Saoubi, R.; Olsson, M.; Ståhl, J.-E: Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting: Part II Theoretical calculations of contact conditions. Wear, Volumes 298–299, Pages 23-31, 2013.
- [scp\_13]** Schuppenhauer, F. M.: Bewertung der Einflussfaktoren für den Prozess der Haftreibwertbestimmung; Studienarbeit; TU Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Chemnitz 2014.
- [scp\_14]** Schuppenhauer, F. M.: Untersuchung von Form- und Lageabweichungen auf das funktionale Verhalten von technischen Oberflächen; Bachelorarbeit; TU Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Chemnitz 2014.
- [sch\_17]** Schuth, M.; Buerakov, W.: Handbuch Optische Messtechnik; Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung. München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- [sed\_09]** Sedlaček, M.; Podgornik, B.; Vižintin, J.: Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear, Wear Vol. 266, Page 482–487, 2009.

- [see\_00]** Seewig, J.: Praxisgerechte Signalverarbeitung zur Trennung der Gestaltabweichungen technischer Oberflächen. Dissertation, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier, Berichte aus dem Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover, Hannover: Shaker Verlag, 2000.
- [see\_05]** Seewig, J.: Linear and robust Gaussian regression filters. In: Journal of Physics: Conference Series. Hrsg. Von editor. Bd. 13. 2005.
- [see\_09]** Seewig, J.; Hercke, T.: Lead characterisation by an objective evaluation method. Wear 266, Page 530–533, 2009.
- [sen\_13]** Senin, N.; Blunt, L. A.; Leach, R. K.; Pini, S.: Morphologic segmentation algorithms for extracting individual surface features from areal surface topography maps. Surface Topography Metrology and Properties 1, 2013.
- [sha\_03]** Shakhvorostov, D.A.; Pöhlmann, K.; Scherge, M.: Zum Einlaufverhalten geschmierter metallischer Kontakte. In: Tribologie-Fachtagung Vortragsband. Göttingen: GfT, 2003.
- [sie\_96]** Siegmann, S.; Brown, C. A.: Investigations on the substrate surface morphology for thermal sprayed coatings, 17th International SAMPE Europe Conference: Success of Materials by Combination, p. 149 – 158, Basel, Swiss, 1996.
- [smi\_02]** Smith, G. T.: Industrial metrology; surfaces and roundness. London: Springer Verlag, 2002.
- [sol\_07]** Solovyev, S.: Reibungs- und Temperaturberechnung an Festkörper- und Mischreibungskontakten, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, erschienen: Fortschritte der Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie, Hrsg: Bartel, D.; Grote, K.-H.; Magdeburg 2007
- [som\_10]** Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.: Verschleiß metallischer Werkstoffe: Erscheinungsformen sicher beurteilen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2010.
- [sou\_14]** Sousa, F. J. P.; Seewig, J.; Chiamulera, C.; Alarcon, O. E.; Weingärtner, W. L.: CHARACTERIZATION OF THE TOOL WEAR DUE TO THE POLISHING OF CERAMIC TILES UNDER DUCTILE REGIME USING MORPHOLOGICAL SPACE, 21° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, MT, Brasil, 09.-13.11.2014.

- 
- [sta\_05]** Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W.: Engineering Tribology. 3. Aufl. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann Verlag, 2005.
- [sta\_98]** Staeves, J.: Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung, Dissertationsschrift an der TU Darmstadt, 1998.
- [sto\_93]** Stout: Development of Methods for Characterisation of Roughness in Three Dimensions, 1st Edition 1993.
- [tab\_19]** Autorenkollektiv: Tabellenbuch Metall, 48. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 2019.
- [tab\_51]** Tabor, D.: The hardness of metals, London: Oxford University Press, 1951.
- [täu\_87]** Täubert, P.: Abschätzung der Genauigkeit von Messergebnissen; 2. Bearbeitete Auflage; Berlin: VEB-Verlag 1987.
- [tom\_29]** Tomlinson, I.: Eine Molekulartheorie der Reibung. Phil. Mag. Vol. 7 S. 905-939, 1929.
- [tow\_16]** Townsend, A.; Senin, N.; L. Blunt, B.; Leach, R. K.; Taylo, J. S.: Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. Precision Engineering Volume 46, Pages 34-47, 2016.
- [tuc\_14]** Gerlach, M., Schiefer, S.: Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung, Vorlesung im WS 2014/2015, Technische Universität Chemnitz, 2014.
- [vid\_09]** Vidner, J.; Schuller, S.; Leidich, E: „Ermittlung und Interpretation von Reibmomenten und Haftreibungswerten bei Stirnflächenkontakt metallischer Paarungen“, 50. Tribologie Fachtagung, 2009, Göttingen.
- [vol\_05]** Volk, R.: Rauheitsmessung: Theorie und Praxis. 1. Aufl. Berlin: Beuth Verlag, 2005.
- [vos\_11]** Voss, R.: Toleranzanalyse komplexer Gussbauteile mittels stochastischer Simulation der Fertigungseinflüsse. Dissertation, Technischen Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2011.
- [wal\_15]** Walton, K.; Blunt, L.; Fleming, L.: The topographic development and areal parametric characterization of a stratified surface polished by mass finishing, IOP Publishing, Surface Topography: Metrology and Properties, Volume 3, 2015.

- 
- [wec\_99]** Weckenmann, A.: Koordinatenmesstechnik: Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen. 2., vollständig überarbeitete Auflage, München/ Wien: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [wei\_10]** Weichert, N.; Wülker, M.: Messtechnik und Messdatenerfassung. 2. Aufl. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2010.
- [wei\_89]** Weingraber, H.v.; Abou-Aly, M.: Handbuch Technische Oberflächen, Typologie, Messungen und Gebrauchsverhalten; 1. Auflage; Braunschweig: Vieweg-Verlag, 1989
- [whi\_03]** Whitehouse, D. J.: Handbook of surface and nanometrology, Bristol: Institute of Physics Publishing, 2003.
- [wie\_11]** Wiehr, C.; Seewig, J.: 3D-Kenngrößen nach ISO 25178, in Alexander Wanner (Hg.): Fortschritte in der Metallographie. Vortragstexte der 45. Metallographie-Tagung, 14.-16. September 2011 in Karlsruhe, S. 3-8, Frankfurt am Main: MAT-INFO, Werkstoff-Informationsges. 2011.
- [win\_06]** Winkler, J.; Aurich, H.: Taschenbuch der Technischen Mechanik; 8., neu bearbeitete Edition, München Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. 2006.
- [wos\_81]** Woschni, E.-G.: Informationstechnik, 2. Auflage, Berlin: VEB Verlag Technik 1981.
- [xia\_11]** Xiao, S.; Blunt, L.: The use of surface segmentation methods to characterise laser zone surface structure on hard disc drives, The 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Wear, Volume 271, Issues 3–4, 3 June 2011, p. 604–609, 2011.

**Webseiten:**

[hbm\_20] <https://www.hbm.com/de/7163/die-wheatstonesche-brueckenschaltung-kurz-erklart/> (am 02.10.2020 letztmalig aufgerufen)

[hbm\_21] <https://www.hbm.com/de/6181/messunsicherheit-bei-dms-messungen-abschuetzen-und-mglichst-gering-halten/> (am 21.04.2021 letztmalig aufgerufen)

**Verwendete Vorlagen:**

**Titelblatt** angelehnt an:

[mv.uni-kl.de/fileadmin/mv/Studium\\_Lehre/Promotion\\_Habilitation/Deckblatt\\_Dissertation\\_01.pdf](https://www.uni-kl.de/fileadmin/mv/Studium_Lehre/Promotion_Habilitation/Deckblatt_Dissertation_01.pdf) (am 07.11.2022 letztmalig aufgerufen)

**Selbstständigkeitserklärung** angelehnt an die Promotionsordnung, siehe:

[https://www.mv.uni-kl.de/fileadmin/mv/Studium\\_Lehre/Promotion\\_Habilitation/Promotionsordnung\\_MV.pdf](https://www.mv.uni-kl.de/fileadmin/mv/Studium_Lehre/Promotion_Habilitation/Promotionsordnung_MV.pdf) (am 07.11.2022 letztmalig aufgerufen)

## 12 Abbildungsverzeichnis

<i>Bild 1-1</i>	<i>System von Funktion - Bauteilgeometrie - Fertigung</i> .....	2
<i>Bild 2-1</i>	<i>Gestaltabweichungen nach DIN 4760:1982</i> .....	4
<i>Bild 2-2</i>	<i>Mechanische Filterung und Aliasing- Signal</i> .....	5
<i>Bild 2-3</i>	<i>Schematischer Aufbau eines Bezugsflächentastsystems</i> .....	8
<i>Bild 2-4</i>	<i>Hochpassfilterung von Sinuswellen (<math>\lambda c=0,8</math> mm)</i> .....	10
<i>Bild 2-5</i>	<i>Verzerrung der Mittellinie</i> .....	10
<i>Bild 2-6</i>	<i>Darstellung von Minkowski-Addition (links) und Minkowski-Subtraktion (rechts)</i> . 11	
<i>Bild 2-7</i>	<i>Morphologische Filterung anhand einer Tastspitzenkorrektur</i> .....	12
<i>Bild 2-8</i>	<i>Toleranzen für geometrische Eigenschaften</i> .....	12
<i>Bild 2-9</i>	<i>Rp, Rv, Rz</i> .....	14
<i>Bild 2-10</i>	<i>Ra – arithmetischer Mittenrauwert an der Einzelmessstrecke lr</i> .....	14
<i>Bild 2-11</i>	<i>Visualisierung von Ra, Rz und dem resultierenden Haftreibwert</i> .....	15
<i>Bild 2-12</i>	<i>Darstellung der Oberflächenfilter</i> .....	16
<i>Bild 2-13</i>	<i>Parameter an der Materialanteilkurve</i> .....	17
<i>Bild 2-14</i>	<i>Partikel- beziehungsweise Inselanalyse</i> .....	18
<i>Bild 2-15</i>	<i>Charakterisierung mechanisch gefertigter Oberflächen</i> .....	20
<i>Bild 2-16</i>	<i>Messunsicherheitseinflüsse und deren Eintrag in die verschiedenen Beurteilungsmethoden</i> .....	25
<i>Bild 2-17</i>	<i>Komponenten des tribologischen Systems</i> .....	27
<i>Bild 2-18</i>	<i>HERTZsche Kontakttheorie</i> .....	31
<i>Bild 2-19</i>	<i>Ausbildung des adhäsiven Kontaktgebietes (JKR-Theorie)</i> .....	31
<i>Bild 2-20</i>	<i>Aufbau des Torsionsreibwertprüfstandes</i> .....	35
<i>Bild 2-21</i>	<i>Berechnung des Haftreibwertes</i> .....	36
<i>Bild 3-1</i>	<i>Ursache-Wirkungs-Diagramm: Einflussfaktoren auf den Haftreibwert</i> .....	39

<i>Bild 3-2</i>	<i>Strukturbaum des Haftreibwertprüfprozesses.....</i>	<i>41</i>
<i>Bild 3-3</i>	<i>Zusammenhang zwischen beobachteter und tatsächlicher Prozessstreuung in Abhängigkeit vom Prüfprozess .....</i>	<i>43</i>
<i>Bild 4-1</i>	<i>Konzept zur geometrisch funktionalen Beschreibung .....</i>	<i>50</i>
<i>Bild 4-2</i>	<i>Theorie der Bezugsbildung .....</i>	<i>51</i>
<i>Bild 4-3</i>	<i>Schwellwertsegmentation.....</i>	<i>52</i>
<i>Bild 4-4</i>	<i>Geometrische Charakterisierung.....</i>	<i>53</i>
<i>Bild 4-5</i>	<i>Erfassungsstrategie .....</i>	<i>54</i>
<i>Bild 4-6</i>	<i>Versuchsmethodik zu den Drückversuchen.....</i>	<i>55</i>
<i>Bild 4-7</i>	<i>Musterdiagramm zur Ermittlung des Verdrehwinkel-abhängigen Haftreibwertes</i>	<i>56</i>
<i>Bild 4-8</i>	<i>Werkstoffvariation der Probekörper .....</i>	<i>56</i>
<i>Bild 5-1</i>	<i>Schwellwert bei 20 % des Materialanteils.....</i>	<i>58</i>
<i>Bild 5-2</i>	<i>Geometrische Charakterisierung bei einem Oberflächenausschnitt von 3 mm x 3 mm.....</i>	<i>59</i>
<i>Bild 5-3</i>	<i>Ursache-Wirkungs-Diagramm des Charakterisierungsprozesses.....</i>	<i>60</i>
<i>Bild 6-1</i>	<i>Wahrscheinlichkeitsnetz des Torsionsmoments <math>T_{R0,1}</math> .....</i>	<i>64</i>
<i>Bild 6-2</i>	<i>Grubbs-Test für die projizierte Durchschnittsoberfläche einer Insel (Aon) .....</i>	<i>65</i>
<i>Bild 6-3</i>	<i>Boxplot der projizierten Durchschnittsoberfläche einer Insel (Aon).....</i>	<i>66</i>
<i>Bild 6-4</i>	<i>Korrelationsanalyse der transformierten Normalkraft mit dem Torsionsmoment .</i>	<i>68</i>
<i>Bild 6-5</i>	<i>Matrixplot: Torsionsmoment <math>T_{R0,1}</math> - Temperatur - rel. Luftfeuchte (Messreihe 1) .</i>	<i>69</i>
<i>Bild 6-6</i>	<i>Wheatstonesche Brückenschaltung bei einer Torsionsmessung [hbm_20] .....</i>	<i>70</i>
<i>Bild 6-7</i>	<i>Korrelationsanalyse der gesamten Messreihe: Temperatur zu Torsionsmoment</i>	<i>70</i>
<i>Bild 6-8</i>	<i>Korrelationsanalyse: transformierte relative Luftfeuchte – Torsionsmoment.....</i>	<i>71</i>
<i>Bild 6-9</i>	<i>Ebenheitsabweichungen fein gedrehter Stahlproben inklusive Haftreibwert.....</i>	<i>72</i>
<i>Bild 6-10</i>	<i>Variationsmöglichkeiten theoretischer Ebenheitsabweichungen bei gleichbleibenden, ebenen Gegenkörpern .....</i>	<i>73</i>

Bild 6-11	Korrelationsanalyse: Ebenheit vor RWP – Torsionsmoment.....	73
Bild 6-12	3D-Streudiagramm: Torsionsmoment-Ebenheit-Ebenheitsform.....	74
Bild 6-13	3D-Streudiagramm: Torsionsmoment-Quotient ER-Ebenheitsform .....	75
Bild 6-14	Korrelationsanalyse: transformierte Konzentrität innen – Torsionsmoment.....	76
Bild 6-15	Korrelationsanalyse: Konzentrität außen – Torsionsmoment .....	76
Bild 6-16	Korrelationsanalyse: Verhältnis des Reibdurchmessers zu vermindertem Reibdurchmesser in %.....	77
Bild 6-17	Korrelationsanalyse: Rechtwinkligkeit (mit Form) vor der RW .....	78
Bild 6-18	Korrelationsanalyse: Delta Rechtwinkligkeit (ohne Form) – Torsionsmoment.....	79
Bild 6-19	Superposition der geometrischen Abweichungen und Oberflächenversagen .....	80
Bild 6-20	grob zirkulargefräste, grob gedrehte und grob geschliffene Oberflächen auf Vergütungsstahl (42CrMo4+QT) v. I. ....	80
Bild 6-21	Pyramidenstruktur (links), Gegenkörper nach Druckversuch bei 15,9 kN .....	81
Bild 6-22	Reibwertkurven mit unversetzter (PN 07, PN 17, PN 19) und um 90° versetzter Struktur (PN12, PN 14, PN 18) aus den Prüfberichten des Teilprojektes I .....	82
Bild 6-23	Grob gedrehte Strukturen auf Grauguss (EN-GJS-400), Vergütungsstahl (42CrMo4+QT) und Aluminium (EN AW-6082T6) .....	83
Bild 6-24	3D-Streudiagramm grob gedrehte Oberflächen ( $\mu_{0,1} \cdot A_{Ges} \cdot V_{Mat}$ ).....	85
Bild 6-25	3D-Streudiagramm fein gedrehte Oberflächen ( $\mu_{0,1} \cdot A_{Ges} \cdot V_{Mat}$ ) .....	85
Bild 6-26	Erfassung der geschliffenen Oberfläche mit AFM, PGK und MFU 100 (v.l.) .....	86
Bild 6-27	Prozentuale Veränderung der Inselanzahl durch Punktreduzierung .....	87
Bild 7-1	Relativbewegung der beiden Reibpartner anhand der Oberflächenstruktur.....	91
Bild 7-2	Lastfälle/Krafteinleitungen während des Funktionsfalles (Reibwertprüfung) .....	91

---

## 13 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2-1: Auswahl an Höhenparametern nach DIN EN ISO 25178-2 .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabelle 2-2: Parameter an der flächenhaften Materialanteilkurve lt. DIN EN ISO 25178-2...</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 3-1: Ergebnis des paarweisen Vergleichs für den Haftreibwertprüfprozess .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabelle 3-2: Werte aus der Statistikserie.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabelle 4-1: Oberflächentexturen.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabelle 5-1: Ergebnis des paarweisen Vergleichs.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 6-1: Algorithmus der Johnson-Transformation.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabelle 6-2: Ergebnisse der Oberflächenveränderung aus den Konturanalysen.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabelle 6-3: Mittelwerte des Haftreibwertes für die verschiedenen Oberflächenstrukturen...</i>	<i>82</i>
<i>Tabelle 6-4: Geometrische Charakterisierung der grob gedrehten Oberflächen.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabelle 6-5: Übersicht: verwendete Messgeräte mit technischen Spezifikationen.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabelle 7-1: Adhäsionsparameter .....</i>	<i>94</i>
<i>Tabelle 7-2: Geometrische Charakterisierung von A13-01 .....</i>	<i>96</i>
<i>Tabelle 7-3: Prüfstanddaten zur Prüfung von A13-01.....</i>	<i>97</i>

## 14 Anlagen

**Anlage 1:** Einteilung der Flächen- und Elementparameter nach DIN EN ISO 25178-2

Höhenparameter	Räumliche Parameter	Hybridparameter	Funktionen und damit zusammenhängende Parameter	Fraktal-Methoden	Mischparameter	Elementparameter
Sq	Sal	Sdq	Smr(c)	Svs(c)	Std	Spd
Ssk	Str	Sdr	Smc (mr)	Srel(c)		Spc
Sku			Sk	Svfc		S10z
Sp			Svk	Safc		S5p
Sv			Spk	fSRC		S5v
Sz			Smr1	Th		Sda(c)
Sa			Smr2			Sha(c)
			Svq			Sdv(c)
			Spq			Shv(c)
			Smq			
			Vv(p)			
			Vvv			
			Vvc			
			Vm(p)			
			Vmp			
			Vmc			
			Sxp			
			$\alpha$			

**Anlage 2: Handlungsempfehlung GUM (Vorgehensweise)****1. Bestimmung der Eingangsgrößen  $X_i$** 

$$Y = f(X_1, X_2, X_3 \dots)$$

**2. Mathematische Formulierung des Modells und der Untermodelle**

Additive Modell für lineare Größen:

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots$$

Multiplikatives Modell:

$$y = a \cdot X_1^p \cdot X_2^p \cdot X_3^p \dots$$

**3. Ermittlung der Standardmessunsicherheiten  $u(x_i)$  der Eingangsgrößen  $X_i$ :**

Methode A:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

z.B.: als Schätzwerte einer Beobachtung für die Streuung um den Mittelwert

Den besten Schätzwert für die Streuung des Mittelwertes liefert:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}$$

Methode B:

$$u = \frac{U}{k}$$

z.B.: Herstellerangaben oder Ergebnisse aus dem Kalibrierschein

$$u = a \cdot b$$

z.B.: Herstellerangabe als  $\pm a$ - Intervall

b-Verteilungsfaktor siehe Anlage 3 mit A-Priori-Verteilung

**4. Empfindlichkeitskoeffizienten  $c_i$  berechnen**

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$$

**5. Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit:**

- für unkorrelierte Eingangsgrößen

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u(x_i))^2}$$

- für korrelierte Eingangsgrößen unter Berücksichtigung von Kovarianzen

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \dots}$$

$$\dots + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \dots$$

$$\dots \cdot r(x_i, x_j)$$

Mit dem Korrelationskoeffizient  $r_{ij}$

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) \cdot u(x_j)}$$

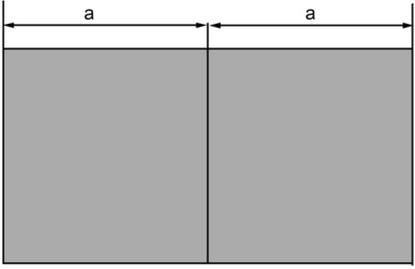
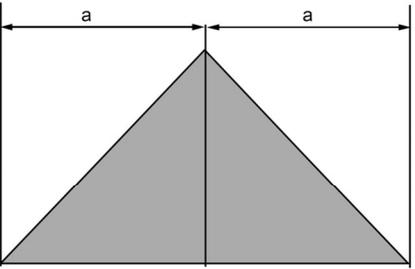
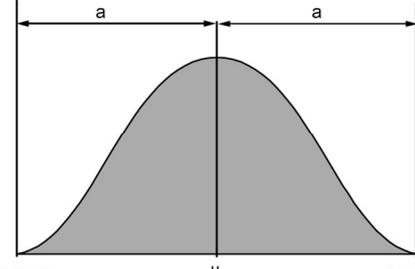
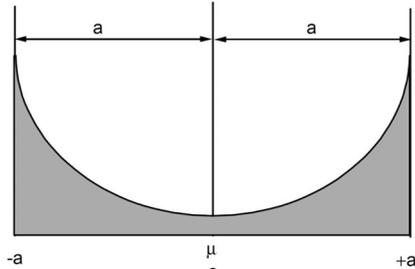
**6. Erweiterte Messunsicherheit  $U$** 

$$U = k \cdot u_c$$

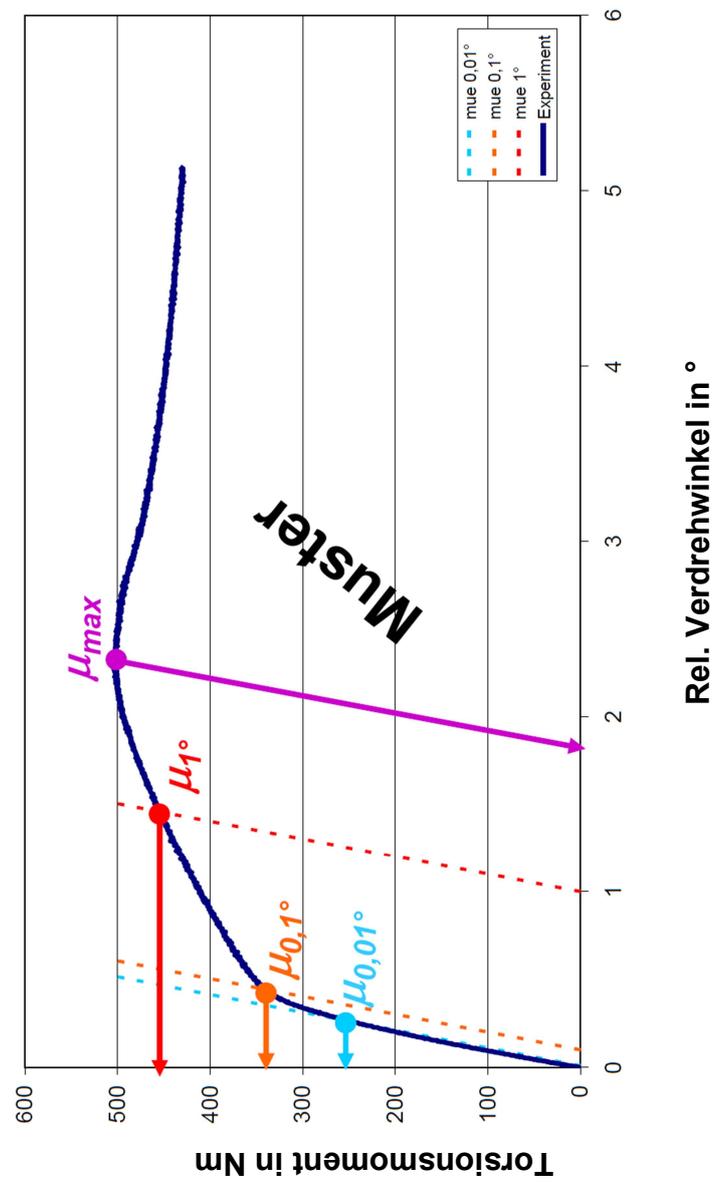
**7. Vollständiges Messergebnis  $Y$** 

$$Y = y \pm U$$

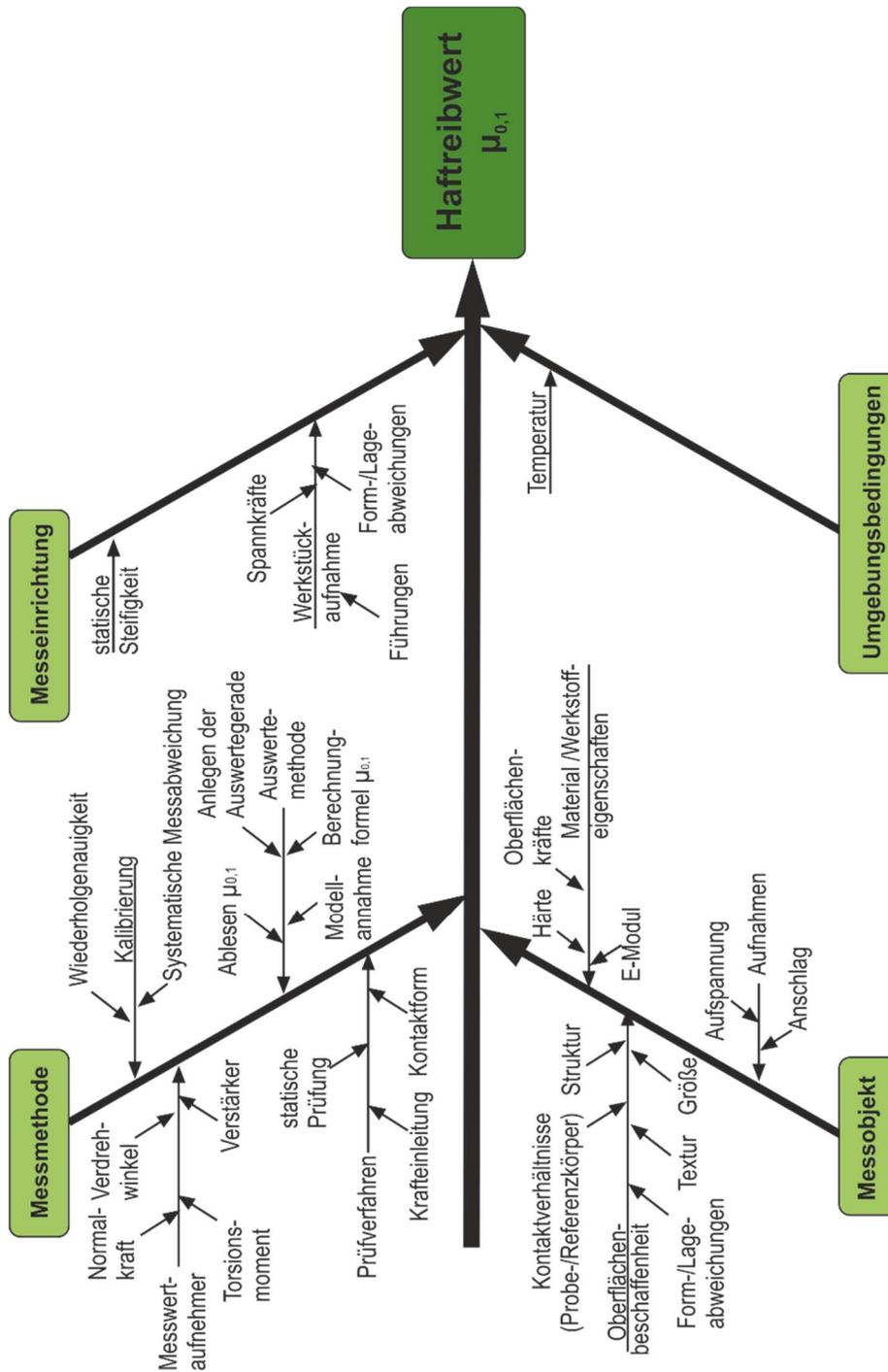
## Anlage 3: Verteilungsmodelle

Verteilungstyp	Verteilungsdichte	Standardunsicherheit u
Rechteckverteilung	$\sigma^2 = \frac{a^2}{3}$  <p> <math>a_- = \mu - a</math>  <math>a_+ = \mu + a</math>  <math>a_- = -a</math>  <math>a_+ = +a</math> </p>	$u(x)_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \approx 0,58a$ $a_- \leq \text{Schätzwert} \leq a_+$ Vertrauensniveau 100% <b>b = 0,58</b>
Dreieckverteilung	$\sigma^2 = \frac{a^2}{6}$  <p> <math>a_- = -a</math>  <math>a_+ = +a</math>  <math>\mu = 0</math> </p>	$u(x)_B = \frac{a}{\sqrt{6}} \approx 0,41a$ $a_- \leq \text{Schätzwert} \leq a_+$ Vertrauensniveau 100% <b>b = 0,41</b>
Normalverteilung	$\sigma^2 = \frac{a^2}{9}$  <p> <math>a_- = \mu - a</math>  <math>a_+ = \mu + a</math>  <math>a_- = -a</math>  <math>a_+ = +a</math>  <math>\mu = 0</math> </p>	$u(x)_B = \frac{a}{3} \approx 0,33a$ $P = 99,73\%$ <b>b = 0,333</b> $a_- < \text{Schätzwert} \leq a_+$
		$u(x)_B = \frac{a}{2} \approx 0,50a$ $P = 95,45\%$ <b>b = 0,5</b> $a_- < \text{Schätzwert} \leq a_+$
U - Verteilung	 <p> <math>a_- = -a</math>  <math>a_+ = +a</math>  <math>\mu = 0</math> </p>	$u(x)_B \approx 0,71a$ Vertrauensniveau 100% $-a < \text{Schätzwert} < +a$ <b>b = 0,71</b>

## Anlage 4: Graphischer Bewertungsansatz des Haftreibwertes



Anlage 5: Reduzierte Einflussfaktoren auf den Haftreibwert



Anlage 6: Paarweiser Vergleich der haftreibwertrelevanten Einflussfaktoren

Qualitätskriterien Zielgrößen Einflussgrößen Kundenwünsche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	relatives Gewicht	Gewicht (beliebiger ganz- zahliger Wertebereich)	
	Temperatur	Form und Lageabweichungen OF	Struktur der Oberfläche	Kontaktverhältnisse	Härte	E-Modul	Auswertemethode	Krafteinleitung	Kalibrierung der MWA	Form und Lageabweichen des PF	Messwertaufnehmer (MWA)	Kontraktiver Aufbau PF						
1 Temperatur	-	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0				5	12	0,23
2 Form und Lageabweichungen OF	2	-	1	2	2	1	2	2	1	1	0	0				14	1	0,64
3 Struktur der Oberfläche	1	1	-	2	1	1	2	2	2	1	1	0				14	1	0,64
4 Kontaktverhältnisse	2	0	0	-	1	1	1	2	2	2	1	1				13	5	0,59
5 Härte	1	0	1	1	-	1	0	1	1	1	1	1				9	9	0,41
6 E-Modul	2	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1				12	7	0,55
7 Auswertemethode	2	0	0	1	2	1	-	2	2	1	1	2				14	1	0,64
8 Krafteinleitung	1	0	0	0	1	1	0	-	2	0	0	1				6	11	0,27
9 Kalibrierung der MWA	1	1	0	0	1	1	0	0	-	1	1	1				7	10	0,32
10 Form und Lageabweichen des PF	1	1	1	0	1	1	1	2	1	-	1	2				12	7	0,55
11 Messwertaufnehmer (MWA)	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	-	1				14	1	0,64
12 Kontraktiver Aufbau PF	2	2	2	1	1	1	0	2	1	0	1	-				13	5	0,59
13													-					
14														-				
15															-			

Wertebereich des Gewichts (Ganzzahlig)

Untergrenze=	1
Obergrenze=	10

Obergrenze entspricht dem

- theoretischen Maximalwert von Summe
- berechneten Maximalwert von Summe

Wichtungsfaktoren:

- 0 Dominanz der Spalte gegenüber der Zeile
- 1 Gleichrangigkeit von Zeile und Spalte
- 2 Dominanz der Zeile gegenüber der Spalte

## Anlage 7: Konstruktions-FMEA des Reibwertprüfstandes

Vorgehen der FMEA:

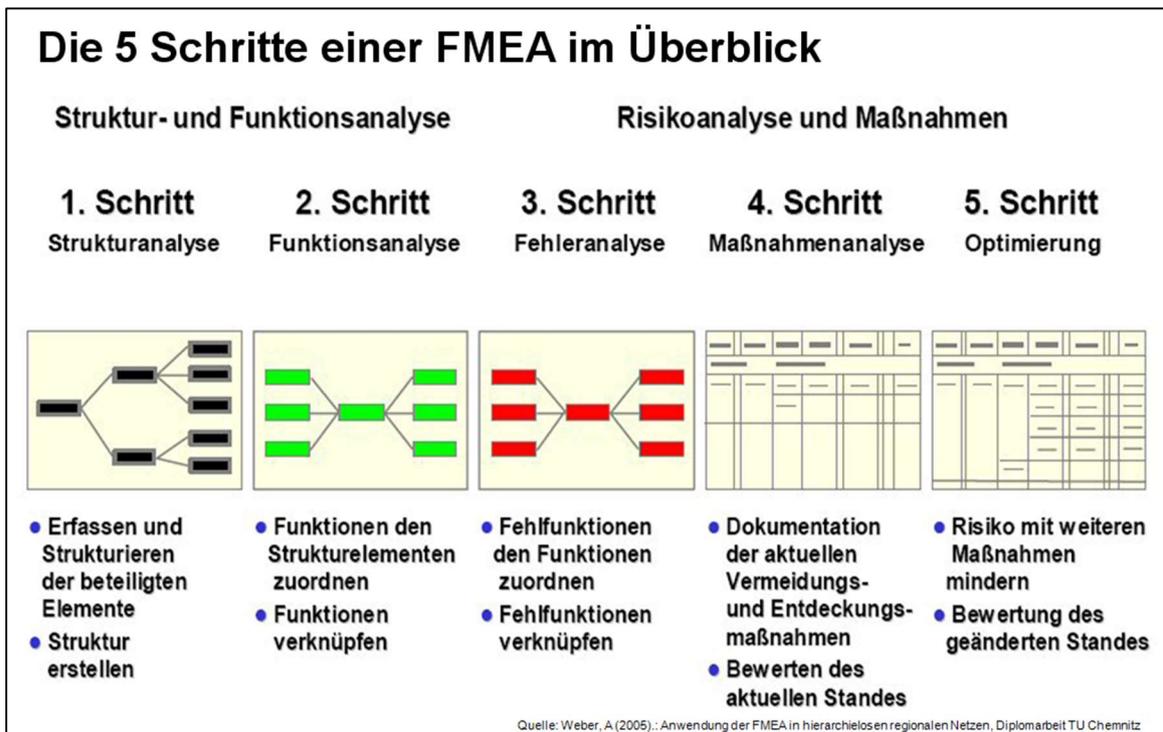


Abbildung 1: Vorgehen FMEA allgemein

Ergebnisse:

In der ersten FMEA-Sitzung wurden die Schritte 1 und 2 durchgeführt.

In der nächsten Sitzung werden dann die Schritte 3 bis 5 durchgeführt.

Legende:	Grün:	Baugruppen
	Gelb:	Funktionen
	Rosa:	Fehlfunktionen (noch nicht vollständig bearbeitet)
	Weis:	Zusatzinformationen
	Rotes K:	kritisch



Pinwand 1: Oberste Baugruppe (Prüfstand), Basisgestell



Pinwand 2: Drehzylinder, Hydraulikzylinder



Pinwand 3: Einspannung hydraulisch

Zusammengefasste Fehlfunktionen und deren Auswirkung auf den Messprozess:

<b>Fehlfunktionen/ kritische Bauteile</b>	<b>Ausschluss der Fehlfunktion</b>	<b>Berücksichtigung in der Messunsicherheit</b>
Torsionsmoment $T_R$ nicht erzeugen	keine Messung möglich	
Torsionsmoment $T_R$ nicht übertragen	keine Messung möglich	x
Torsionsmoment $T_R$ nicht aufnehmen	Durchrutschen - Fehlmessung	
Vorspannkraft $F_N$ nicht aufbringen	keine Messung möglich	x
Vorspannkraft $F_N$ nicht einleiten	keine Messung möglich	
Vorspannkraft $F_N$ nicht übertragen	Durchrutschen - Fehlmessung	
Vorspannkraft $F_N$ nicht messen	keine Messung möglich	
Kraftführung nicht kontern	Konstruktiv angepasst und abgesichert	
Keine Axialkraft	Durchrutschen - Fehlmessung	
Messwelle nicht mit Drehzylinder verbinden	keine Messung möglich	
Einfluss der Krafrichtung	Konstruktiv angepasst und abgesichert	
Drehmoment nicht messen und nicht übertragen	keine Messung möglich	
Probekörper nicht aufnehmen	keine Messung möglich	
Reaktionsmomente nicht ableiten	Konstruktiv angepasst und abgesichert	
Spannelemente nicht aufnehmen	Durchrutschen - Fehlmessung	
Keine Abstandsmessung (Verdrehwinkel-Messung)	keine Messung möglich	
Kalotte (K)		x
Druckstempel (K)		x
Messplatte (K)	→ Verdrehwinkelberechnung	x
Torsionshalter oben (K)	Durchrutschen - Fehlmessung	
Torsionsgegenhalter (K)	Durchrutschen - Fehlmessung	
Hydraulische Spannbuchse (K)	Durchrutschen - Fehlmessung	

**Anlage 8:** Berechnungen zur Messunsicherheit des Haftreibwerts  $\mu_{0,1}$ **Versatzberechnung**

$$D_{R Temp} = |D_R - D_{R\Delta T}|$$

$$D_{R\Delta T} = \frac{2}{3} \frac{(D_{A Temp}^3 - D_{I Temp}^3)}{(D_{A Temp}^2 - D_{I Temp}^2)}$$

$$D_{A Temp} = D_A * (1 + \alpha \Delta K)$$

$$D_{I Temp} = D_I * (1 - \alpha \Delta K)$$

Da es zu einer elliptischen Form kommt, wird der „Worst-Case“-Fall angenommen, welcher zu einer Verkleinerung der Fläche führt. Damit wird für  $D_A$  und  $D_I$  folgende Formeln angesetzt.

$$D_{A Versatz} = D_A - x$$

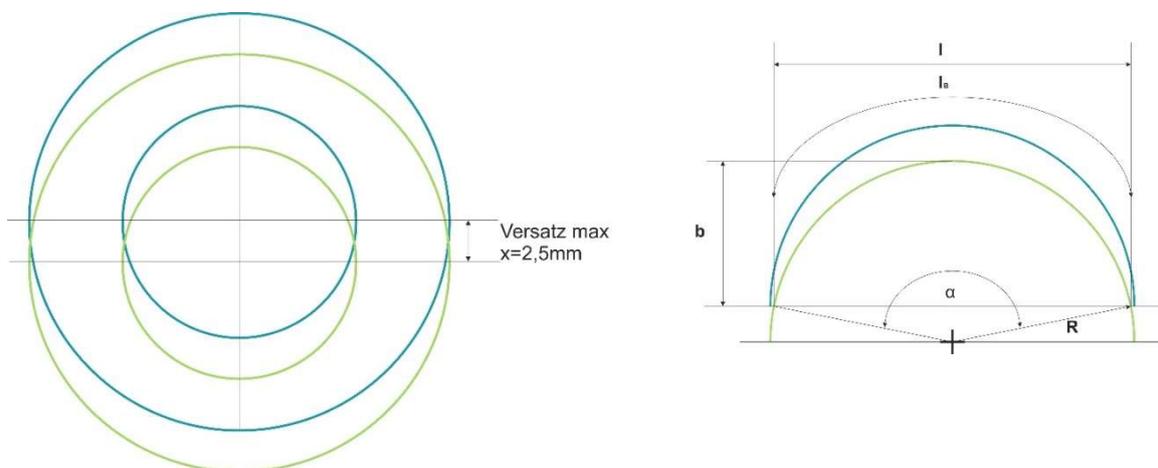
$$D_{I Versatz} = D_I + x$$

$$D_{R Versatz} = \frac{2}{3} \frac{(D_{A Versatz}^3 - D_{I Versatz}^3)}{(D_{A Versatz}^2 - D_{I Versatz}^2)}$$

Für den Einfluss auf das Torsionsmoment wird der Unterschied der zugrunde gelegten Flächen genutzt, welcher sich durch den Versatz verkleinert.

$$u_{A Versatz} = 1 - \frac{A_{Versatz}}{A}$$

$$A_{Versatz} = A_{Versatz \text{ außen}} - A_{Versatz \text{ innen}}$$



In Anlehnung an die oben gezeigte Darstellung und der mathematischen Grundlage der Berechnung für Kreisabschnitte sind die nachfolgenden Berechnungen für die Flächen aufgestellt worden:

$$A_{\text{Versatz außen}} = \left( \frac{l_b * R_A - l_A * (R_A - b_A)}{2} \right) * 2$$

$$A_{\text{Versatz Innen}} = \left( \frac{\pi}{4} D_I^2 - \left( \frac{l_b * R_A - l_A * (R_A - b_A)}{2} \right) \right) * 2$$

### Unsicherheitsbeitrag der Dehnmessstreifen

Für die Berechnung des Unsicherheitsbeitrages der Dehnmessstreifen wurden die technischen Datenblätter des Hersteller HBM und deren Vorgehensweise sowie Ansätze zur Berechnung des Messunsicherheit genutzt und erweitert, siehe [hbm\_20; hbm-21].

$$u_{DMS} = \sqrt{(u_{E-Modul})^2 + (u_{Winkel})^2 + (u_{Eigenerwärmung})^2 + (u_{Messkraftverstärker})^2 + \dots}$$

$$\sqrt{\dots + (u_{k-Faktor})^2 + (u_{Querempfindlichkeit})^2 + (u_{mechanische Hysterese})^2}$$

### Methodendefinition der Einflussgrößen

Kenngröße	Methode	Zusatzinformationen zur Datenbasis
$u_{Da}$	Methode A	Schätzung nach maximal zulässiger Toleranz von 0,1 mm
$u_{Di}$	Methode A	Schätzung nach maximal zulässiger Toleranz von 0,1 mm
$u_{DRAT}$	Methode A	Schätzung auf Basis von Messungen bei 10 K Temperaturschwankung und dem Längenausdehnungskoeffizienten von 42CrMo4+QT
$u_{RV}$	Methode A	Schätzung auf Basis des maximalen Versatzes
$u_{RAV}$	Methode A	Schätzung auf Basis des maximalen Versatzes
$u_{\varphi L}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{\varphi A}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{\varphi G}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{AwTR S}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{SwTR}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{DMS}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{RTW}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{ATW}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{VTR0,1}$	Methode A	Schätzung auf Basis eines Vergleiches von regulär ausgewerteten Reibwerten und einer per Softwarealgorithmus ausgewerteten Reibwerten
$u_{AwFN}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{UFN}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{AFN}$	Methode A	Schätzung auf Basis eines Vergleiches von regulär ausgewerteten Reibwerten und einer per Softwarealgorithmus ausgewerteten Reibwerten
$u_{UKMD}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{SKMD}$	Methode B	Kalibrierschein
$u_{\alpha}$	Methode A	Schätzung auf Basis der maximal möglichen Winkelstellung des Druckstempels auf die Kalotte

## Teilbilanzrechnungen

Festlegungen:

k bei 95%	2
$u(x) = a/\sqrt{3}$ bei Rechteckverteilung	0,577
$u(x) = a/3$ bei Normalverteilung	0,333
$a_n$ für kleine Stichproben $n = 3$	0,886
$a_n$ für kleine Stichproben $n = 25$	0,99
Eingabeparameter	Zahlenwert Einheit
$\alpha$ von 42CrMo4+QT	0,0000111 ( $10^{-6}/K$ )
$\Delta K$	10,000
Versatz	2,000 mm
Genauigkeit des Temperaturfühlers (+-0,3 in %)	0,006
Winkelabweichung	1,000 °
$F_N$	53,00 kN
$Tr_{0,1}$	135,00 Nm

### Teilbilanz $u_{(DR)}$ :

	$D_i$	15,000 mm
$u_{D_i}$	$\Delta D_i$ aus Toleranz technische Zeichnung	0,100 mm
	$(\partial D_m)/(\partial d_i)$	-0,370
	$(D_i (1-\alpha\Delta K))$	14,998
	$D_a$	30,000 mm
$u_{D_a}$	$\Delta D_a$ aus Toleranz technische Zeichnung	0,100 mm
	$(\partial D_m)/(\partial d_a)$	0,593
	$(D_a (1+\alpha\Delta K))$	30,003
	DR	23,333 mm
	$DR_{\Delta T}$	23,343
$u_{DR_{\Delta T}}$	Betrag DR- $DR_{\Delta T}$	0,010
	DR Versatz	22,948
$u_{DRV}$	Betrag DR-DR Versatz	0,385
	Betrag DR- $DR_{\Delta T}$ ^2	0,000
	Betrag DR-DR Versatz ^2	0,148
	$(\partial D_m)/(\partial A)$	-0,022
$u_{RAV}$	Versatz mit Flächenauswirkung	0,170
$u_{DR}$	$u(DR) = \Delta DR$	<b>0,233 mm</b>

**Teilbilanz  $u_{(Tr0,1)}$ :**

<b>Messkette Drehmoment <math>Tr_{0,1}</math></b>		
	Messmittelnummer	231221-G-112
	Kategorie Torsionsmoment	2
<b><math>u_{AwTR}</math></b>	max. Anzeigeabweichung bezogen auf $T_{R0,1}$	-0,415 Nm
<b><math>u_{SwTR}</math></b>	max. Spannweiteabweichung bezogen auf $T_{R0,1}$	0,990 Nm
<b><math>u_{ATW}</math></b>		0,440 Nm
<b><math>u_{RTW}</math></b>		0,440 Nm
<b><math>u_{\varphi}</math> Linearität</b>	Linearitätsabweichung	0,003 mm
<b><math>u_{\varphi}</math> Auflösung</b>	Auflösungsabweichung	0,000 mm
<b><math>u_{\varphi}</math> Genauigkeit</b>	Genauigkeitsabweichung	0,009 mm
	Typ DMS	K
<b><math>u_{DMS}</math></b>		0,051
<b><math>u_{VTR0,1}</math></b>		3,183454832 Nm
	$(\partial Tr_{0,1})/(\partial A)$	-1,166350299
<b><math>u_{(Tr0,1)}</math></b>		<b>1,120703535</b>

**Teilbilanz  $u_{(FN)}$ :**

<b>Messkette Normalkraft <math>F_N</math></b>		
	Messmittelnummer	<b>231331-G-010</b>
	Umrechnungsfaktor	99,80
<b><math>u_{AwFN}</math></b>	rel. Anzeigeabweichung bezogen auf $F_N$	0,30
<b><math>u_{UFN}</math></b>	rel. Spannweiteabweichung bezogen auf $F_N$	0,02
<b><math>u_{UKMD}</math></b>	relative Spannungsabweichung Kraftmessdose	0,531
<b><math>u_{SKMD}</math></b>	relative Signalabweichung Kraftmessdose	0,001
<b><math>u_{AFN}</math></b>		0,037
<b><math>u_{\alpha}</math></b>	winkelbezogene Abweichung der Krafteinleitung	0,460
<b><math>u_{(FN)}</math></b>		<b>0,48202</b>

**Anlage 9:** Hinweise zur Markierung (Bezugssystem generieren)

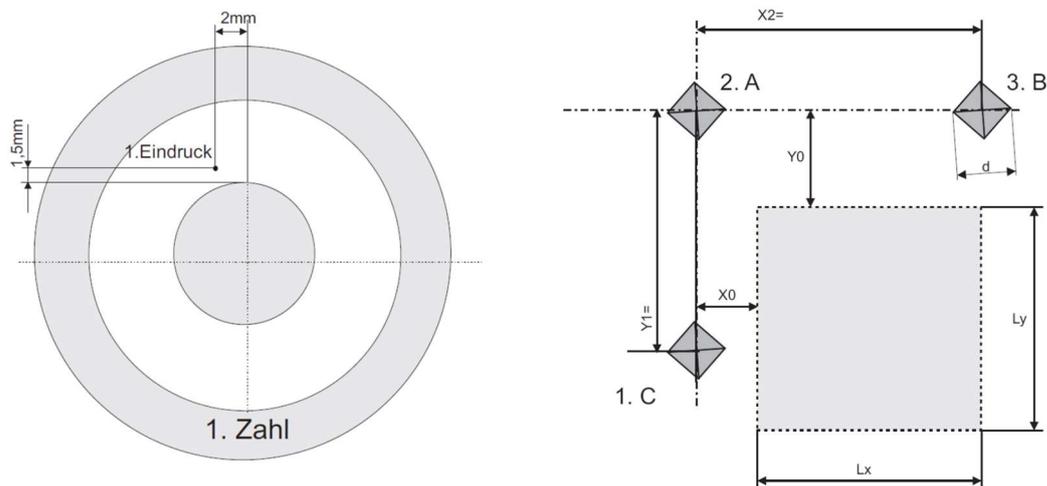
- Eindringtiefe  $t$  mit der Formel (12) ermitteln und diese mit der HV-Härte [96, 97]

$$t = 2 * P_t \quad [96] \quad (12)$$

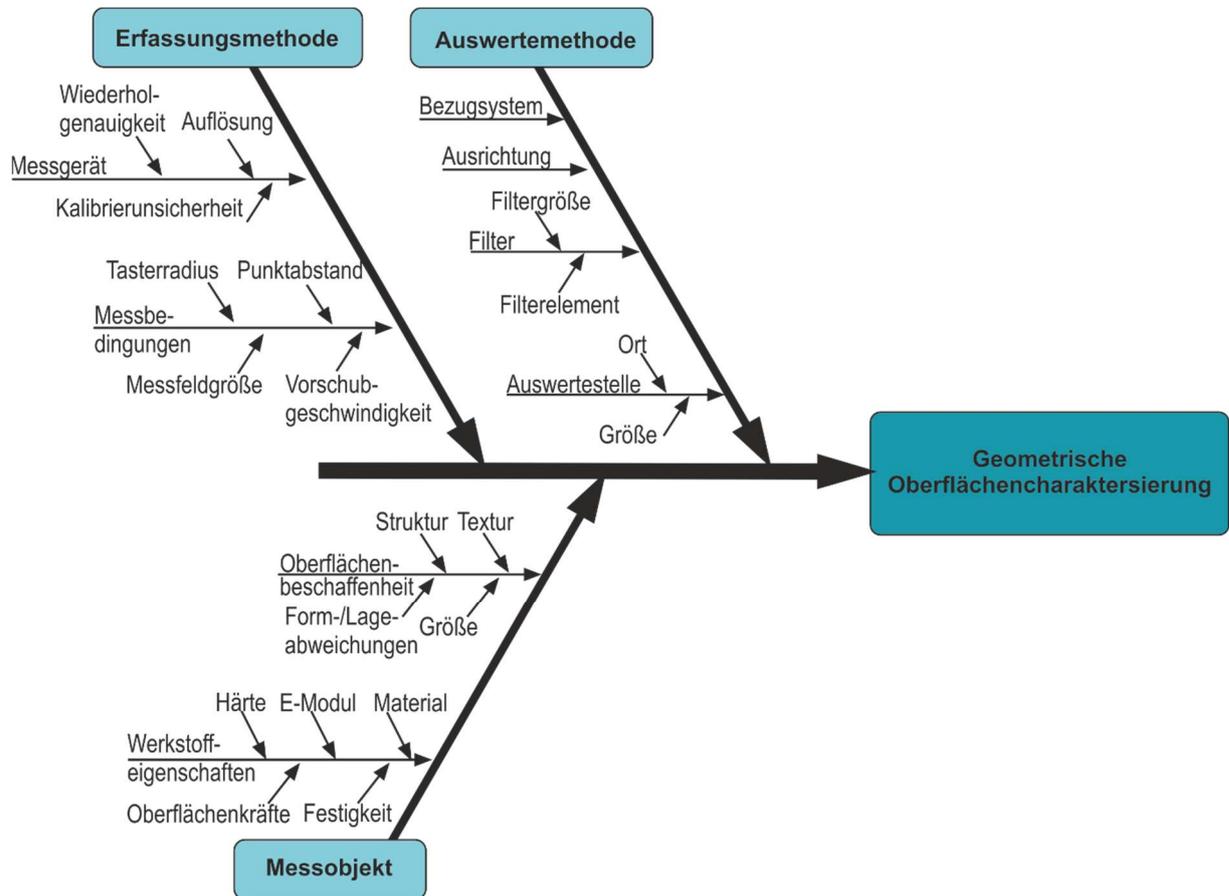
$$P \approx (5 * t)^2 * HV \quad [96] \quad (13)$$

- resultierende Werte aus (13) auf genormte Prüfkraft aufrunden
- Festlegung: A = Nullpunkt des Koordinatensystems,  $L_1 = y$ -Achse  $L_2 = x$ -Achse
- Erstellung des Markierungsplanes für jedes Werkstück
- Festlegung und Dokumentation der Größe des Messfeldes sowie deren Abstände der Markierungseindrücke
- Aufbringen der Härteeindrücke auf die Oberfläche in Abhängigkeit der Oberflächenstruktur
- Minimale Randabstände: 1,5 mm von der unteren Probekörperkante und von der Oberflächenmitte von 2,0 mm
- Größe des Messfeldes:  $L_x = L_y = 3$  mm
- Kontrollrechnung ( $x_0 + x_1 > 2,5 * d$ )

Positionierung der Markierung auf Probenkörperoberfläche



**Anlage 10:** Reduziertes Ursache-Wirkungsdiagramm und paarweiser Vergleich für Einflussgrößen der geometrischen Charakterisierung



Qualitätskriterien Zielgrößen Einflussgrößen Kundenwünsche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe	Rang
	Werkstoff	Form und Lageabweichungen OF	Struktur der Oberfläche	Richtung der Oberfläche	Tasterradius	Punktabstand	Wiederholgenauigkeit des Messgerätes	Auflösung des Messgerätes	Kalibrierunsicherheit des Messgerätes	Ort der Auswertstelle							
1 Werkstoff	-	1	1	1	2	1	2	2	2	1						13	2
2 Form und Lageabweichungen OF	1	-	2	1	2	2	2	2	2	1						15	1
3 Struktur der Oberfläche	1	0	-	1	1	2	2	1	2	1						11	5
4 Richtung der Oberfläche	1	1	1	-	2	2	2	1	2	0						12	3
5 Tasterradius	0	0	1	0	-	0	0	1	1	0						3	10
6 Punktabstand	1	0	0	0	2	-	2	1	1	1						8	6
7 Wiederholgenauigkeit des Messgerätes	0	0	0	0	2	0	-	0	1	1						4	9
8 Auflösung des Messgerätes	0	0	1	1	1	1	2	-	1	0						7	7
9 Kalibrierunsicherheit des Messgerätes	0	0	0	0	1	1	1	1	-	1						5	8
10 Ort der Auswertstelle	1	1	1	2	2	1	1	2	1	-						12	3
11											-						
12												-					
13													-				
14														-			
15															-		

Wertebereich des Gewichts (Ganzzahlig)

Untergrenze=	1
Obergrenze=	10

Obergrenze entspricht dem

- theoretischen Maximalwert von Summe
- berechneten Maximalwert von Summe

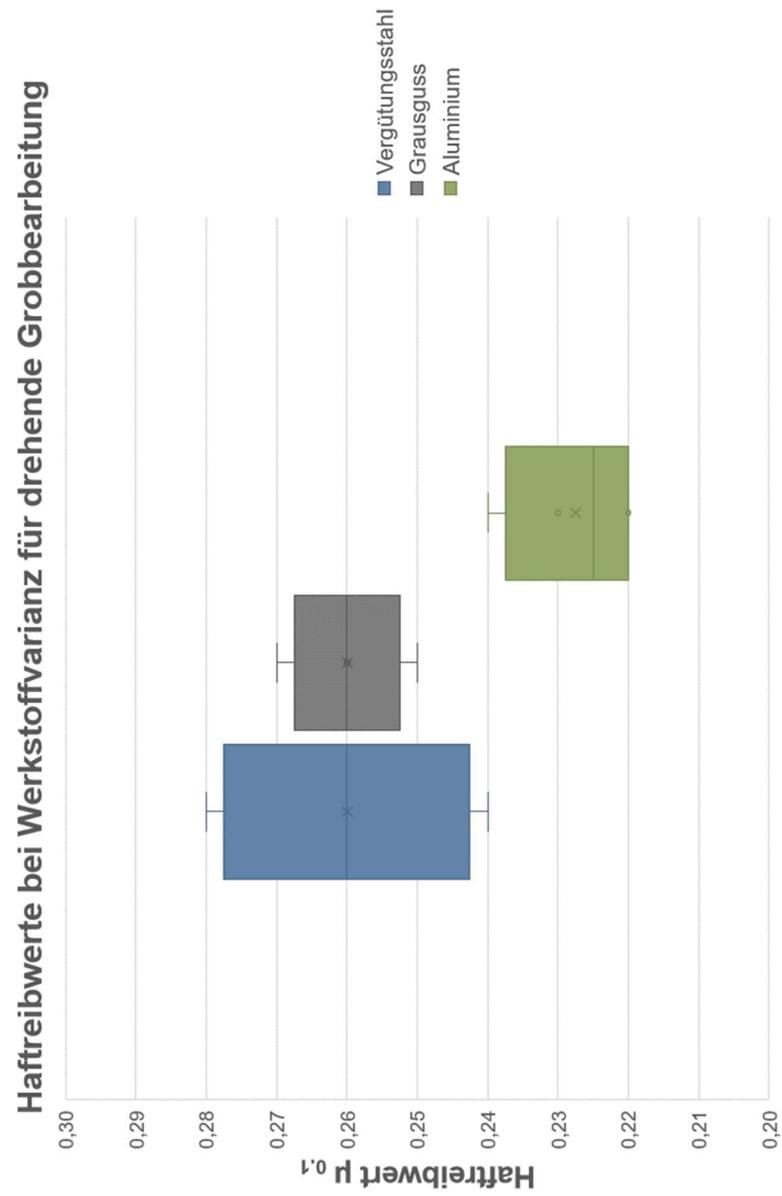
Wichtungsfaktoren: 0 Dominanz der Spalte gegenüber der Zeile  
1 Gleichrangigkeit von Zeile und Spalte  
2 Dominanz der Zeile gegenüber der Spalte

**Anlage 11:** Teilbilanzgleichungen für die geometrische Charakterisierung**Methodendefinition der Einflussgrößen**

<b>Kenngroße</b>	<b>Methode</b>	<b>Zusatzinformationen zur Datenbasis</b>
$u_{Wkts}$	Methode A	Gedrehte Oberflächen auf unterschiedlichen Werkstoffen: A03, A06, A07
$u_{OF\ FL}$	Methode A	Geschliffene Stahloberflächen: A13 - Statistikserie
$u_{OF\ Struktur}$	Methode A	Grob und feingedrehte Stahloberflächen: A03, A04
$u_{OF\ Richtung}$	Methode A	Grob gedrehte und grob geschliffene Stahloberflächen: A02, A03
$u_{MG}$ Tasterradius	Methode B	Kalibrierschein
$u_{MG}$ Punktabstand	Methode B	Kalibrierschein
$u_{MG}$ Auflösung x	Methode B	Kalibrierschein
$u_{MG}$ Auflösung z	Methode B	Kalibrierschein
$u_{MG}$ Positionierungsicherheit	Methode B	Kalibrierschein
$u_{MG}$ Kalibrierunsicherheit	Methode B	Kalibrierschein
$u_{Awst}$	Methode A	Geschliffene Stahloberflächen: A13 mit je 4 unterschiedlichen Auswertefeldern je Probekörper

### Teilbilanzrechnungen

Gesamte Messunsicherheit			
k bei 95%		2	
$u(x) = a/\sqrt{3}$ bei Rechteckverteilung		0,577	
$u(x) = a/3$ bei Normalverteilung		0,333	
$a_n$ für kleine Stichproben $n = 3$		0,886	
$a_n$ für kleine Stichproben $n = 12$		0,978	
$a_n$ für kleine Stichproben $n = 25$		0,99	
$u_{Wkst}$	Normal	0,0240587	mm
$u_{OF\ FuL}$	Normal	0,0040856	mm
$u_{OF\ Struktur}$	Normal	0,0053382	mm
$u_{OF\ Richtung}$	Normal	0,0061077	mm
$u_{MG\ Tasterradius}$	2 $\mu$ m	0,0005	mm
$u_{MG\ Punktabstand}$	5	0,001	mm
$u_{MG\ Auflösung\ x}$	0,001 $\mu$ m	0,000005	mm
$u_{MG\ Auflösung\ z}$	0,001nm vom Taster		mm
$u_{MG\ Positionierunsicherheit}$	2 $\mu$ m	0,001	mm
$u_{MG\ Kalibrierunsicherheit}$		0,0004037	mm
$u_{Awst}$	Normal	0,0021329	mm
<b><math>u_k\ geom.</math></b>		<b>0,00867681</b>	<b>mm</b>
<b>U bei k</b>		<b>0,0173536</b>	<b>mm</b>

**Anlage 12: Varietät des Haftreibwertes bei Werkstoffvarianz (Drehen-grob)**

**Anlage 13: Test auf Normalverteilung und Ausreißer**

<b>Kenngröße</b>	<b>p-Wert (Anderson-Darling-Test)</b>	<b>Normal- verteilung (<math>p &gt; 0,05</math>)</b>	<b>Abweichende Verteilungsform lt. QS-STAT</b>	<b>Test auf Ausreißer nach Grubbs (<math>\alpha = 0,01</math>)</b>
$T_{R0,1}$ in Nm	0,888	J		Keine Ausreißer
$\mu_{0,1}$	0,559	J		Keine Ausreißer
Temperatur in °C	0,017	N	Mischverteilung (EM)	Keine Ausreißer
Rel. Luftfeuchtigkeit	< 0,005	N	Mischverteilung (EM)	Keine Ausreißer
Axialkraft N in N	< 0,005	N	Weibullverteilung	Keine Ausreißer
Ebenheit in mm	< 0,005	N	Weibullverteilung	A13-18
Konzentrität innen in mm	< 0,005	N	Logarithmische Normalverteilung	Keine Ausreißer
Konzentrität außen in mm	< 0,005	N	Logarithmische Normalverteilung	A13-19
Rechtwinkligkeit in mm	0,05	N	Logarithmische Normalverteilung	A13-18
Rechtwinkligkeit ohne Form in mm	0,021	N	Mischverteilung (EM)	Keine Ausreißer
Sa in $\mu\text{m}$	0,011	N	Logarithmische Normalverteilung	A13-25
Sz in $\mu\text{m}$	< 0,005	N	Mischverteilung (EM)	A13-01
Sv in $\mu\text{m}$	< 0,005	N	Mischverteilung (EM)	A13-01
Sp in $\mu\text{m}$	< 0,005	N	Logarithmische Normalverteilung	A13-25
Ssk in $\mu\text{m}$	< 0,005	N	Logarithmische Normalverteilung	A13-01
Sku in $\mu\text{m}$	< 0,005	N	Logarithmische Normalverteilung	A13-01
Sq in $\mu\text{m}$	0,014	N	Logarithmische Normalverteilung	A13-22
Inselanzahl n	0,307	J		Keine Ausreißer
Inselfläche Ao in $\mu\text{m}^2$	< 0,005	N	Logarithmische Normalverteilung	Keine Ausreißer
Materialvolumen in $\mu\text{m}^3$	< 0,005	N	Logarithmische Normalverteilung	Keine Ausreißer
Kontaktfläche in $\mu\text{m}^2$	0,672	J		Keine Ausreißer

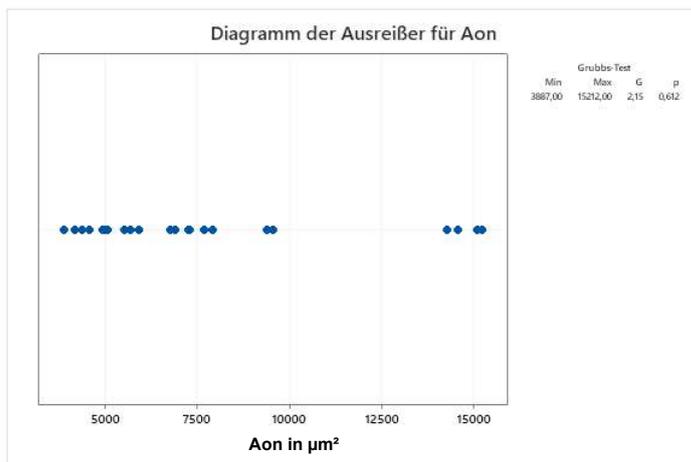
## Anlage 14: Grubbs-Test auf nicht und transformierte Messdaten der projizierten Durchschnittsoberfläche einer Insel (Aon)

### Test auf Ausreißer: Aon

#### Grubbs-Test

Variable	N	Mittelwert	StdAbw	Min	Max	G	p
Aon	25	7415	3621	3887	15212	2,15	0,612

\* HINWEIS \* Keine Ausreißer auf dem Signifikanzniveau 1 %

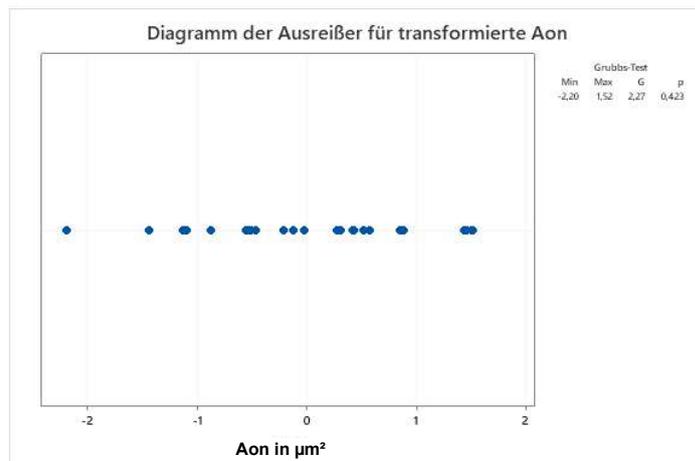


### Test auf Ausreißer: Transformierte Aon

#### Grubbs-Test

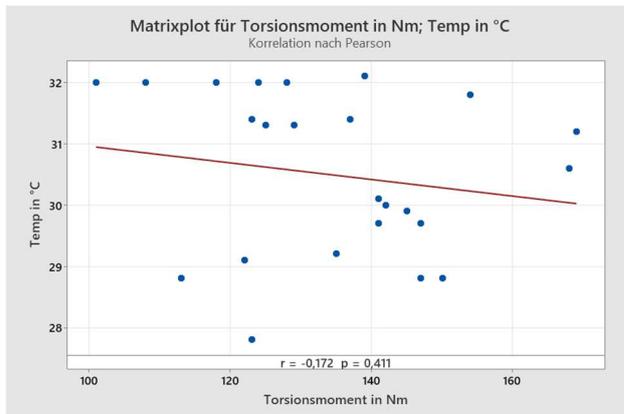
Variable	N	Mittelwert	StdAbw	Min	Max	G	p
C27	25	0,022	0,977	-2,198	1,517	2,27	0,423

\* HINWEIS \* Keine Ausreißer auf dem Signifikanzniveau 1 %



## Anlage 15: Korrelationsanalysen zu den Prüfbedingungen

### Korrelation: Temperatur in °C; Torsionsmoment in Nm



#### Methode

Korrelationstyp                      Pearson  
 Anzahl der verwendeten Zeilen    25

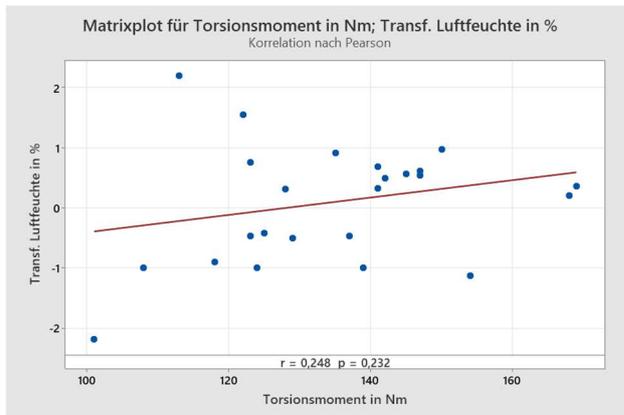
#### Korrelationen

	Temp in °C
Torsionsmoment in Nm	-0,172

#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für p	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Temp in °C	25	-0,172	(-0,531; 0,240)	0,411

### Korrelation: Transf. Luftfeuchte; Torsionsmoment in Nm



#### Methode

Korrelationstyp                      Pearson  
 Anzahl der verwendeten Zeilen    25

#### Korrelationen

	Transf. Luftfeuchte
Torsionsmoment in Nm	0,248

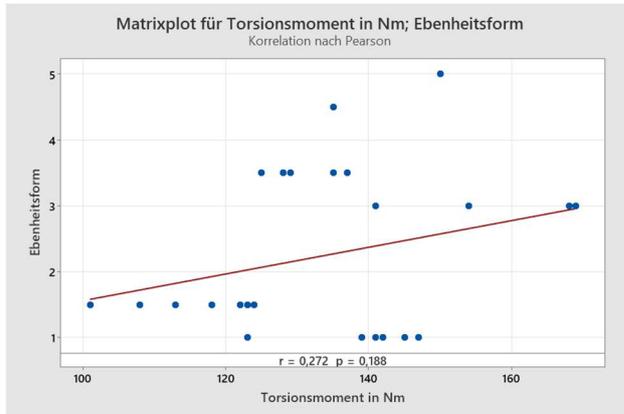
#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für p	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Transf. Luftfeuchte	25	0,248	(-0,163; 0,586)	0,232

## Anlage 16: Korrelationsanalysen zur Ebenheit

ARBEITSBLATT 1

### Korrelation: Ebenheitsform; Torsionsmoment in Nm



#### Methode

Korrelationstyp            Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen    25

$p$ : paarweise Korrelation nach Pearson

#### Korrelationen

	Ebenheitsform
Torsionsmoment in Nm	0,272

#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für $\rho$	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Ebenheitsform	25	0,272	(-0,138; 0,603)	0,188

### Diagramm: Gegenüberstellung der Ebenheitsform zum Torsionsmoment

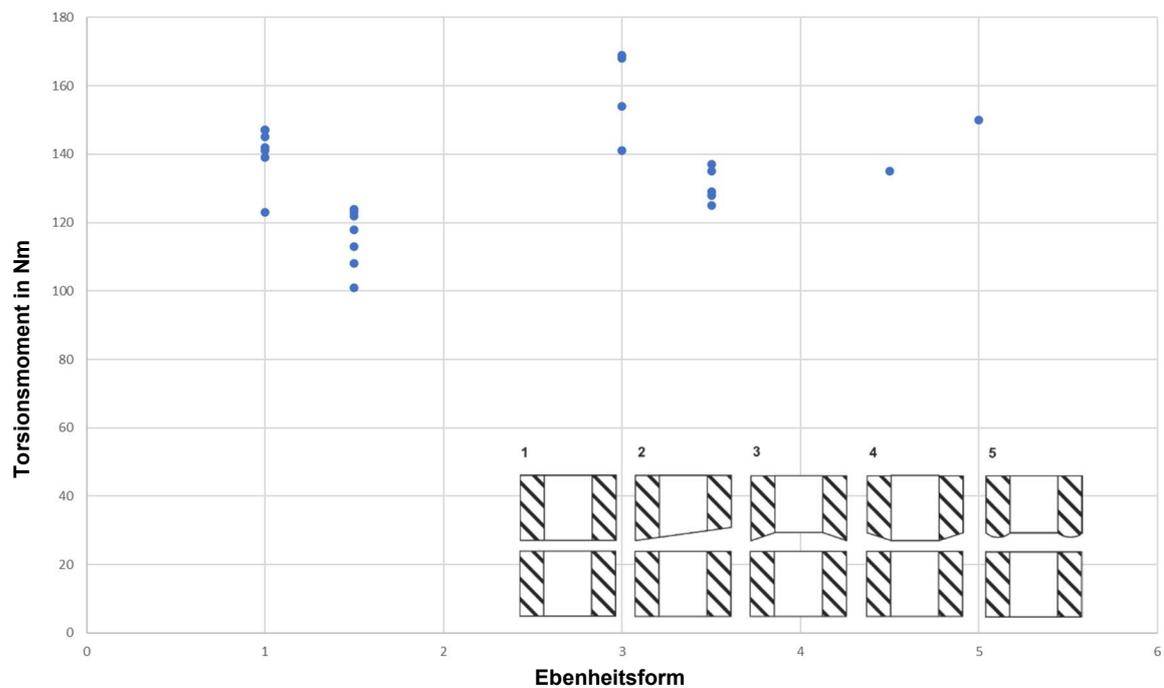


Diagramm: Gegenüberstellung der Ebenheitsabweichung nach RWP zum Torsionsmoment

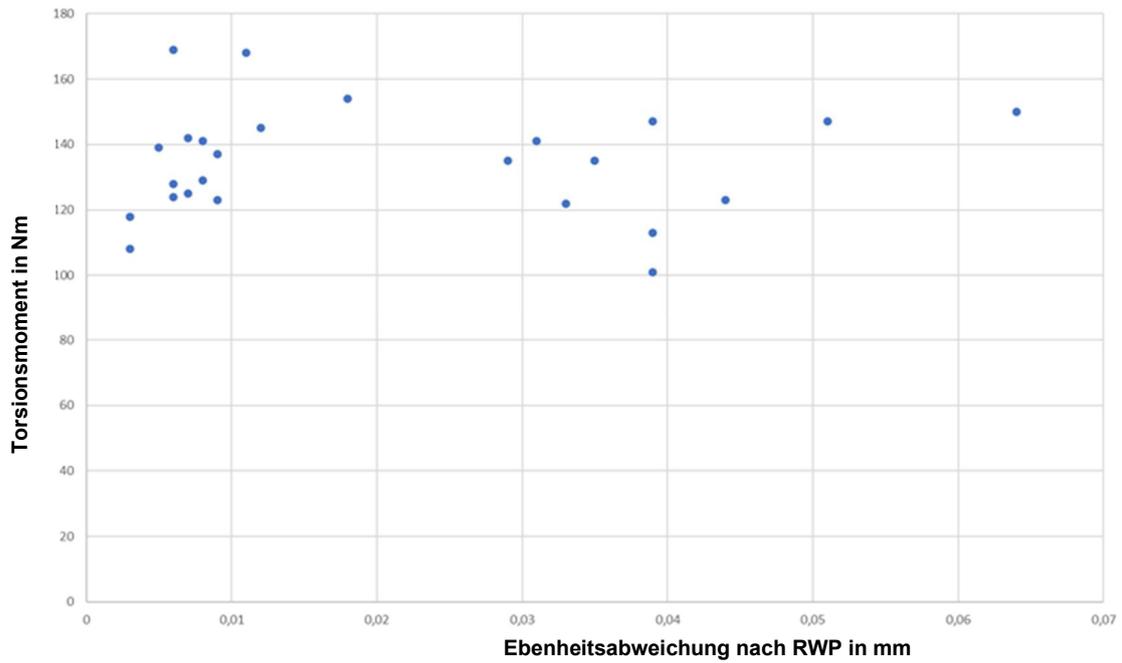
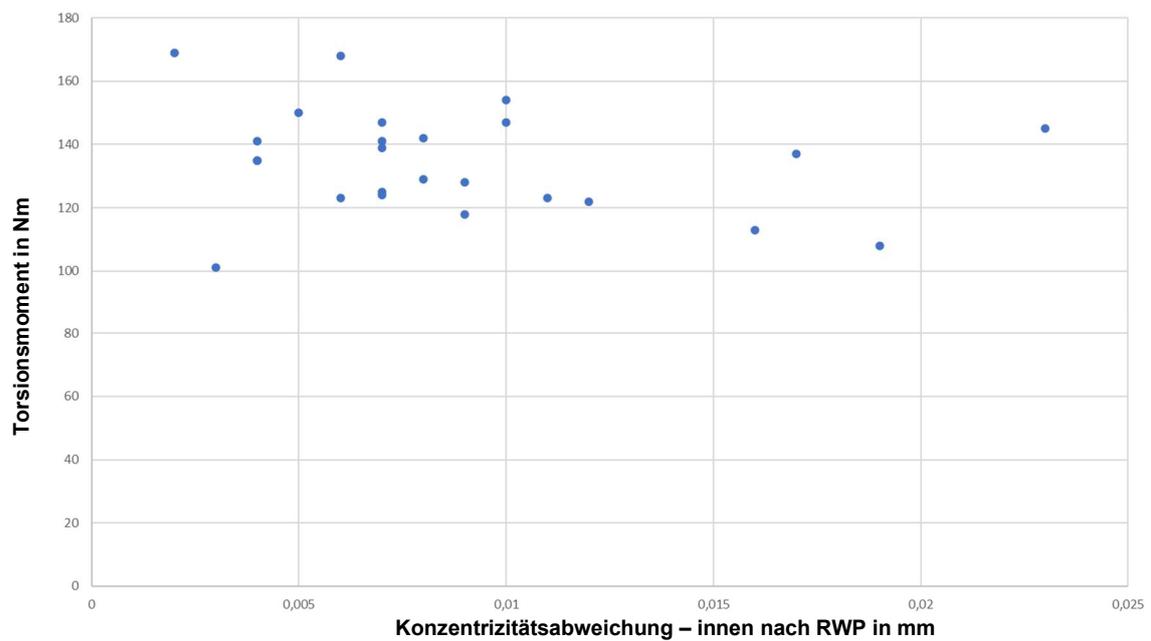
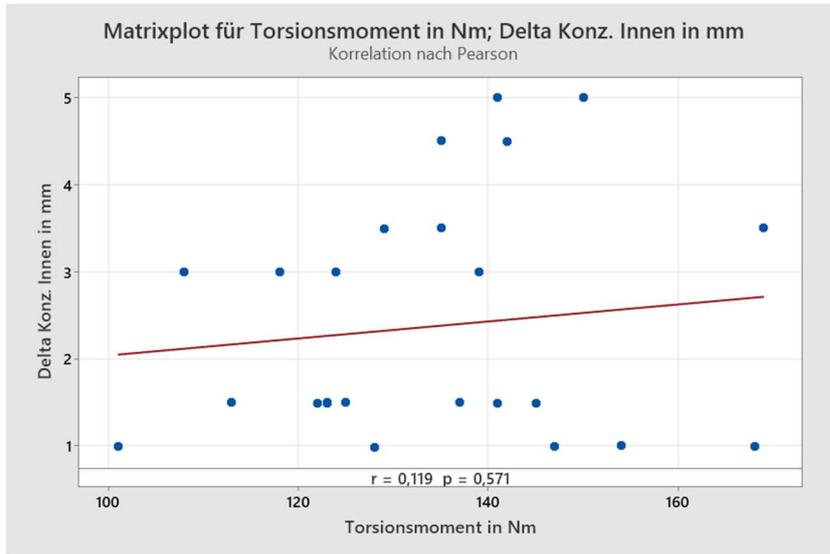


Diagramm: Gegenüberstellung der Konzentritätsabweichung -innen nach RWP zum Torsionsmoment



ARBEITSBLATT 1

**Korrelation: Delta Konz. Innen n; Torsionsmoment in Nm**



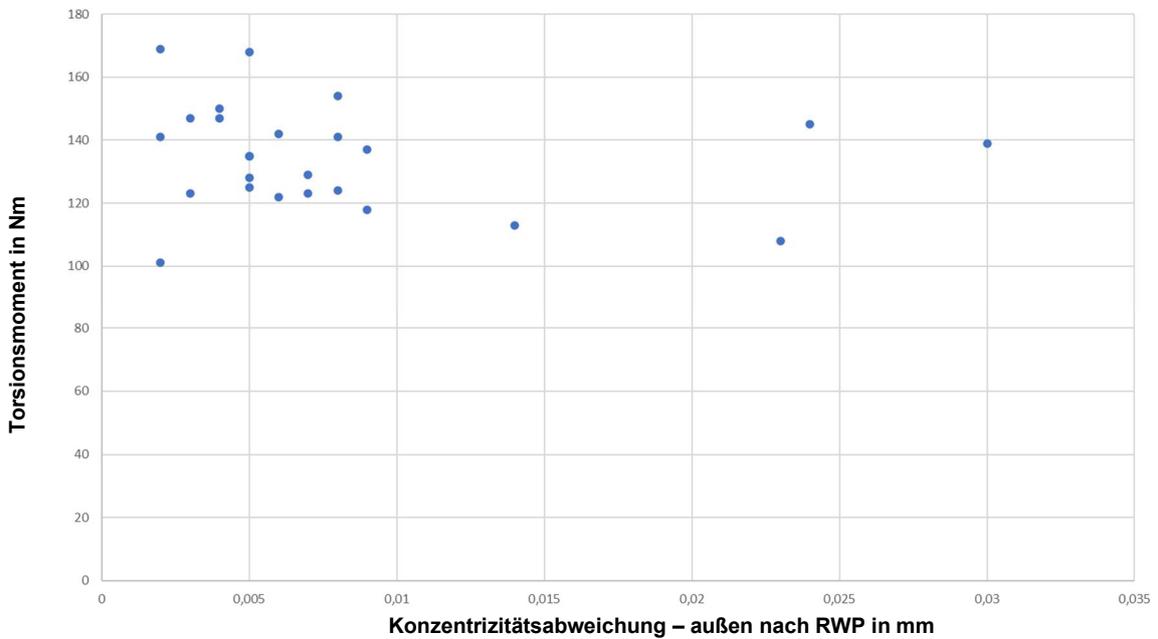
**Methode**

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 25

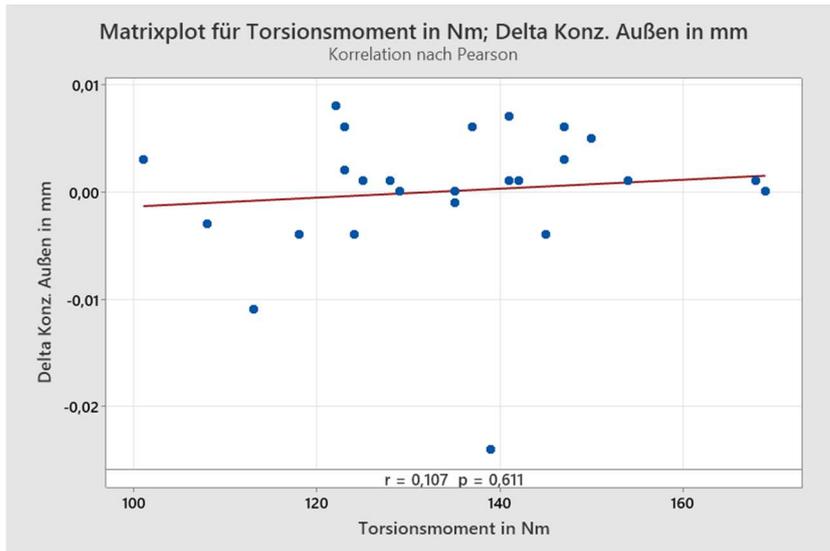
**Korrelationen**

	Delta Konz. Innen n
Torsionsmoment in Nm	0,119

**Diagramm: Gegenüberstellung der Konzentritätsabweichung -außen nach RWP zum Torsionsmoment**



ARBEITSBLATT 1

**Korrelation: Delta Konz. Außen n; Torsionsmoment in Nm****Methode**

Korrelationstyp            Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen    25

**Korrelationen**

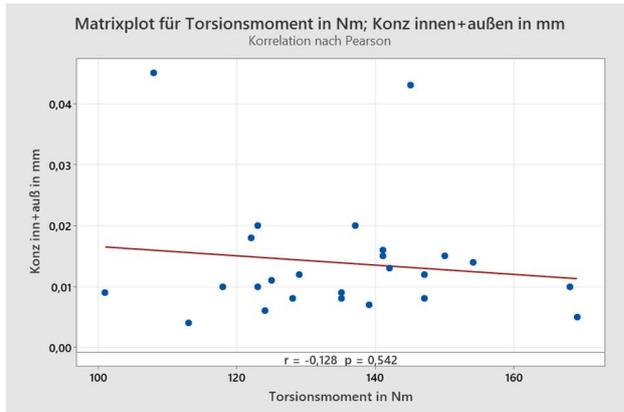
	<b>Delta Konz. Außen n</b>
Torsionsmoment in Nm	0,107

## Anlage 17: Korrelationsanalysen zur Kombination der Konzentrität Innen und Außen

### Summe aus Konzentrität innen und außen

ARBEITSBLATT 1

#### Korrelation: Konz inn+auß; Torsionsmoment in Nm



#### Methode

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 25

#### Korrelationen

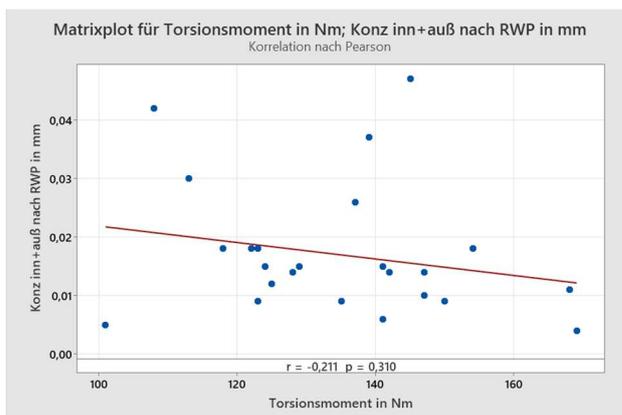
	Konz inn+auß
Torsionsmoment in Nm	-0,128

#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für $\rho$	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Konz inn+auß	25	-0,128	(-0,498; 0,281)	0,542

ARBEITSBLATT 1

#### Korrelation: Torsionsmoment in Nm; Konz inn+auß n



#### Methode

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 25

#### Korrelationen

	Torsionsmoment in Nm
Konz inn+auß n	-0,211

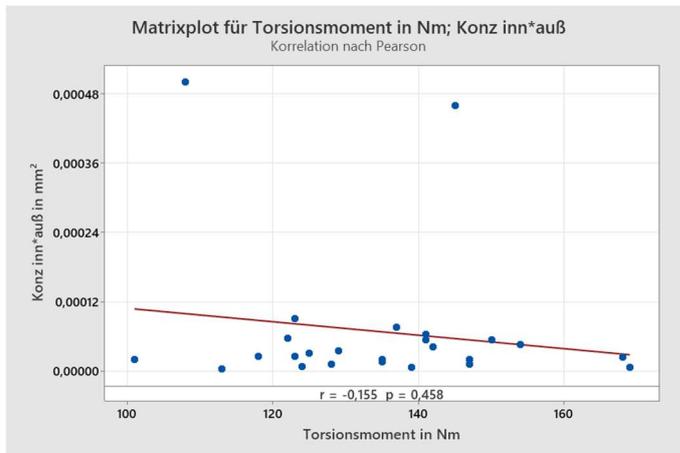
#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für $\rho$	p-Wert
Konz inn+auß n	Torsionsmoment in Nm	25	-0,211	(-0,560; 0,200)	0,310

## Produkt aus Konzentrität innen und außen

ARBEITSBLATT 1

### Korrelation: Konz inn\*auß; Torsionsmoment in Nm



#### Methode

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 25

#### Korrelationen

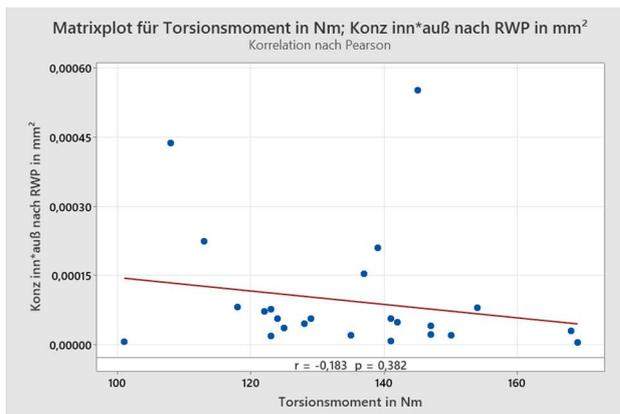
	Konz inn*auß
Torsionsmoment in Nm	-0,155

#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für p	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Konz inn*auß	25	-0,155	(-0,519; 0,255)	0,458

ARBEITSBLATT 1

### Korrelation: Torsionsmoment in Nm; Konz inn\*auß n



#### Methode

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 25

#### Korrelationen

	Torsionsmoment in Nm
Konz inn*auß n	-0,183

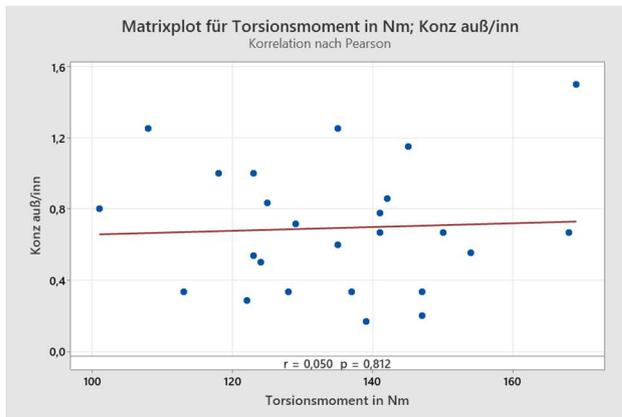
#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für p	p-Wert
Konz inn*auß n	Torsionsmoment in Nm	25	-0,183	(-0,539; 0,229)	0,382

## Quotient aus Konzentrität innen und außen

ARBEITSBLATT 1

### Korrelation: Torsionsmoment in Nm; Konz auß/inn



#### Methode

Korrelationstyp            Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen    25

#### Korrelationen

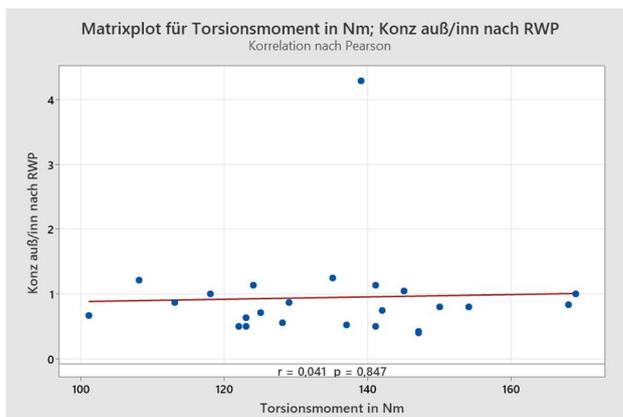
	Torsionsmoment in Nm
Konz auß/inn	0,050

#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für $\rho$	p-Wert
Konz auß/inn	Torsionsmoment in Nm	25	0,050	(-0,352; 0,436)	0,812

ARBEITSBLATT 1

### Korrelation: Konz auß/inn nach RWP; Torsionsmoment in Nm



#### Methode

Korrelationstyp            Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen    25

#### Korrelationen

	Konz auß/inn n
Torsionsmoment in Nm	0,041

#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

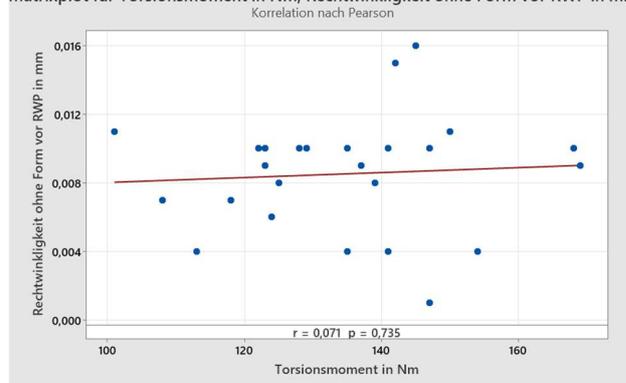
Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für $\rho$	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Konz auß/inn n	25	0,041	(-0,360; 0,429)	0,847

## Anlage 18: Korrelationsanalysen zur Rechtwinkligkeit mit und ohne Form und dem Torsionsmoment

ARBEITSBLATT 1

### Korrelation: Torsionsmoment in Nm; Rechtwinkligkeit ohne Form vor RWP

Matrixplot für Torsionsmoment in Nm; Rechtwinkligkeit ohne Form vor RWP in mm



#### Methode

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 25

#### Korrelationen

	Torsionsmoment in Nm
Rechtwinkligkeit ohne Form v	0,071

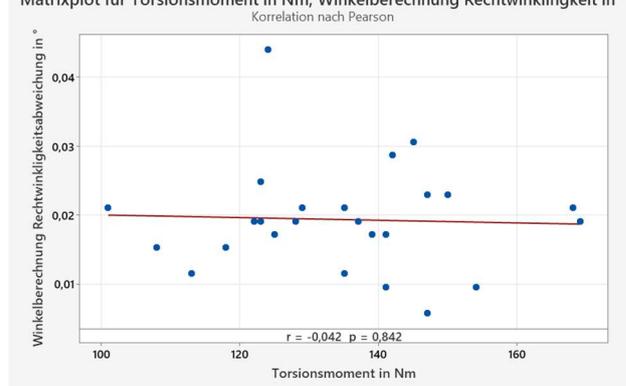
#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für $\rho$	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Rechtwinkligkeit ohne Form v	25	0,071	(-0,333; 0,454)	0,735

ARBEITSBLATT 1

### Korrelation: Winkelberechnung aus Rechtwinkl; Torsionsmoment in Nm

Matrixplot für Torsionsmoment in Nm; Winkelberechnung Rechtwinkligkeit in °



#### Methode

Korrelationstyp Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen 25

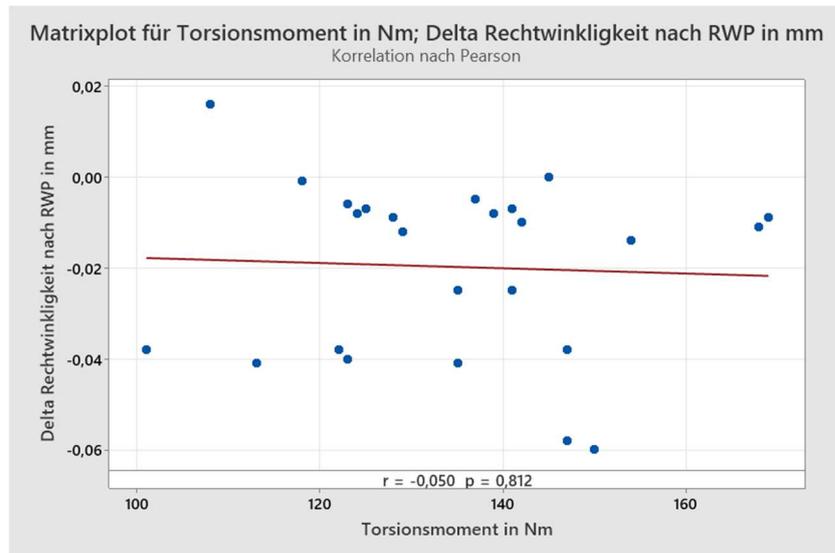
#### Korrelationen

	Winkelberechnung aus Rechtwinkl
Torsionsmoment in Nm	-0,042

#### Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für $\rho$	p-Wert
Torsionsmoment in Nm	Winkelberechnung Rechtwinkl	25	-0,042	(-0,430; 0,359)	0,842

ARBEITSBLATT 1

**Korrelation: Delta Rechtwinkligkeit n; Torsionsmoment in Nm****Methode**

Korrelationstyp            Pearson  
Anzahl der verwendeten Zeilen    25

**Korrelationen**

	<b>Delta Rechtwinkligkeit n</b>
Torsionsmoment in Nm	-0,050

Tabelle: Rechtwinkligkeit vor und nach der RWP

Probekörper	Torsionsmoment Nm	Reibwert $\mu_{0,1}$	FuL vor RWP			FuL nach RWP			Delta			
			Rechtwinkligkeit v mm	Rechtwinkligkeit ohne Form v mm	Winkelberechnung aus Rechtwinkl. ab °	Rechtwinkligkeit n mm	Rechtwinkligkeit ohne Form n mm	Winkelberechnung aus Rechtwinkl. ab °	Rechtwinkligkeit	Rechtwinkligkeit ohne Form		
A13-01	123	0,20	0,01	0,009	0,019098592	0,017188733	0,009	0,008	0,017188733	0,015278874	-0,001	-0,001
A13-02	147	0,24	0,012	0,01	0,022918311	0,019098592	0,044	0,015	0,08403375	0,028647887	0,032	0,005
A13-03	150	0,24	0,012	0,011	0,022918311	0,021008452	0,042	0,004	0,080214039	0,007639437	0,03	-0,007
A13-04	113	0,18	0,006	0,004	0,011459156	0,007639437	0,012	0,008	0,02918311	0,015278874	0,006	0,004
A13-05	135	0,22	0,011	0,01	0,021008452	0,019098592	0,014	0,009	0,026738028	0,017188733	0,003	-0,001
A13-06	135	0,22	0,006	0,004	0,011459156	0,007639437	0,015	0,01	0,028647887	0,019098592	0,009	0,006
A13-07	122	0,20	0,01	0,01	0,019098592	0,019098592	0,009	0,008	0,017188733	0,015278874	-0,001	-0,002
A13-08	147	0,24	0,003	0,001	0,005729578	0,019098592	0,03	0,002	0,05729576	0,003819719	0,027	0,001
A13-09	141	0,23	0,005	0,004	0,009549296	0,007639437	0,031	0,006	0,059205618	0,011459156	0,026	0,002
A13-10	145	0,24	0,016	0,016	0,030557746	0,030557746	0,042	0,01	0,080214039	0,019098592	0,026	-0,006
A13-11	142	0,23	0,015	0,015	0,028647887	0,028647887	0,04	0,005	0,076394327	0,009549296	0,025	-0,01
A13-12	169	0,27	0,01	0,009	0,019098592	0,017188733	0,047	0,015	0,089763314	0,028647887	0,037	0,006
A13-13	141	0,23	0,009	0,009	0,017188733	0,019098592	0,023	0,016	0,043926756	0,030557746	0,014	0,006
A13-14	168	0,27	0,011	0,01	0,021008452	0,019098592	0,06	0,015	0,114591406	0,028647887	0,049	0,005
A13-15	154	0,25	0,005	0,004	0,009549296	0,007639437	0,066	0,01	0,126050512	0,019098592	0,061	0,006
A13-16	128	0,21	0,01	0,01	0,019098592	0,019098592	0,011	0,007	0,021008452	0,013369015	0,001	-0,003
A13-17	101	0,16	0,011	0,011	0,021008452	0,021008452	0,011	0,009	0,021008452	0,017188733	0	-0,002
A13-18	124	0,20	0,023	0,023	0,043926756	0,011459156	0,01	0,009	0,019098592	0,017188733	-0,013	0,003
A13-19	108	0,18	0,008	0,007	0,015278874	0,013369015	0,01	0,008	0,019098592	0,015278874	0,002	0,001
A13-20	118	0,19	0,008	0,007	0,015278874	0,013369015	0,017	0,011	0,032467605	0,021008452	0,009	0,004
A13-21	139	0,23	0,009	0,008	0,017188733	0,015278874	0,016	0,013	0,030557746	0,02482817	0,007	0,005
A13-22	129	0,21	0,011	0,01	0,021008452	0,019098592	0,019	0,004	0,036287322	0,007639437	0,008	-0,006
A13-23	125	0,20	0,009	0,008	0,017188733	0,015278874	0,042	0,003	0,080214039	0,005729578	0,033	-0,005
A13-24	137	0,22	0,01	0,009	0,019098592	0,017188733	0,012	0,009	0,022918311	0,017188733	0,002	0
A13-25	123	0,20	0,013	0,01	0,02482817	0,019098592	0,006	0,005	0,011459156	0,009549296	-0,007	-0,005

## Anlage 19: Punktreduzierung

**Tabelle 1: kontinuierliche Punktreduzierung der PGK erfassten Oberfläche  
(1 µm x 1 µm)**

PK- Nummer	Bearbeitung	Struktur	Punkt- abstand in µm	Sz in µm	Prozentualer Fehler in %	Inselan- zahl n	Prozentualer Fehler in %
A-01-11	geschliffen	fein	1	10,6	0,00	6328	0,00
A-01-11	geschliffen	fein	2	10,6	0,00	6500	2,72
A-01-11	geschliffen	fein	3	10,5	0,94	6013	4,98
A-01-11	geschliffen	fein	4	10,4	1,89	5733	9,40
A-01-11	geschliffen	fein	5	10,5	0,94	5627	11,08
A-01-11	geschliffen	fein	6	10,2	3,77	5422	14,32
A-01-11	geschliffen	fein	7	10,3	2,83	5182	18,11
A-01-11	geschliffen	fein	8	10,3	2,83	5028	20,54
A-01-11	geschliffen	fein	9	10,1	4,72	4657	26,41
A-01-11	geschliffen	fein	10	10,1	4,72	4329	31,59
A-01-11	geschliffen	fein	15	9,69	8,58	2779	56,08
A-01-11	geschliffen	fein	20	9,29	12,36	1844	70,86
A-01-13	geschliffen	fein	1	8,19	0,00	4413	0,00
A-01-13	geschliffen	fein	2	8,09	1,22	4801	8,79
A-01-13	geschliffen	fein	3	8,17	0,24	5120	16,02
A-01-13	geschliffen	fein	4	8,04	1,83	5296	20,01
A-01-13	geschliffen	fein	5	7,81	4,64	5317	20,48
A-01-13	geschliffen	fein	10	7,78	5,01	3808	13,71
A-01-13	geschliffen	fein	15	7,68	6,23	2489	43,60
A-01-13	geschliffen	fein	20	7,7	5,98	1640	62,84
A-02-07	geschliffen	grob	1	16,6	0,00	3365	0,00
A-02-07	geschliffen	grob	2	16,5	0,60	3304	1,81
A-02-07	geschliffen	grob	3	16,3	1,81	2957	12,12
A-02-07	geschliffen	grob	4	16,4	1,20	2574	23,51
A-02-07	geschliffen	grob	5	16,4	1,20	2347	30,25
A-02-07	geschliffen	grob	10	15,4	7,23	1670	50,37
A-02-07	geschliffen	grob	15	15,5	6,63	1207	64,13
A-02-07	geschliffen	grob	20	15,3	7,83	954	71,65
A-02-08	geschliffen	grob	1	18,8	0,00	812	0,00
A-02-08	geschliffen	grob	2	18,8	0,00	726	10,59
A-02-08	geschliffen	grob	3	18,7	0,53	624	23,15
A-02-08	geschliffen	grob	4	18,6	1,06	542	33,25
A-02-08	geschliffen	grob	5	18,4	2,13	499	38,55
A-02-08	geschliffen	grob	10	18,4	2,13	312	61,58
A-02-08	geschliffen	grob	15	18,4	2,13	199	75,49
A-02-08	geschliffen	grob	20	14,9	20,74	160	80,30
A-03-02	gedreht	grob	1	26	0,00	112	0,00
A-03-02	gedreht	grob	2	26	0,00	116	3,57
A-03-02	gedreht	grob	3	25,9	0,38	107	4,46
A-03-02	gedreht	grob	4	25,9	0,38	86	23,21
A-03-02	gedreht	grob	5	26	0,00	69	38,39
A-03-02	gedreht	grob	10	25,9	0,38	53	52,68

PK- Nummer	Bearbeitung	Struktur	Punkt- abstand in $\mu\text{m}$	Sz in $\mu\text{m}$	Prozentualer Fehler In %	Inselan- zahl n	Prozentualer Fehler In %
A-03-02	gedreht	grob	15	25,5	1,92	45	59,82
A-03-02	gedreht	grob	20	25,4	2,31	34	69,64
A-03-07	gedreht	grob	1	31,9	0,00	95	0,00
A-03-07	gedreht	grob	2	31,9	0,00	83	12,63
A-03-07	gedreht	grob	3	31,7	0,63	73	23,16
A-03-07	gedreht	grob	4	31,7	0,63	67	29,47
A-03-07	gedreht	grob	5	31,3	1,88	70	26,32
A-03-07	gedreht	grob	10	30,3	5,02	65	31,58
A-03-07	gedreht	grob	15	30,8	3,45	54	43,16
A-03-07	gedreht	grob	20	28,5	10,66	53	44,21
A-04-02	gedreht	fein	1	3,61	0,00	1563	0,00
A-04-02	gedreht	fein	2	3,61	0,00	972	37,81
A-04-02	gedreht	fein	3	3,56	1,39	599	61,68
A-04-02	gedreht	fein	4	3,61	0,00	450	71,21
A-04-02	gedreht	fein	5	3,57	1,11	340	78,25
A-04-02	gedreht	fein	10	3,49	3,32	231	85,22
A-04-02	gedreht	fein	15	3,559	1,41	157	89,96
A-04-02	gedreht	fein	20	3,495	3,19	101	93,54
A-04-07	gedreht	fein	1	2,702	0,00	2908	0,00
A-04-07	gedreht	fein	2	2,702	0,00	1533	47,28
A-04-07	gedreht	fein	3	2,699	0,11	998	65,68
A-04-07	gedreht	fein	4	2,6699	1,19	712	75,52
A-04-07	gedreht	fein	5	2,686	0,59	522	82,05
A-04-07	gedreht	fein	10	2,676	0,96	365	87,45
A-04-07	gedreht	fein	15	2,686	0,59	238	91,82
A-04-07	gedreht	fein	20	2,663	1,44	162	94,43



Probe- körper	Position	$\mu_0.1$	Abbott- Kurve C1(20%) in $\mu\text{m}$	Insel-Volu- men (20% Traganteil C1)					
				n	Vn in $\mu\text{m}^3$	Aon in $\mu\text{m}^2$	hn in $\mu\text{m}$	V in $\text{mm}^3$	A <sub>Ges</sub> in $\text{mm}^2$
A13-06	0	0,22	1,367	115	5261	14580	0,122	0,00061	1,68
	90		0,764	188	1632	8333	0,082	0,00031	1,57
	180		0,866	170	1886	9333	0,072	0,00032	1,59
	270		1,127	261	1666	5960	0,083	0,00043	1,56
	<b>MW</b>		1,031	184	2611	9552	<b>0,090</b>	<b>0,00042</b>	<b>1,60</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				60	1770	3639	0	0	0
				33	68	38	25	33	3
A13-07	0	0,20	1,142	261	1297	5829	0,099	0,00034	1,52
	90		1,008	165	2406	9781	0,074	0,00040	1,61
	180		1,050	251	1412	6145	0,096	0,00035	1,54
	270		1,083	198	2249	8081	0,120	0,00045	1,60
	<b>MW</b>		1,071	219	1841	7459	<b>0,097</b>	<b>0,00038</b>	<b>1,57</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				45	567	1840	0	0	0
				21	31	25	19	12	3
A13-08	0	0,24	1,412	167	2851	9634	0,110	0,00048	1,61
	90		1,010	201	2105	7790	0,108	0,00042	1,57
	180		1,078	182	1931	8520	0,099	0,00035	1,55
	270		1,474	215	2721	7461	0,114	0,00059	1,60
	<b>MW</b>		1,244	191	2402	8351	<b>0,108</b>	<b>0,00046</b>	<b>1,58</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				21	452	963	0	0	0
				11	19	12	6	21	2
A13-09	0	0,23	0,870	266	1381	5824	0,085	0,00037	1,55
	90		1,297	271	1409	5558	0,106	0,00038	1,51
	180		1,046	320	1065	4636	0,099	0,00034	1,48
	270		1,153	185	2439	8577	0,098	0,00045	1,59
	<b>MW</b>		1,091	261	1574	6149	<b>0,097</b>	<b>0,00039</b>	<b>1,53</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				56	598	1697	0	0	0
				21	38	28	9	12	3
A13-10	0	0,24	1,258	248	1600	6210	0,116	0,00040	1,54
	90		0,985	299	1195	5082	0,095	0,00036	1,52
	180		0,891	240	1461	6420	0,095	0,00035	1,54
	270		1,094	356	833	4074	0,086	0,00030	1,45
	<b>MW</b>		1,057	286	1272	5447	<b>0,098</b>	<b>0,00035</b>	<b>1,51</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				54	337	1087	0	0	0
				19	27	20	13	12	3
A13-11	0	0,23	0,945	287	1116	5230	0,087	0,00032	1,50
	90		1,083	304	1048	4911	0,088	0,00032	1,49
	180		1,048	232	1335	6531	0,099	0,00031	1,52
	270		1,181	120	4610	13652	0,079	0,00055	1,64
	<b>MW</b>		1,064	236	2027	7581	<b>0,088</b>	<b>0,00038</b>	<b>1,54</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				83	1726	4108	0	0	0
				35	85	54	9	32	4

Probe- körper	Position	$\mu_{0.1}$	Abbott- Kurve C1(20%) in $\mu\text{m}$	Insel-Volu- men (20% Traganteil C1)					
				n	Vn in $\mu\text{m}^3$	Aon in $\mu\text{m}^2$	hn in $\mu\text{m}$	V in $\text{mm}^3$	A <sub>Ges</sub> in $\text{mm}^2$
A13-12	0	0,27	0,976	124	2628	12786	0,127	0,00033	1,59
	90		0,659	476	484	3020	0,074	0,00023	1,44
	180		0,989	290	1277	5264	0,108	0,00037	1,53
	270		1,090	269	1505	5736	0,107	0,00040	1,54
	<b>MW</b>		<b>0,928</b>	<b>290</b>	<b>1474</b>	<b>6702</b>	<b>0,104</b>	<b>0,00033</b>	<b>1,52</b>
	<b>Stab Proz. Anteil</b>			144	885	4226	0	0	0
				50	60	63	21	23	4
A13-13	0	0,23	0,598	295	793	4897	0,075	0,00023	1,44
	90		1,068	278	1229	5500	0,096	0,00034	1,53
	180		1,311	249	1500	6120	0,107	0,00037	1,52
	270		0,924	148	2557	10903	0,092	0,00038	1,61
	<b>MW</b>		<b>0,975</b>	<b>243</b>	<b>1520</b>	<b>6855</b>	<b>0,092</b>	<b>0,00033</b>	<b>1,53</b>
	<b>Stab Proz. Anteil</b>			66	750	2744	0	0	0
				27	49	40	14	20	5
A13-14	0	0,27	0,920	280	1405	5220	0,101	0,00039	1,46
	90		1,091	197	2084	7450	0,105	0,00041	1,47
	180		0,847	229	1275	6221	0,094	0,00029	1,42
	270		0,924	164	2592	9334	0,082	0,00043	1,53
	<b>MW</b>		<b>0,945</b>	<b>218</b>	<b>1839</b>	<b>7056</b>	<b>0,095</b>	<b>0,00038</b>	<b>1,47</b>
	<b>Stab Proz. Anteil</b>			49	615	1771	0	0	0
				23	33	25	10	16	3
A13-15	0	0,25	1,176	269	1369	5745	0,108	0,00037	1,55
	90		0,875	210	1573	7511	0,102	0,00033	1,58
	180		1,380	223	2137	7191	0,107	0,00048	1,60
	270		0,844	256	1244	5947	0,104	0,00032	1,52
	<b>MW</b>		<b>1,069</b>	<b>240</b>	<b>1581</b>	<b>6599</b>	<b>0,105</b>	<b>0,00037</b>	<b>1,56</b>
	<b>Stab Proz. Anteil</b>			28	395	883	0	0	0
				12	25	13	3	19	2
A13-16	0	0,21	0,926	215	1840	7280	0,119	0,00040	1,57
	90		0,917	161	2073	9716	0,107	0,00033	1,56
	180		1,195	135	4216	12072	0,095	0,00057	1,63
	270		0,743	168	1821	9197	0,079	0,00031	1,55
	<b>MW</b>		<b>0,945</b>	<b>170</b>	<b>2488</b>	<b>9566</b>	<b>0,100</b>	<b>0,00040</b>	<b>1,58</b>
	<b>Stab Proz. Anteil</b>			33	1158	1972	0	0	0
				20	47	21	17	29	2

Probekörper	Position	$\mu_0.1$	Abbott-Kurve C1(20%) in $\mu\text{m}$	Insel-Volumen (20% Traganteil C1)					
				n	Vn in $\mu\text{m}^3$	Aon in $\mu\text{m}^2$	hn in $\mu\text{m}$	V in $\text{mm}^3$	A <sub>Ges</sub> in $\text{mm}^2$
A13-17	0	0,16	1,108	273	1410	5641	0,090	0,00038	1,54
	90		0,948	341	868	4377	0,098	0,00030	1,49
	180		1,161	161	2771	9926	0,091	0,00045	1,60
	270		1,708	106	5625	15556	0,102	0,00060	1,65
	<b>MW</b>		<b>1,231</b>	<b>220</b>	<b>2668</b>	<b>8875</b>	<b>0,095</b>	<b>0,00043</b>	<b>1,57</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				106	2127	5047	0	0	0
				48	80	57	6	29	4
A13-18	0	0,20	1,138	558	391	2376	0,084	0,00022	1,33
	90		1,052	335	974	4351	0,089	0,00033	1,46
	180		0,895	187	2350	8574	0,114	0,00044	1,60
	270		0,960	208	1782	7468	0,107	0,00037	1,55
	<b>MW</b>		<b>1,011</b>	<b>322</b>	<b>1374</b>	<b>5692</b>	<b>0,099</b>	<b>0,00034</b>	<b>1,49</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				170	865	2843	0	0	0
				53	63	50	14	27	8
A13-19	0	0,18	1,451	105	6007	15876	0,103	0,00063	1,67
	90		1,066	175	2206	9143	0,109	0,00039	1,60
	180		1,369	86	6427	19270	0,128	0,00055	1,66
	270		1,460	124	3713	12985	0,092	0,00046	1,61
	<b>MW</b>		<b>1,337</b>	<b>123</b>	<b>4588</b>	<b>14319</b>	<b>0,108</b>	<b>0,00051</b>	<b>1,63</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				38,2840263	1986,20	4301,4	0,0151	0,000106	0,0334
					499	4088	9482	77	1547
				31	43	30	14	21	2
A13-20	0	0,19	0,713	247	1249	6286	0,082	0,00031	1,55
	90		1,135	199	2027	7972	0,091	0,00040	1,59
	180		1,463	177	2496	8980	0,116	0,00044	1,59
	270		0,942	184	1653	8497	0,088	0,00030	1,56
	<b>MW</b>		<b>1,063</b>	<b>202</b>	<b>1856</b>	<b>7934</b>	<b>0,094</b>	<b>0,00036</b>	<b>1,57</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				32	532	1173	0	0	0
				16	29	15	15	19	1
A13-21	0	0,23	0,980	254	1301	6138	0,091	0,00033	1,56
	90		1,251	133	3870	12172	0,100	0,00051	1,62
	180		0,674	236	1051	6481	0,083	0,00025	1,53
	270		0,948	207	1937	7679	0,107	0,00040	1,59
	<b>MW</b>		<b>0,963</b>	<b>208</b>	<b>2040</b>	<b>8118</b>	<b>0,095</b>	<b>0,00037</b>	<b>1,57</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				53	1276	2783	0	0	0
				26	63	34	11	30	2

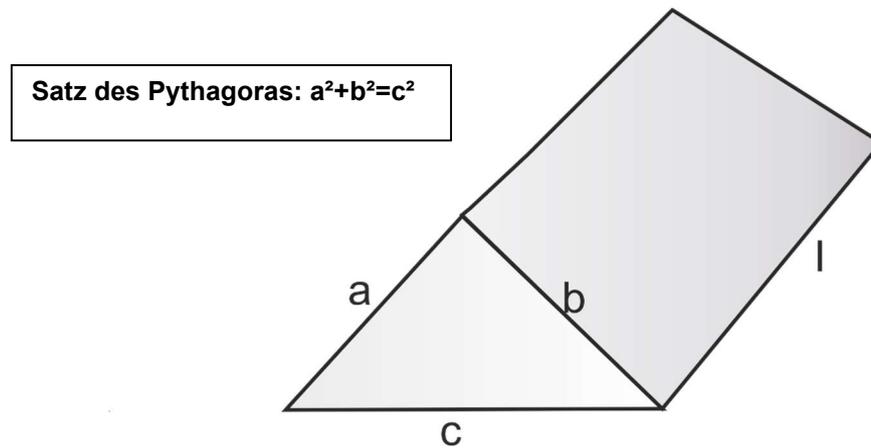
Probe- körper	Position	$\mu_{0.1}$	Abbott- Kurve C1(20%) in $\mu\text{m}$	Insel-Volu- men (20% Traganteil C1)					
				n	Vn in $\mu\text{m}^3$	Aon in $\mu\text{m}^2$	hn in $\mu\text{m}$	V in $\text{mm}^3$	A <sub>Ges</sub> in $\text{mm}^2$
A13-22	0	0,21	1,430	187	2305	8455	0,121	0,00043	1,58
	90		1,035	191	2492	8450	0,123	0,00048	1,61
	180		0,839	185	1899	8528	0,107	0,00035	1,58
	270		0,789	243	1387	6409	0,099	0,00034	1,56
	<b>MW</b>		1,023	202	2021	7961	<b>0,113</b>	<b>0,00040</b>	<b>1,58</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				28	490	1035	0	0	0
				14	24	13	10	17	1
A13-23	0	0,20	0,806	176	1995	9205	0,098	0,00035	1,62
	90		1,176	189	2324	8452	0,120	0,00044	1,60
	180		1,228	147	2881	10866	0,109	0,00042	1,60
	270		1,025	208	2160	7698	0,082	0,00045	1,60
	<b>MW</b>		1,059	180	2340	9055	<b>0,102</b>	<b>0,00042</b>	<b>1,60</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				26	385	1355	0	0	0
				14	16	15	16	11	1
A13-24	0	0,22	0,684	249	1244	6330	0,072	0,00031	1,58
	90		1,076	126	3021	12831	0,110	0,00038	1,62
	180		1,281	144	3257	11302	0,125	0,00047	1,63
	270		1,288	195	2310	8301	0,100	0,00045	1,62
	<b>MW</b>		1,082	179	2458	9691	<b>0,102</b>	<b>0,00040</b>	<b>1,61</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				55					
				31					
A13-25	0	0,20	0,808	163	2366	10001	0,091	0,00039	1,63
	90		0,974	324	1073	4670	0,101	0,00035	1,51
	180		1,103	396	821	3695	0,092	0,00033	1,46
	270		1,126	66	9538	25661	0,092	0,00063	1,69
	<b>MW</b>		1,003	237	3449	11007	<b>0,094</b>	<b>0,00042</b>	<b>1,58</b>
<b>Stab Proz. Anteil</b>				150	4115	10155	0	0	0
				63	119	92	5	33	7

MW aller	219	2302	8344	0,10	0,0004	1,5626
Stabws aller	82,15	1750,95	3880,6	0,02	45	3
Prozentualer Anteil	37,47	76,05	46,51	20,06	27,54	4,05
MW aller MW	219	2302	8344	0	0	2
Stabws aller MW	48,44	995,83	2255,1	0,012	5,8841E-	0,04
Prozentualer Anteil	22,09	43,25	27,02	12,44	14,67455	2,61

**Anlage 21:** Vergleich: Flankenoberfläche – Grundfläche (Schnittfläche)

Annahme:

Idealisierung der Oberflächenstruktur in Prismen mit der Grundstruktur eines allgemeinen Dreiecks.



Die Länge des Oberflächenelementes ist bei der Flankenfläche (a oder b) und der Grund- bzw. geschnittenen Fläche (c) gleich. Da aber der Satz des Pythagoras gilt, ist die Grundfläche -c- immer die größte.

## Anlage 22: Werkstoffkennwerte

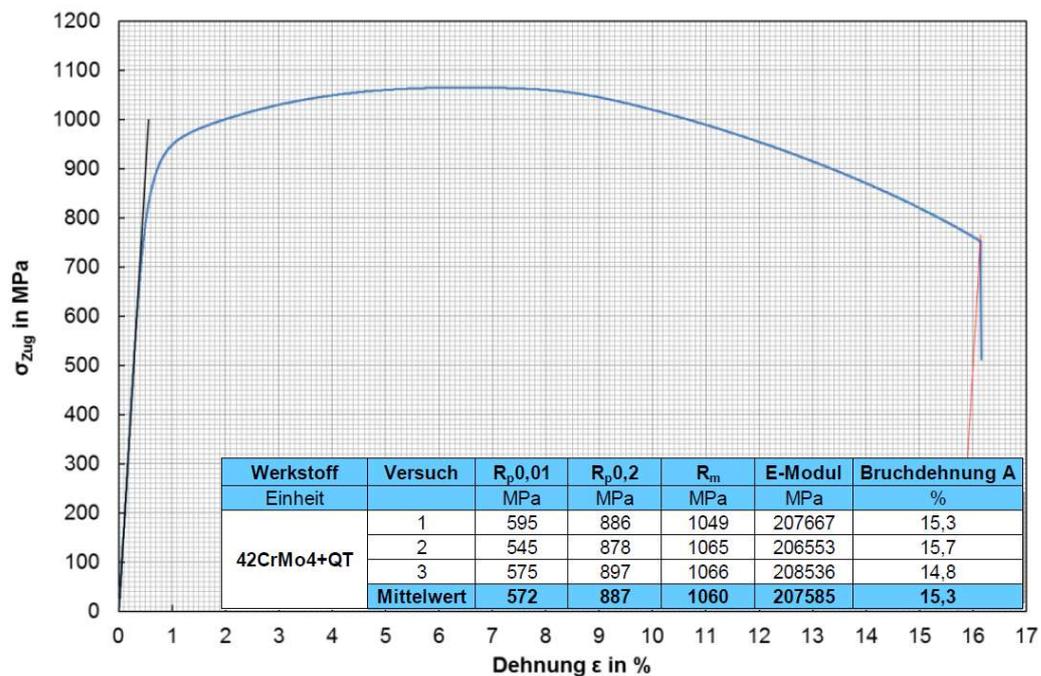
### Chemische Zusammensetzung:

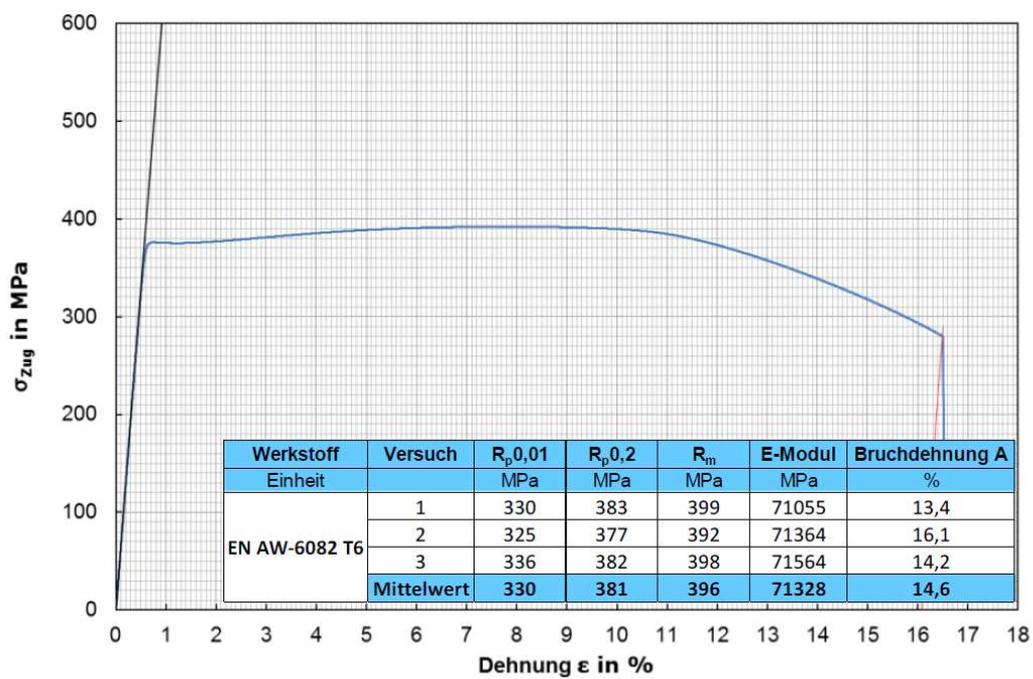
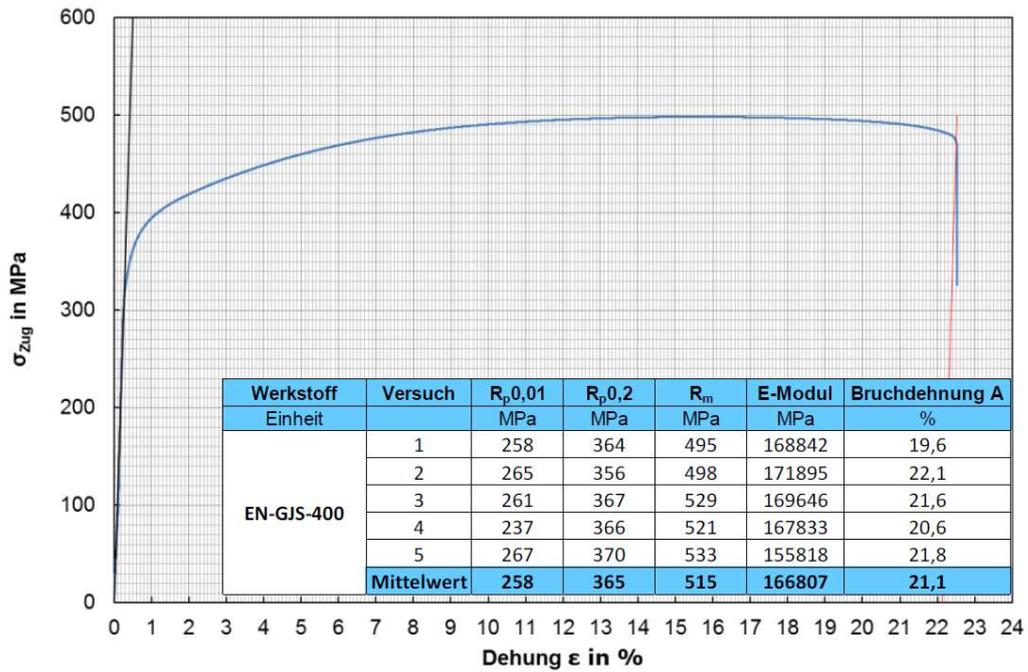
42CrMo4+QT	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr
	0,445	0,272	0,831	0,008	0,034	0,994
	%Ni	%Mo	%Al	%Cu	%Fe	
	0,1	0,186	0,017	0,188	96,8	
EN-GJS 400	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr
	3,43	3,09	0,183	0,023	0,009	0,034
	%Ni	%Mo	%Cu	%Mg	%Fe	
	0,015	0,002	0,033	0,018	92,8	
EN AW 6082T6	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr
	0,98	0,129	0,027	0,576	0,749	0,014
	%Zn	%Ti	%Al			
	0,002	0,016	97,4			

Härtemessungen aus je 10 Einzelmessungen:

Werkstoff	EN AW-6082 T6	42CrMo4+QT	EN-GJS-400
Verfahren	HBW 2,5 / 62,5	HV 30	HV 30
Mittelwert	112,3 HBW 2,5/62,5	320,4 HV30	186,7 HV30
Standardabweichung	1,1	15,1	4,0

### Spannungs-Dehnungsdiagramme:





## 15 Veröffentlichungen

- Gerlach, M.; Gröger, S.; Schiefer, S.: Funktionale 3D-Charakterisierungsmethode für Dichtflächen an Zylindern; Functional 3D-Characterization Method for Sealing Surfaces of Cylinders. 17th ISC 13-14.09.2012 Stuttgart. - Frankfurt: Leithner GmbH & Co.KG, S. 427-436, 2012.
- Schiefer, S, Gerlach, M, Gröger, S.: Markierung von Oberflächen mittels Härteeindrücke zur Bildung eines Koordinatensystems. Poster, XIII. Internationales Oberflächenkolloquium: 1. Treffen "Industry meets standardization and science" – IMSAS; Kanten und Radien; TU Chemnitz, IFMQ, 12.-14. März 2012.
- Gerlach, M.; Gröger, S.; Schiefer, S.; Gräfensteiner, M.; Leidich, E.; Berger, L-M.; Spatzier, J.: Untersuchungen an thermisch gespritzten Hartmetallschichten zur Steigerung des Haftreibwertes; Investigations of Sprayed Hardmetal Coatings for an Increase of the Static Friction Coefficient. WTK 2013: Tagungsband zum 16. Werkstofftechnischen Kolloquium und zur 10. Industriefachtagung Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik, September 05.-06.2013, Chemnitz, TU Chemnitz, Deutschland, 2013.
- Gräfensteiner, M.; Leidich, E.; Berger, L.-M.; Shakhverdova, I.; Schiefer, S.; Gerlach, M.: Thermisch gespritzte Hartmetallschichten zur Steigerung des Haftreibwertes; Investigation of Hardmetal Coatings for Static Friction Applications. 16. Werkstofftechnisches Kolloquium, 05.-06. September 2013, Chemnitz, Band 50, S.107 – 116, 2013.
- Schiefer, S.; Gerlach, M.; Gröger, S.: Marking system: the key to repeatable measurements and the basis of a functional surface characterization. ISMTII 2013, 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Metrology - Master Global Challenges, July 1st - July 5th, 2013, RWTH, Aachen, Germany, S. 305-306, 2013.
- Spatzier, J.; Berger, L-M.; Schiefer, S.; Gerlach, M.; Gröger, S.; Leidich, E.; Vidner, J.; Gräfensteiner, M.: Investigation of HVOF-Sprayed Hardmetal Coatings for Static Friction Applications. Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2013, Busan, Republic of Korea, 13-15 May 2013.

- 
- Gerlach, M.; Gröger, S.; Schiefer, S.: Funktionale 3D-Charakterisierungsmethode für Ebene und Zylinderflächen; Increase of the Static Friction Coefficient cylindrical surfaces. 4. Symposium Produktionstechnik - innovativ und interdisziplinär, 17./18. April 2013, Westsächsischen Hochschule Zwickau, 2013.
  - Schiefer, S.; Gerlach, M.; Gröger, S.: Function-based geometrical 3D surface characterization. WCT 2013: 5th World Tribology Congress, September 08.-13.2013, Torino, Palaolimpico, Italy, 2013.
  - Schiefer, S.; Gerlach, M.: THE HOLLISTIC EXTRACTION OF FUNCTIONAL ENGINEERING SURFACES AND THE OPPORTUNITIES OF A 3D CHARACTERIZATION. 4th International Conference on Surface Metrology (ICSM), 10 – 13 March 2014, Hamburg, 2014.
  - Schiefer, S.; Gerlach, M.; Gröger, S.; Gräfensteiner, M.; Leidich, E.: THE TACTILE TOPOGRAPHY MEASUREMENT OF FUNCTIONAL ENGINEERING SURFACES AND THE OPPORTUNITIES OF A 3D CHARACTERISATION. XIth International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, 02.04.-04.04.2014 University of Bielsko-Biala, Polen, 2014.
  - Berger, L.-M.; Shakhverdova, I.; Puschmann, R.; Gräfensteiner, M.; Leidich, E.; Schiefer, S.; Gerlach, M.: Investigation of HVOF-sprayed (Ti,Mo)(C,N)-Ni hardmetal coatings for static friction applications. International Thermal Spray Conference, ITSC 2014: abstracts (including manuscripts on CD-ROM) of the conference in Barcelona/Spain on May 21 - 23, 2014.
  - Schiefer, S.; Gerlach, M.; Leidich, E.; Gräfensteiner, M.: Ganzheitlicher Ansatz zur Beschreibung von Oberflächengeometrien und deren Einfluss auf das Reibwertverhalten von Stahloberflächen; Holistic approach for surface geometry characterisation and the influence on the friction behaviour of steel surfaces. Reibung, Schmierung und Verschleiß: Forschung und praktische Anwendungen; 55. Tribologie-Fachtagung (GfT), 22. bis 24. September 2014, Göttingen, 2014.

- 
- Schille, J.; Ullmann, F.; Schneider, L.; Gräfensteiner, M.; Schiefer, S.; Gerlach, M.; Leidich, E.; Exner, H.: Experimental Study on Laser Surface Texturing for Friction Coefficient Enhancement. Journal of Laser Micro Nanoengineering. - 10. 2015, 3, pp.245-253, 2015.
  - Schiefer, S.; Gerlach, M.; Martin, A.: FUNCTIONAL SURFACE CHARACTERIZATION AND THE IMPACT OF FLATNESS DEVIATIONS. XIII International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biala, 11th – 13th April, 2018.
  - Schiefer, S.; Seewig, J.; Gerlach, M.: Messunsicherheitsbetrachtung für die Ermittlung von Haftreibungswerten zur Korrelationsfindung geometrischer Kenngrößen. 62. Tribologie-Fachtagung 2021, Reibung, Schmierung und Verschleiß, Forschung und praktische Anwendungen (GfT), 27. bis 29. September 2021, Göttingen, 2021.
  - Schiefer, S.; Seewig, J., Gerlach, M.: Erstellung des Messunsicherheitsbudgets eines Torsions-prüfstandes und dessen Eignungsuntersuchung als Basis der funktional-geometrischen Korrelation. 10.VDI-Fachtagung: Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen – Prüfprozesse in der industriellen Praxis, Erfurt, 10. – 11. November, 2021.

## 16 Betreuung studentischer Arbeiten

- Halbas Tobias: Bildung eines Bezugsflächensystems zur Bewertung von 3D-Oberflächen, Bachelorarbeit, 2013.
- Schettler, Sebastian: Erfassung und Bewertung von geometrischen Strukturen technischer Oberflächen bei Verschleiß, Seminararbeit, 2013
- Schuppenhauer, Frank Marcel: Bewertung der Einflussfaktoren für den Prozess der Haftreibwertbestimmung, Studienarbeit, 2014.
- Lange, Marcel: Ableitung einer Strategie zur Auswahl von Filtern für die Trennung von Gestaltabweichungen, Studienarbeit, 2013.
- Schuppenhauer, Frank Marcel: Untersuchung von Form- und Lageabweichungen auf das funktionale Verhalten von technischen Oberflächen, Bachelorarbeit, 2014.

## 17 Lebenslauf

### PERSÖNLICHE DATEN

Name Saskia Schiefer

### BERUFLICHER WERDEGANG

Seit 11.2017 **Q-DAS GmbH**, Chemnitz  
Trainer und Consultant für Fertigungsmesstechnik, GPS-Tolerierung, Prüfplanung, Qualitätssicherung

05.2016 – 11.2017 **BMW Group**, München  
Spezialistin Karosserie, Konzeptfahrzeugbau Bereich Messtechnik

01.2015 – 02.2016 **Auslandsaufenthalt**

07.2013 – 09.2013 **Handwerkskammer Chemnitz**, Chemnitz  
Dozentin für die Meisterausbildung für Feinwerkmechaniker

04.2012 – 12.2014 **Professur Fertigungsmesstechnik/Qualitätssicherung**,  
**TU Chemnitz**, Chemnitz  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin

### AUSBILDUNG

10.2006 – 02.2012 **TU Chemnitz, Maschinenbau/Produktionstechnik**  
**Vertiefung: Werkzeugmaschinen und Produktionstechnik**  
Abschluss: Diplom-Ingenieur  
Vertiefung: Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

08.2003 – 07.2006 **BSZ Annaberg-Buchholz für Technik, Ernährung und Wirtschaft**  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

---