
Workshop

Oberflächenstrukturierung

SITEC Industrietechnologie GmbH

20. Oktober 2010



SAB
Sächsische AufbauBank

Europa fördert Sachsen.



Fraunhofer
IWU



Gliederung

Workshop Oberflächenstrukturierung

- Technologische und wirtschaftliche Effekte der Oberflächenstrukturierung
 - Grundlagen
 - Möglichkeiten zur Optimierung des tribologischen Verhaltens von Reibpartnern
- Strukturierungsmöglichkeiten
 - Mechanische Strukturierung
- Messtechnik
 - Reibversuche

Technologische und wirtschaftliche Effekte der Oberflächenstrukturierung

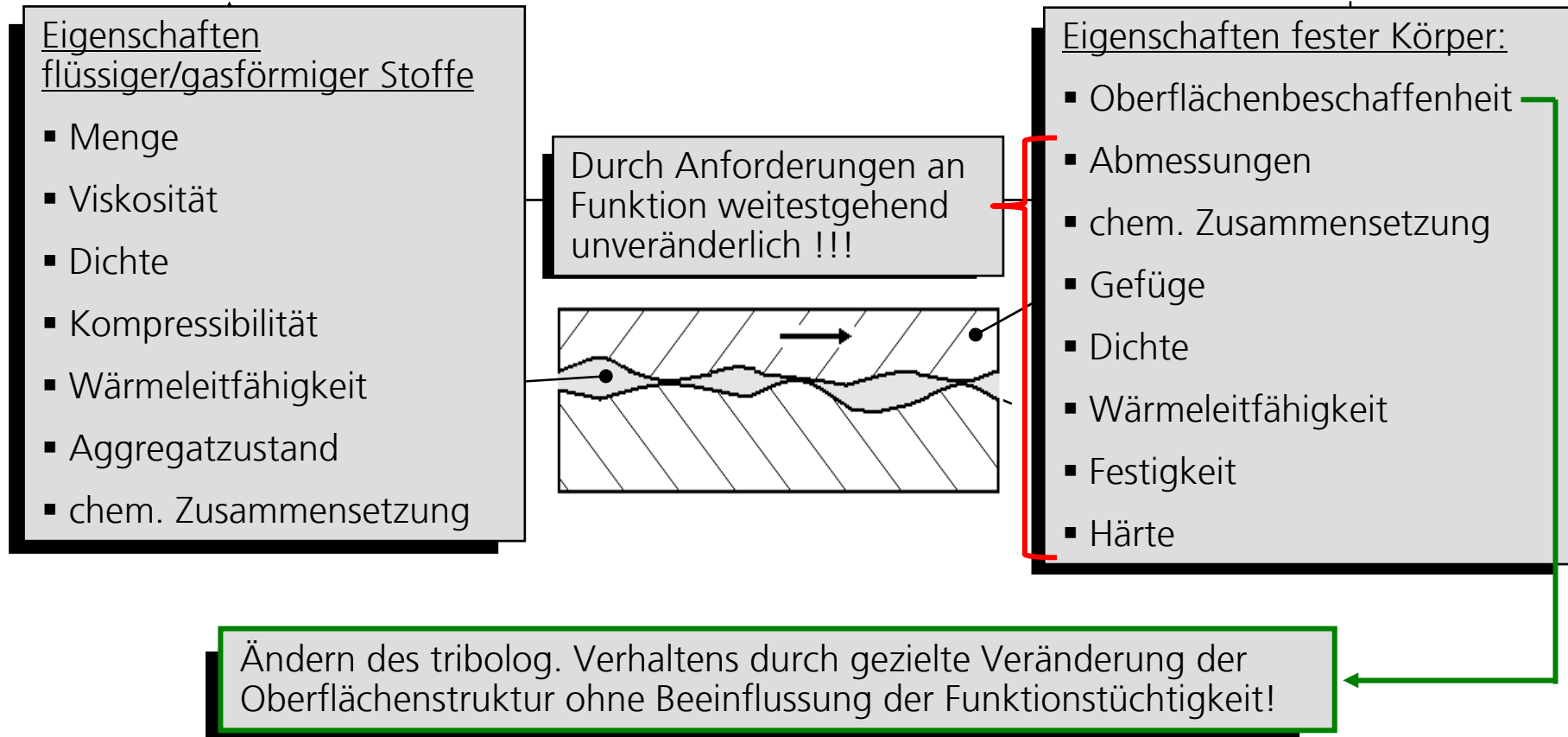
- Grundlagen
- Möglichkeiten zur Optimierung des tribologischen Verhaltens von Reibpartnern

Allgemein

- Durch Reibung und Verschleiß entstehen den Volkswirtschaften der Industrieländer jährliche Verluste in Höhe von etwa 5% des Bruttosozialproduktes; das bedeutet für Deutschland ca. 35 Mrd. EUR/Jahr.
- Durch Umsetzen des bereits vorhandenen tribologischen Wissens könnten davon 5 Milliarden EUR/Jahr eingespart werden. Durch weitere tribologische Forschung kann dieses Sparpotential noch gesteigert werden.
- Die verstärkte Berücksichtigung tribologischer Kenntnisse bewirkt beträchtliche Einsparungen bei Energie- und Materialeinsatz, Produktion und Instandhaltung. Energie- und Rohstoffressourcen werden geschont, Umweltschäden vermieden und der Arbeitsschutz verbessert.

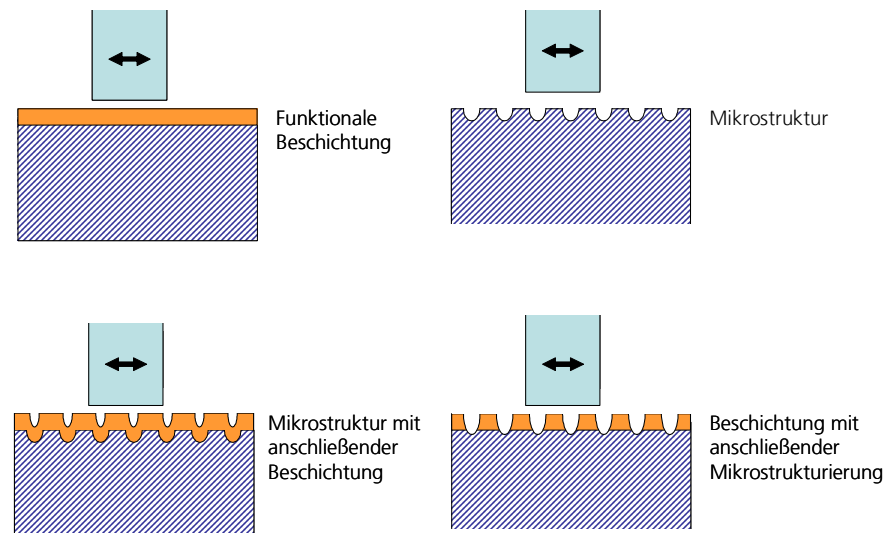
Quelle: Gesellschaft für Tribologie www.gft-ev.de

Ausgangssituation tribotechnisches System



Zielstellung und Lösungsansatz

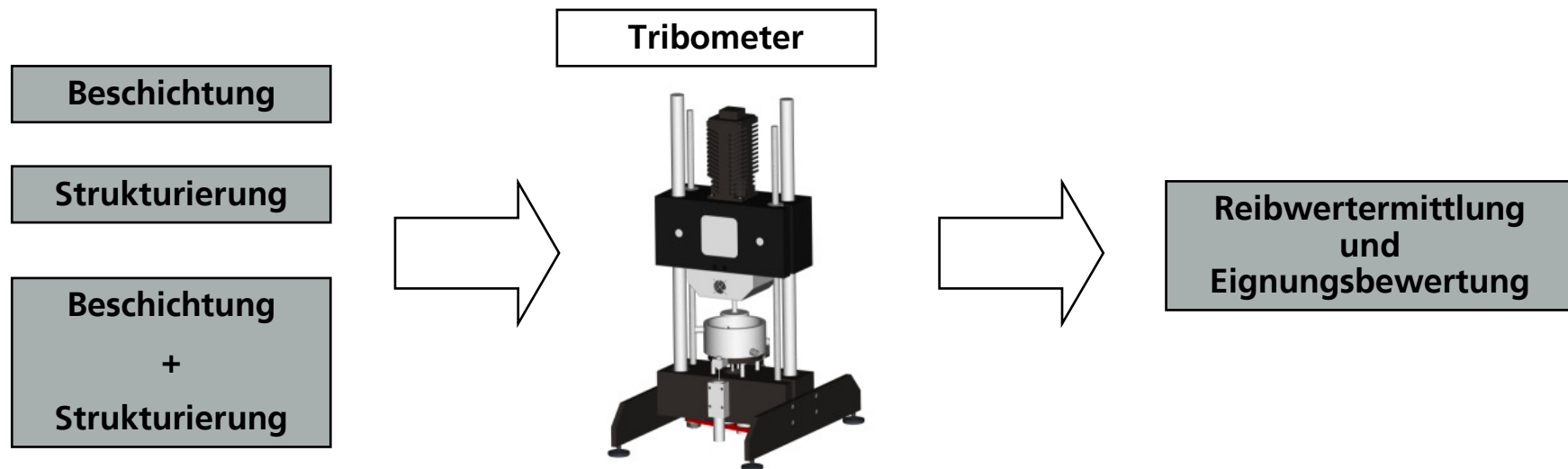
Zielstellung ist es, **in Bewegungsachsen von Maschinen und Anlagen durch reibungsmindernde Maßnahmen Verschleiß- und Fresserscheinungen zu minimieren** oder zu vermeiden und damit die Voraussetzung für den Einsatz leichter und schneller Antriebe zu schaffen, mit denen eine höhere Energieeffizienz erreicht werden kann. Solche **Verbesserungen können durch Beschichtungen, Werkstoffsubstitution, Masseinsparungen oder mit strukturierten Oberflächen, in denen reibungsmindernde Stoffe oder Medien eingelagert sind, erreicht werden.**



Eckert, U.

Vorgehensweise

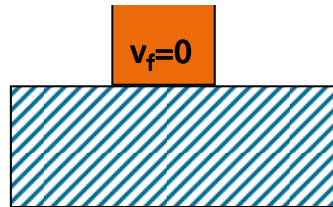
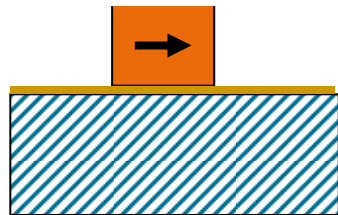
Es werden, **aufbauend auf tribologischen Grundlagenbetrachtungen** zu Reibung und Verschleiß, sowohl **Beschichtungen** als auch dreidimensionale **Mikrostrukturen ausgelegt, hergestellt** und **auf ihr tribologisches Verhalten getestet**.



Eckert, U.

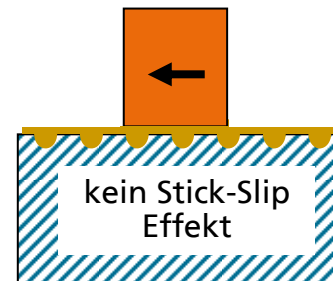
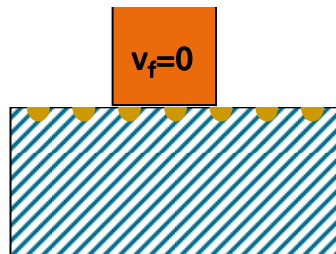
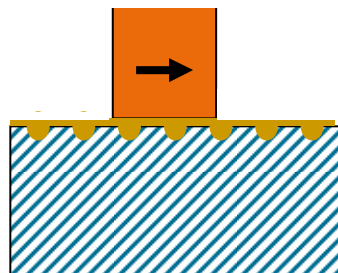
Prinzipdarstellung zum beabsichtigten Reibverhalten

ohne Mikrostruktur



- Kein ausreichender Schmierfilm bei Richtungswechsel
- Haftreibung stark ausgeprägt, bedingt hohes Losbrechmoment
- Gefahr von Stick-Slip

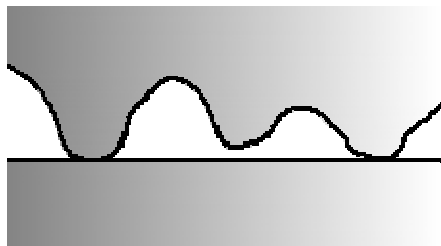
mit Mikrostruktur



- Geringer Kraftaufwand zur Überwindung der Haftreibung
- Mischreibung und optimierte Kontaktbedingungen auch bei kleinsten Geschwindigkeiten

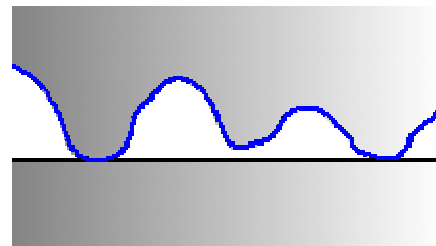
Eckert, U.

Reibungszustände



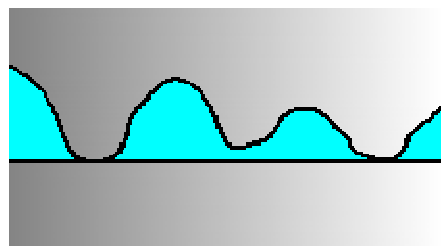
Direkter Kontakt
der Reibpartner

Festkörperreibung



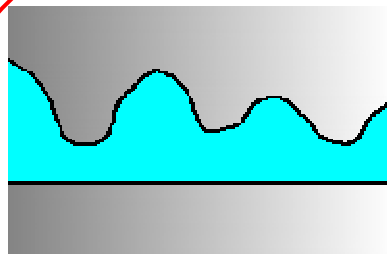
Abstand zwischen
den Reibpartnern im
Bereich der
Molekülgröße des
Schmierstoffes

Grenzkörperreibung



Abstand zwischen
den Reibpartnern
nur örtlich im
Bereich der
Molekülgröße des
Schmierstoffes

Mischreibung



Völlige Trennung
der Reibpartner
durch Schmierstoff

Hydrodynamische Reibung

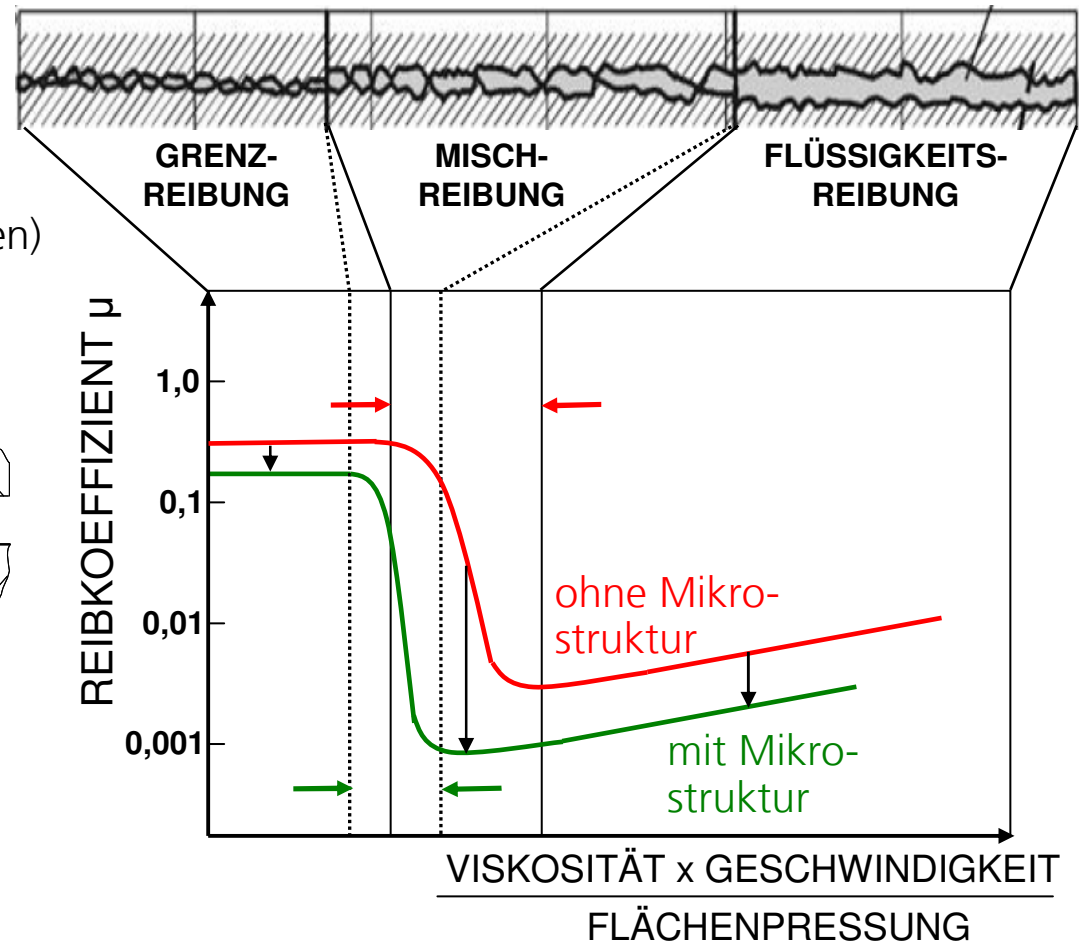
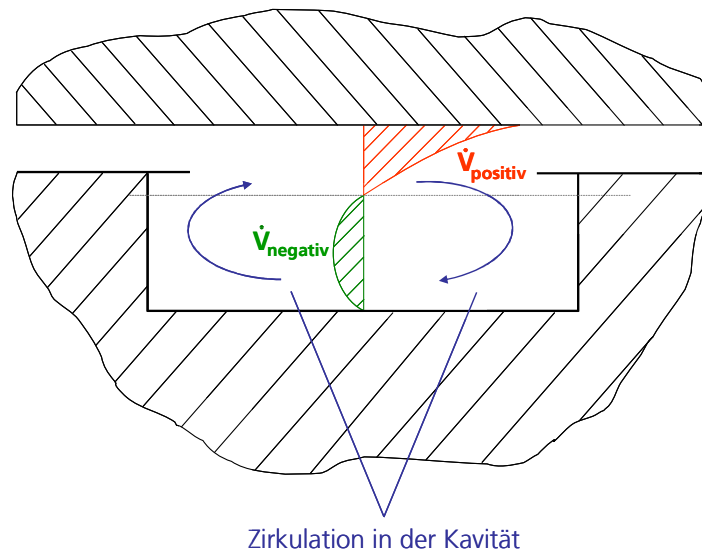
Eckert, U.

Quelle: www.tedata.com/688.0.html

Wirkungs- und Funktionsweise

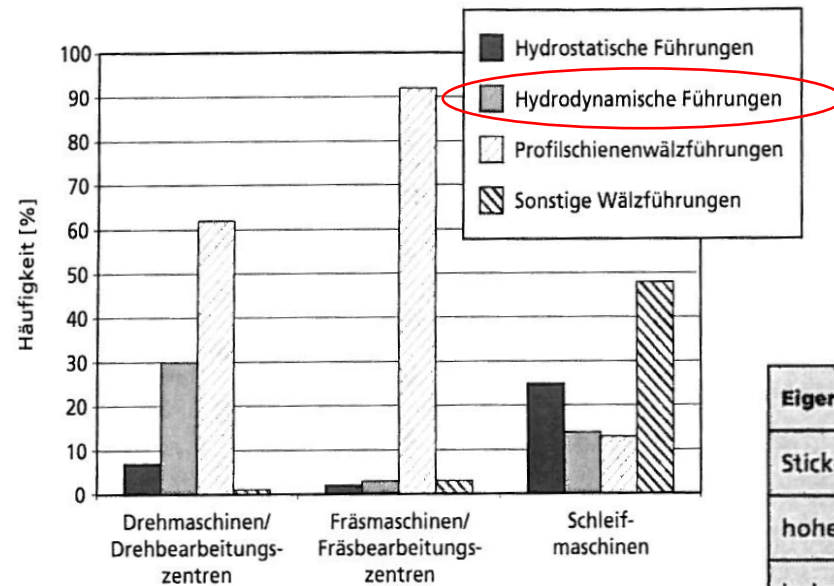
Durch Strukturierung:

1. Übergangspunkte verschieben (Mischreibungsgebiet einschnüren)
2. Reibniveau senken



Eckert, U.

Häufigkeit und Bewertung unterschiedlicher Führungsprinzipien



Typische Werkstoffe:

- Aluminium (eloxiert), nitrierter Stahl (gezogen), Grauguss (geschliffen)

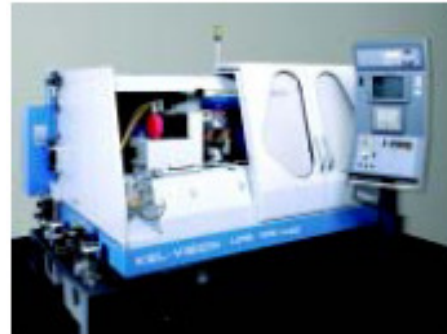
- Leg. Kaltarbeitsstahl

X100CrMoV5-1 (1.2363), 90MnCrV 8 (1.2842),
X210Cr12 (1.2080), X210CrW12 (1.2436)

Eigenschaft und Zielforderung	wälz- gelagert	hydro- dynamisch	aero- statisch	hydro- statisch
Stick-Slip-Neigung	↔	↑	↓	↓
hohe Steifigkeit	↔	↑	↓	↑
hohe Dämpfung	↓	↔	↑	↑
Verschleiß / Reibung	↔	↑	↓	↓
Tragkraft	↔	↑	↓	↑
geringer Aufwand für Schmiersystem	↑	↔	↔	↓
Kosten (Beschaffung, Wartung)	↓	↔	↑	↑

Quelle: Knödel, A.: „Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit“, Shaker Verlag 2008

Beispiele / Anwendungen Gleitführungen



Schleifmaschine mit klassischen Gleitführungen (Quelle: Kellenberger & Co. AG)



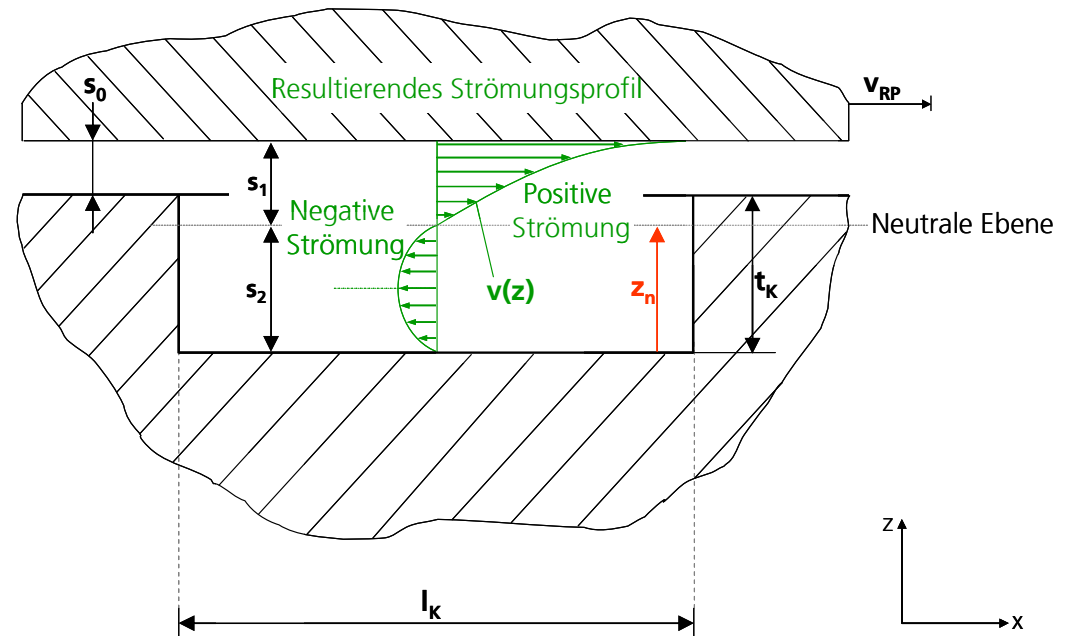
Portalfräszentrum mit robusten, nachstellbaren, schwingungs-gedämpften Gleitführungen (Quelle: AXA Entwicklungs- und Maschinenbau GmbH)

Einständer-Exzenterpresse mit Stößel in 6-Bahnen-Gleitführung
(Quelle: UTE Maschinen Vertriebs GmbH)

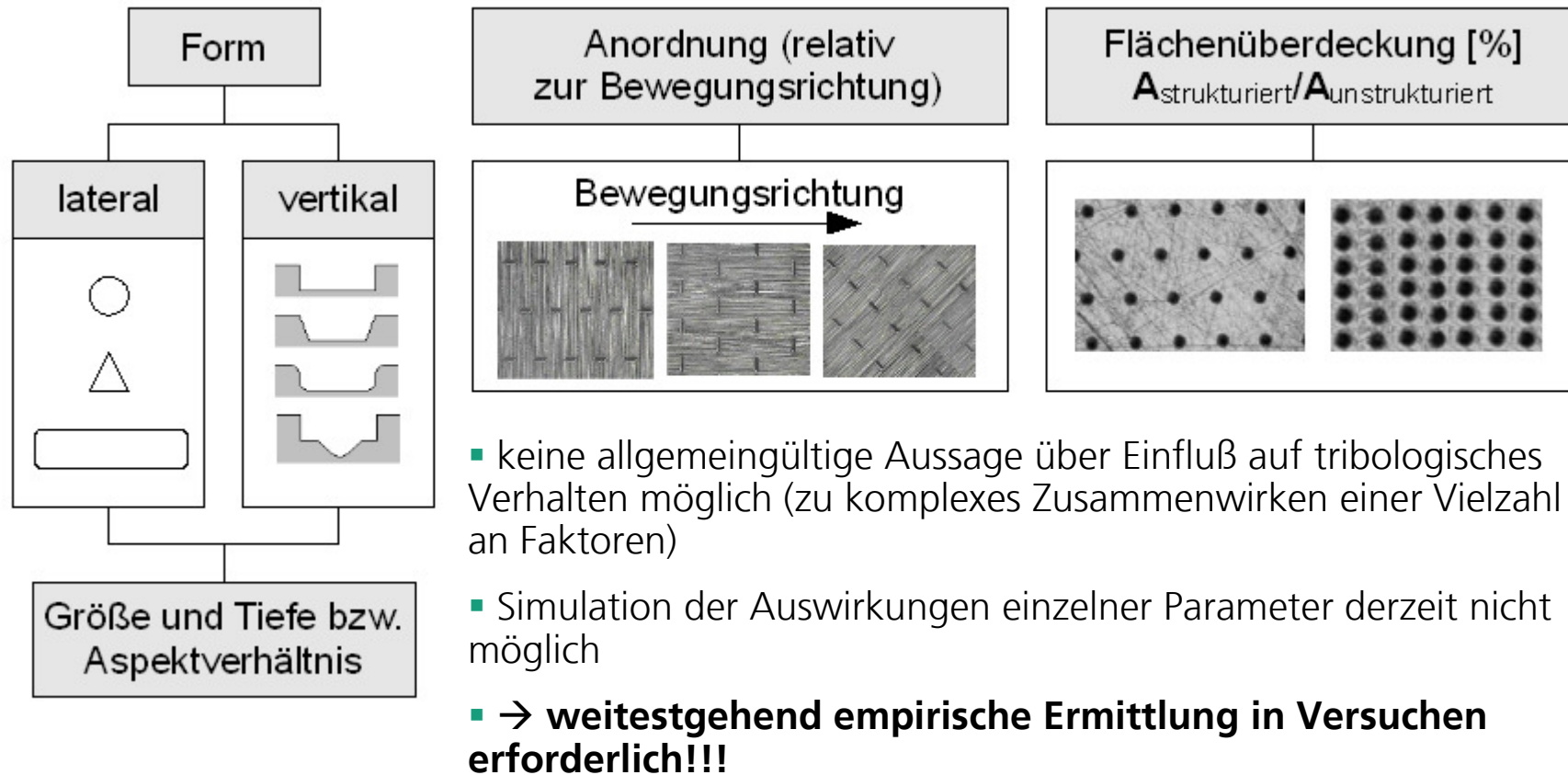
Eckert, U.

Effekte durch Strukturierung

- Reservoir für Schmierstoff → Bereitstellung des Schmierstoffes direkt in der Kontaktstelle
 - Erzeugung hydrodynamischer/ hydrostatischer Staudrücke (geschlossene Strukturen)
 - Reserven bei Ausfall der Schmiermittelversorgung (Notlaufeigenschaft)
 - Aufnahme von abrasiv wirkenden Verschleißpartikeln
- Effekte sind abhängig von **geometrischen Parametern** der Strukturen

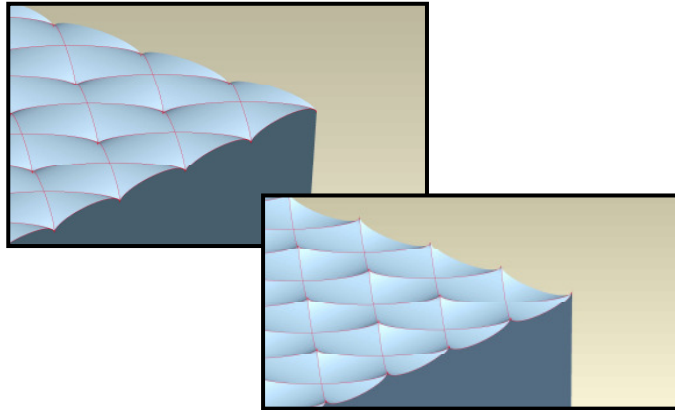


Geometrische Parameter

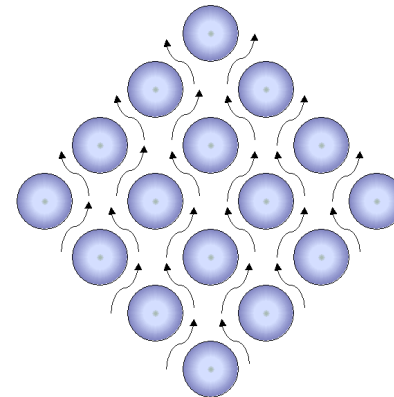
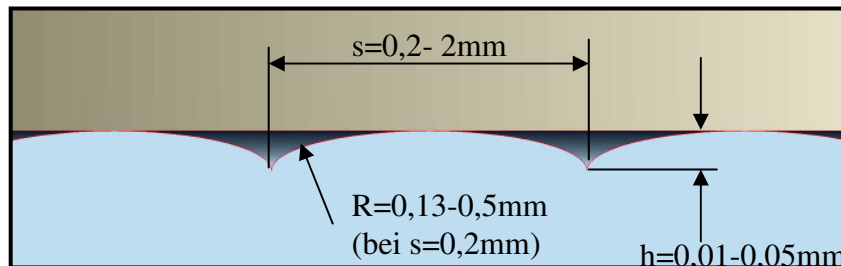


Eckert, U.

Strukturvariante Kissen/Tasche

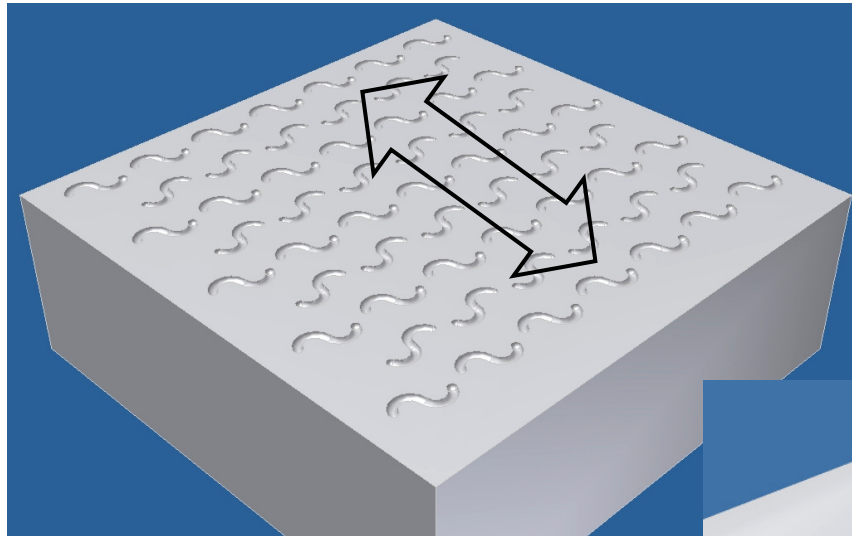


- kommunizierendes System
- die einzelnen Strukturelemente sind versetzt zur Fahrerrichtung angeordnet
- das Schmiermittel wird zur ständigen Richtungsänderung gezwungen
- jede Änderung der Richtung kommt einer Stauung gleich, welche den Druck erhöht
- aufgrund dieser hydrodynamischen Vorgänge wird ein Aufschwimmen des Tribopartners erreicht



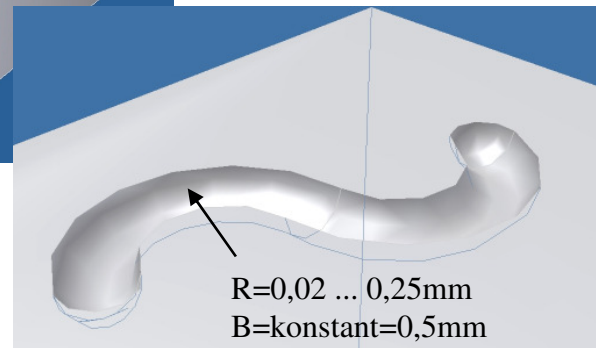
Schematischer Schmiermittelfluß

Strukturvariante Mäander



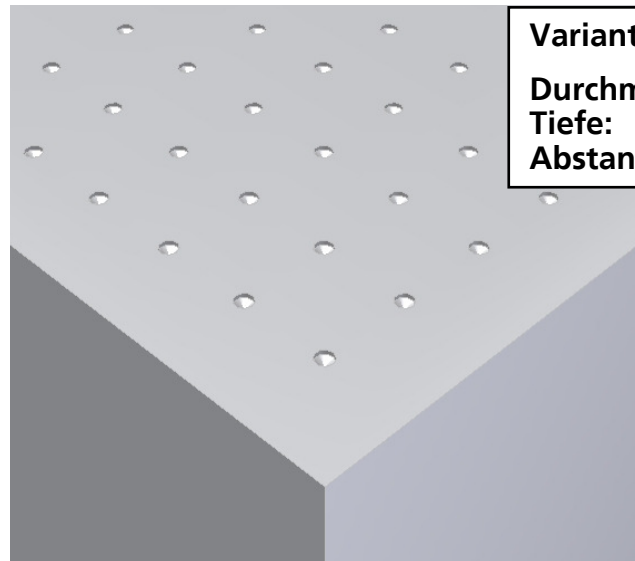
Beispieldarstellung Wirkprinzip

- geschlossenes System
- Strukturen senkrecht zur Fahrtrichtung eingebracht
- beim überqueren des Tribopartners ändert sich der Querschnitt des jeweiligen Strukturelements und das Schmieröl kann somit Druck aufbauen



Detail

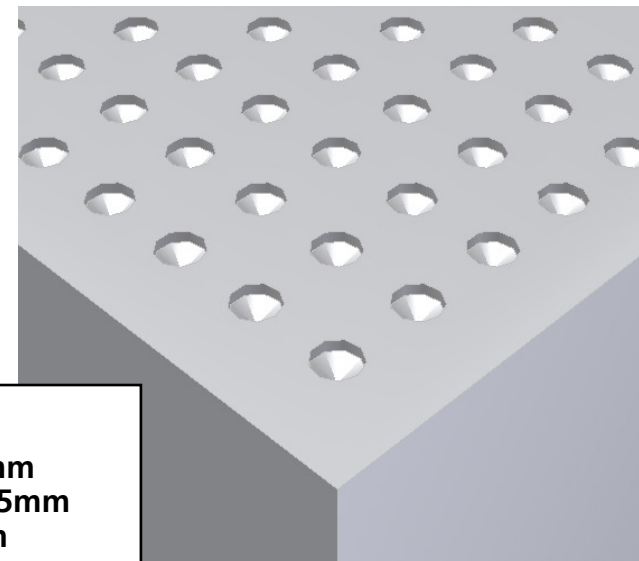
Strukturvariante Bohrungsraster



Variante 1

Durchmesser: 0,2mm
Tiefe: 0,05mm
Abstand: 1mm

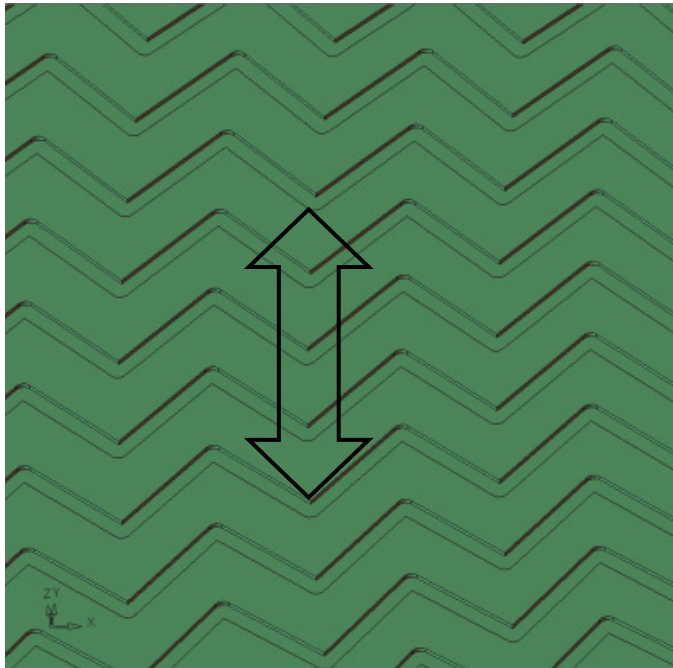
- geschlossenes System
- Relativbewegung der Tribopartner erzeugt hydrodynamischen Staudruck



Variante 2

Durchmesser: 0,5mm
Tiefe: 0,125mm
Abstand: 1mm

Strukturvariante Kanalstruktur

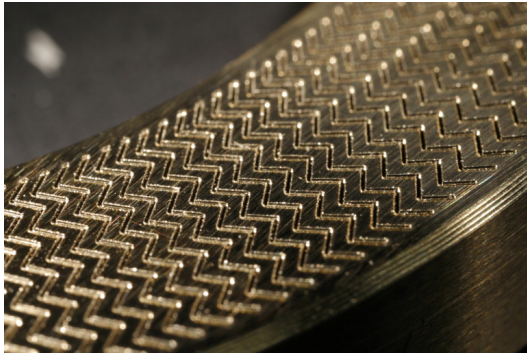


- richtungsgebunden kommunizierendes System
- Strukturen senkrecht zur Fahrerrichtung eingebracht
- beim überqueren des Tribopartners ändert sich der Querschnitt des jeweiligen Strukturelements und das Schmieröl kann somit Druck aufbauen

Strukturierungsmöglichkeiten

- Mechanische Strukturierung

Mechanische Strukturierung - Allgemein



Mikrostrukturierte Probekörperoberfläche...



...für tribologische Untersuchungen

- Bearbeitung hochfester/ hochwarmfester Werkstoffe
- Hohe Flexibilität hinsichtlich Design von Strukturelementen und Kavitäten speziell für prototypische Anwendungen
- teils hoher Fertigungsaufwand für die Herstellung der Strukturen (Werkzeugverschleiß, Bearbeitungszeit, Gratbildung, etc.)
- Strukturierung von Reibpartnern zur Bewertung mikrostrukturierter Oberflächen

Charakterisierung Mikrozerspanungsprozess

- Werkzeugdurchmesser $< 1\text{ mm}$
- relativ große Schneidkantenverrundung im Verhältnis zum Werkzeugdurchmesser
- Stauchungen und Quetschungen bei Unterschreiten der Mindestspanungsdicke
- geringe Steifigkeit der Werkzeuge durch ungünstiges L/D-Verhältnis
- Abdrängverhalten durch Prozesskräfte
- Einstellgrößen stark abhängig von Werkstoff und Werkzeug
- Größeneffekte bei der Skalierung von der Makro- zur Mikrobearbeitung unberücksichtigt
- Einflussfaktoren auf den Prozess und deren Interaktion weitgehend unbekannt
- Abbildung der Vorgänge in der Scherzone gegenwärtig nicht möglich

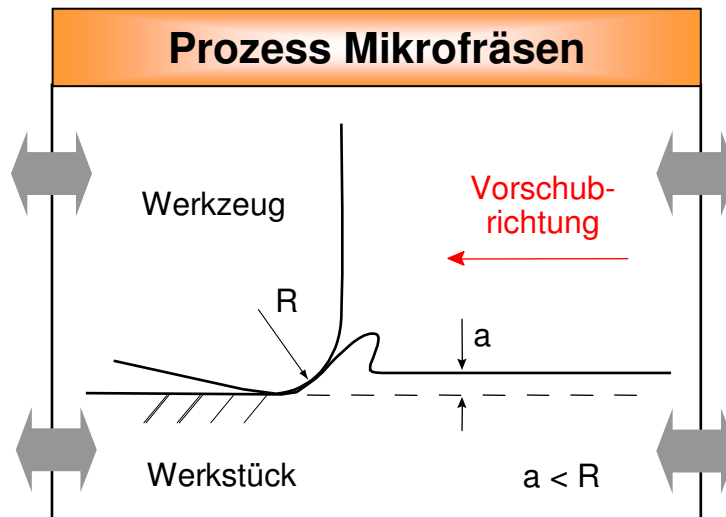
Einflussfaktoren auf den Mikrozerspanungsprozess

Werkzeug

- Durchmesser
- Schneidenlänge
- Schneidenzustand
- Schneidkantenradius
- Werkzeugwerkstoff
- Gesamtgeometrie

Technologie

- 3-/5-achsig
- Gleich-/Gegenlauf
- Bearbeitungsstrategie



Maschine

- Achsanzahl
- Positioniergenauigkeit
- Spindeldrehzahl
- Rundlaufgenauigkeit
- Achsdynamik
- Steifigkeit/therm. Verh.

Werkstück

- Werkstückwerkstoff
- Härte
- Gefügestruktur

5-Achs Mikrobearbeitungszentrum Kugler MM3



- zweiteiliges schwingungsgedämpftes
- Granit-Gestell
- hervorragende Steifigkeit
- hydro-/aerostatische Lagerung
- Linearantriebe (digital geregelt)
- Drehzahlbereich bis 160.000 min⁻¹
- absolute Positioniergenauigkeit im Raum = $\pm 2.5 \mu\text{m}$
- Zerspanvolumen 250 x 150 x 200 mm
- mögliche Fertigungsverfahren: Fräsen, Bohren, Drehen, Drehfräsen, Sonderverfahren Diamantbearbeitung

Kugler Micromaster® MM3

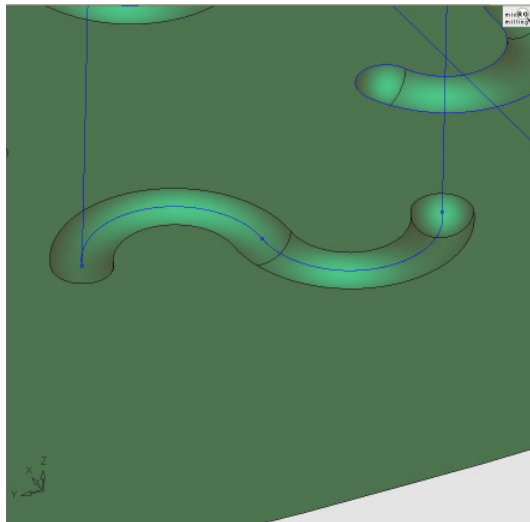
Eckert, U.

Bearbeitungsstrategien Mäanderfertigung



3-Achs Höhenlinie

- hoher Bearbeitungsaufwand (Zeit, WZ-Verschleiß)
- verhältnismäßig starke Gratbildung

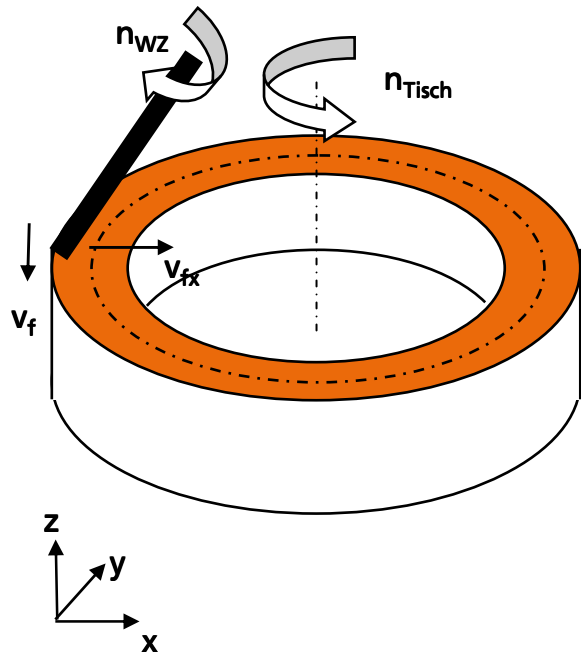


3-Achs Konturlinie

- sehr wirtschaftliche Bearbeitungsstrategie (ca. nur 1/6 der Bearbeitungszeit Höhenlinienfräsen)
- geringe Gratbildung, optimale Schnittbedingungen, Einsatz größerer Werkzeug-Ø gegenüber Höhenlinienfräsen
- Aber: Formwerkzeug erforderlich, damit nicht alle Strukturvarianten realisierbar

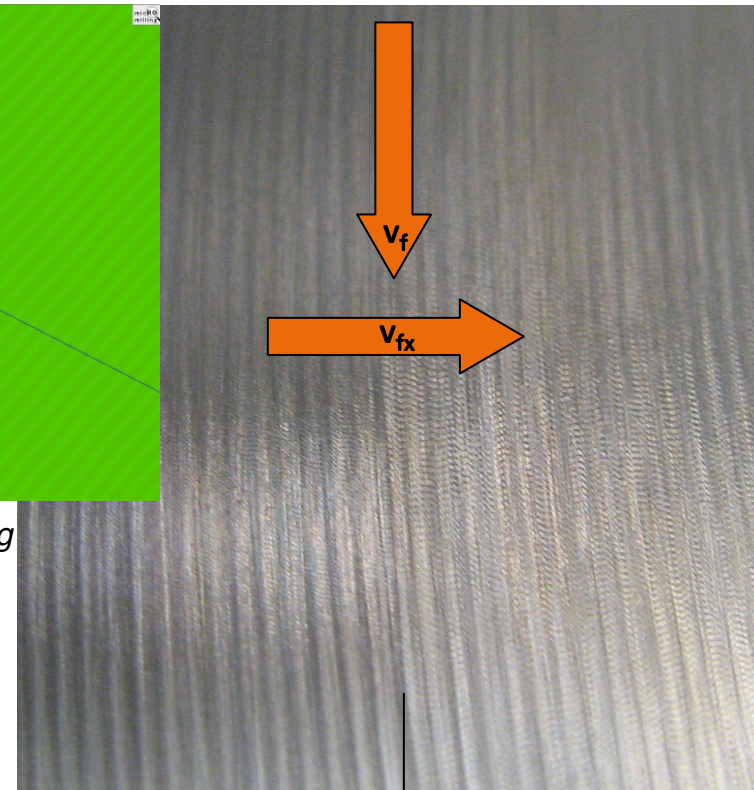


Drehfräsen Wellenprofil



CAM-Modell mit WZ-Weg

Testbearbeitung

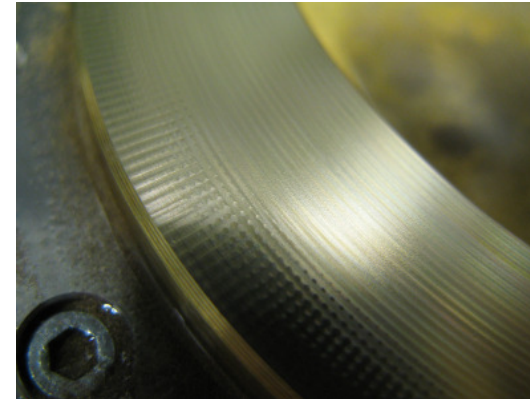


3-Achs Konturlinienbearbeitung beim Drehfräsen

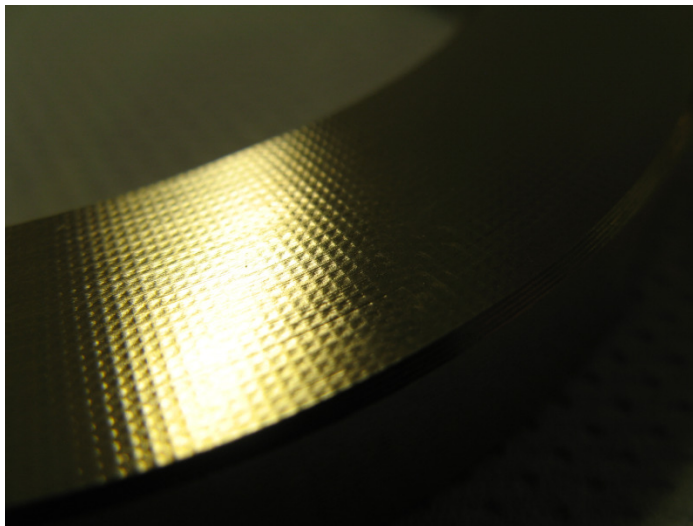
- Werkzeugbewegung entsprechend der programmierten Konturlinie, Drehzahl Tisch ergibt v_f
- optimale Kombinationen von v_f und v_{fx} für anforderungsgerechte Strukturausformung und Oberflächentopographie erforderlich
- Potential für Überlagerung in weiteren Achsen

Taschen-/Kissenstruktur

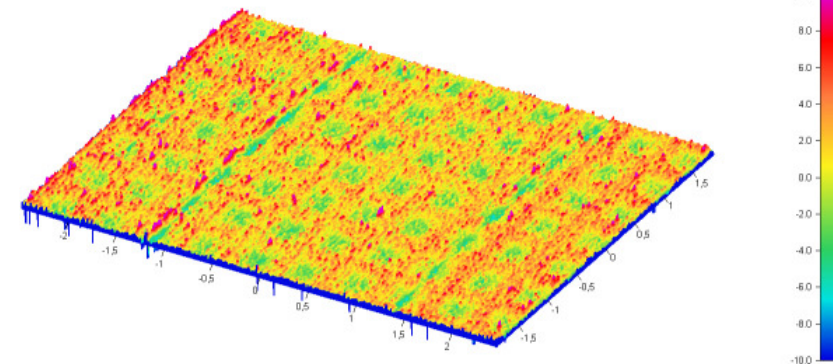
- Drehfräsen mit Überlagerung in weiteren Achsen nicht reproduzierbar
- alternative Fertigungsverfahren: 3-Achs Spiralfräsen
- erfolgreiche Realisierung der Strukturvariante auf gesamter Ringfläche



Fehlerbehaftete Strukturvariante (Drehfräsen)



Eckert, U.



Beispiel für Strukturierung durch 3-Achs Spiralfräsen

Messtechnik

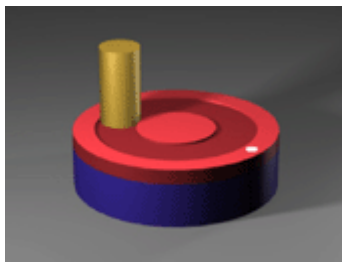
■ Reibversuche

Tribologische Prüfung von Reibung und Verschleiß

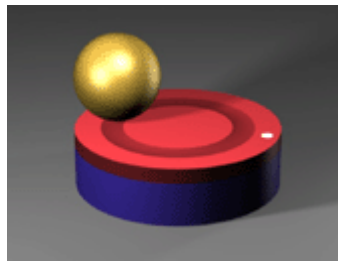
Mit tribologischen Prüfungen werden unterschiedliche Ziele verfolgt, die sich folgendermaßen unterteilen lassen:

- Optimieren von Bauteilen bzw. tribotechnischen Systemen
- Bestimmung verschleißbedingter Einflüsse auf die Gesamtfunktion von Maschinen
- Verschleißforschung, mechanismenorientierte Verschleißprüfung
- Schadensanalyse

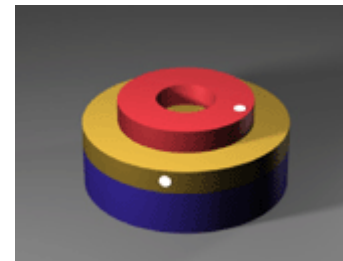
Prüfanordnung



Stift-Scheibe



Kugel-Scheibe



Ring-Scheibe

Bewegungsformen können sein: intermittierend, rotierend, oszillierend und bohrend

Eckert, U.

Tribometer Wazau TRM500 / TRM5000



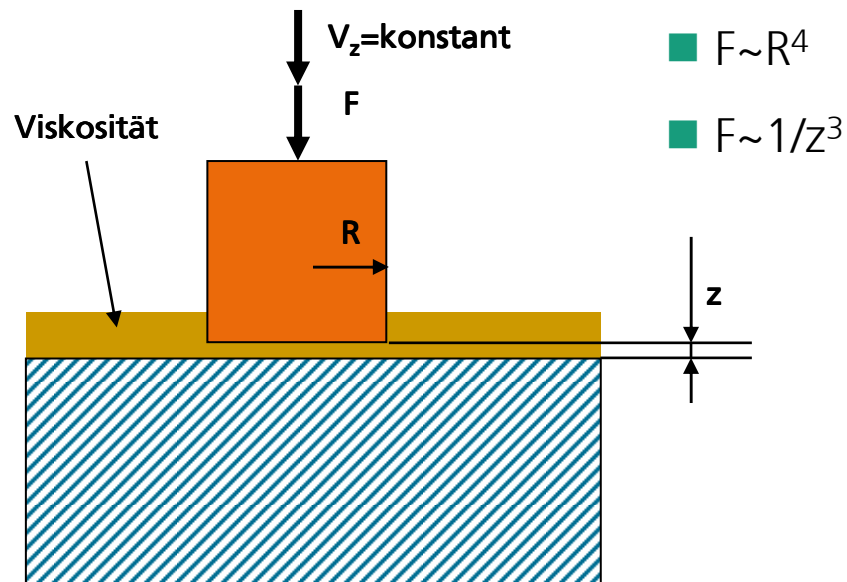
- Messung von Reibwerten in einem sehr großen Reibzahlintervall von 0,01 bis 0,25
- Prüfmethoden »Stift-Scheibe«, »Kugel-Scheibe« und »Scheibe-Scheibe«
- Reibungsermittlung zwischen vollflächig tragenden und selbst justierenden Kreisringflächen bis Ø100 mm
- nomineller Kontaktdruck im Intervall von 0,1 bis 60 N/mm² (1 bis 600 bar)
- Gleitgeschwindigkeitsbereich zwischen 0,1 und 12 m/s
- Betrieb mit Ölumlaufschmierung zwischen 20 und 130 °C

Eckert, U.

Prinzipdarstellung zur Auswahl der Probengeometrie (1)

Vorgabe

- Die Tragwirkung ist von der absoluten Kontaktflächengröße abhängig.



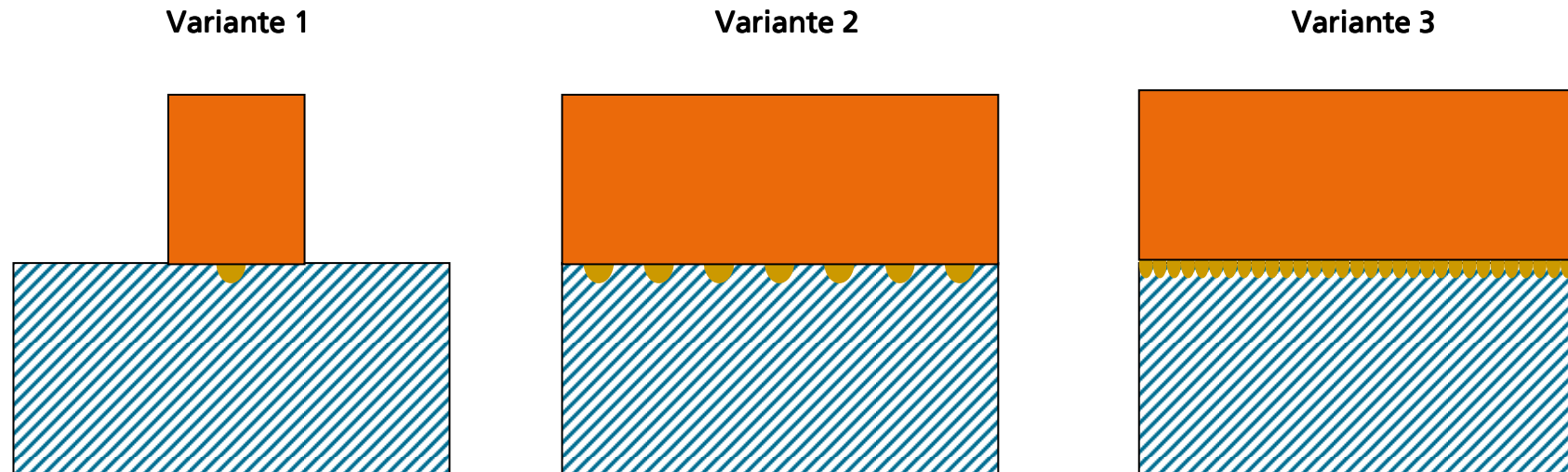
Um hohe Schmierfilmdicke z (Flüssigkeitsreibung) zu erreichen, ist R möglichst groß zu wählen.

Eckert, U.

Prinzipdarstellung zur Auswahl der Probengeometrie (2)

Vorgabe

- Die Wirkung von Mikrostrukturen erfordert eine Mindestanzahl von Einzel-Formelementen auf der nominellen Fläche.

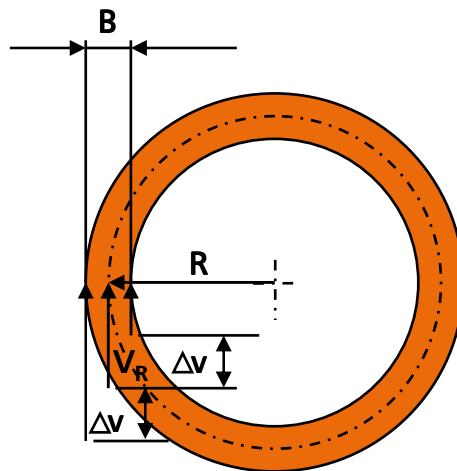


Eckert, U.

Prinzipdarstellung zur Auswahl der Probengeometrie (3)

Vorgabe

- $B \ll R$ damit V_R repräsentativ für die Reibungsbedingungen ist.



■ B = Ringbreite

■ R = Ringradius

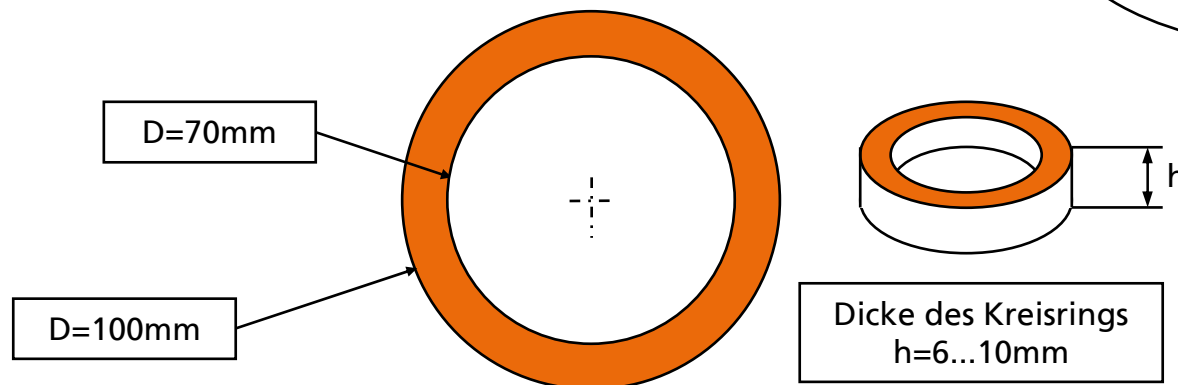
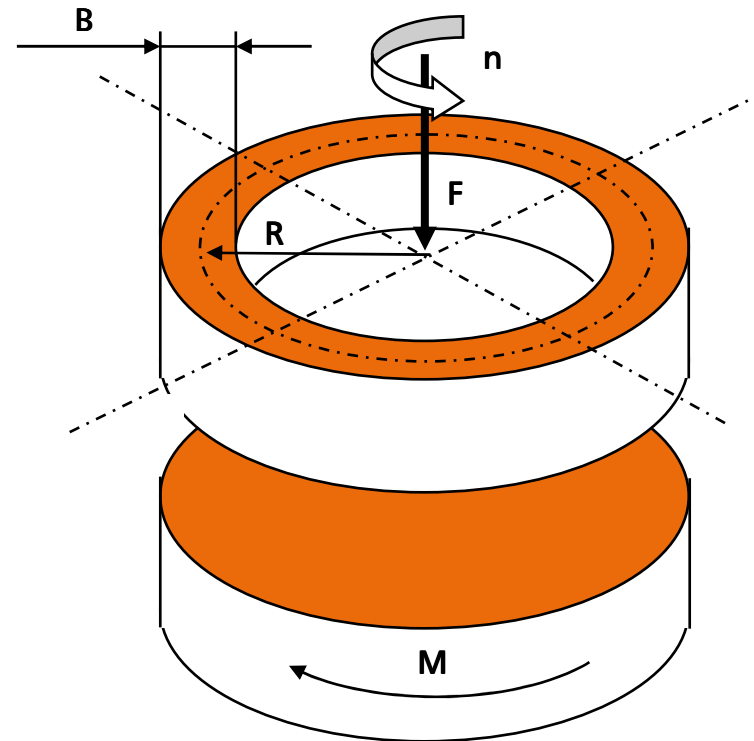
Ableitung Probengeometrie

Tribometer hat begrenzten Meß- und Wertebereich

- F = Einstellbereich Tribometer
- n = Wertebereich Tribometer
- M = Messbereich Tribometer

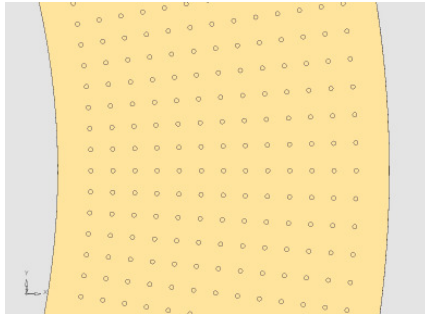
→ Eingangsgrößen $v = f(r_R; n)$, $p = f(F/A)$

→ Ausgangsgrößen R , B

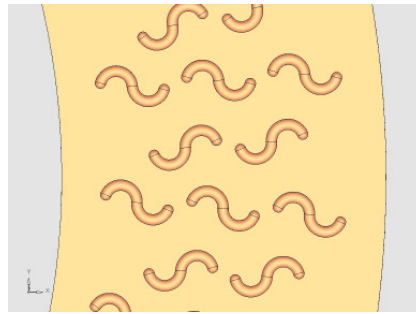


Eckert, U.

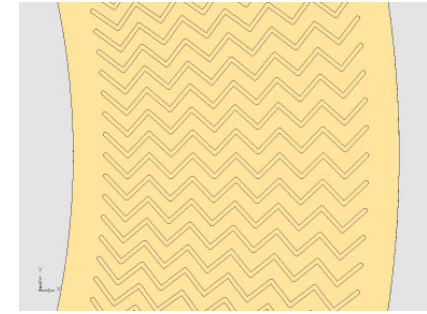
Strukturanordnung auf Probekörper



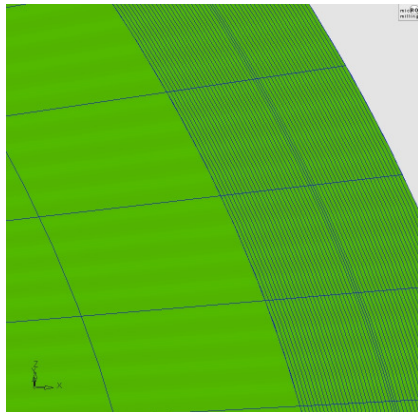
Bohrungsraster aus
2700 Einzelbohrungen



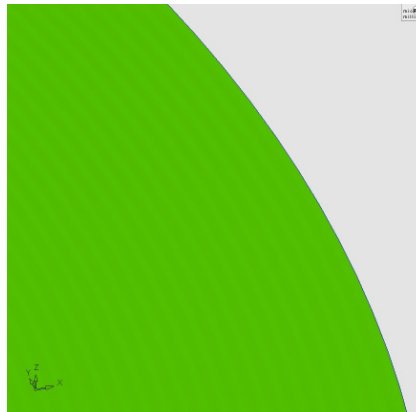
Mäanderstruktur mit
225 Einzelelementen



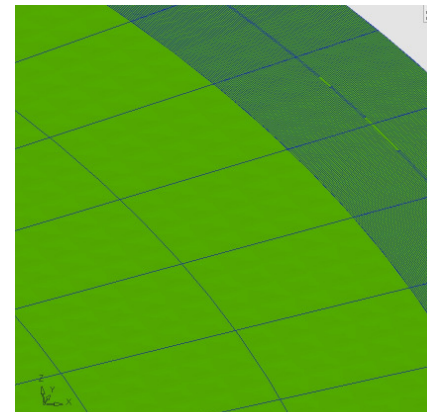
Kanalstruktur aus 240
Einzelkanälen



Probekörper mit 480
Wellenprofilen



Probekörper mit 30
Wellenprofilen



Kissenstruktur mit
14.400 Einzelelementen

Eckert, U.

Versuchsbedingungen

Vorgaben: - Kontaktfläche 4000mm² - wirksamer Reibradius 42,5mm	Flächenpressung [N/mm²]	Normalkraft [N]	Gleitgeschwindigkeit [m/min]	Drehzahl [min⁻¹]
Beispiele aus der Praxis				
Werkzeugmaschinenbau	Bis 0,1	400	Bis 30	112
Motorentechnik	Bis 100	400.000	Bis 720	2.700
Angaben aus der Literatur				
St-St	max. 1,5 (0,5)	6.000 (2.000)		
St-GGG	max. 1,0	4.000		
Gleitlager allgemein			0,1-300	0,37-1.123
Tribometer				
Technische Daten	Bis 1,25	Bis 5.000	Bis 800	Bis 3.000
Auswahl	0,01 / 0,04 / 0,07 / 0,1	40 / 160 / 280 / 400	0,8 / 5,6 / 13,1 / 17,9 / 20	3 / 21 / 49 / 67 / 75

Weitere Vorgaben:

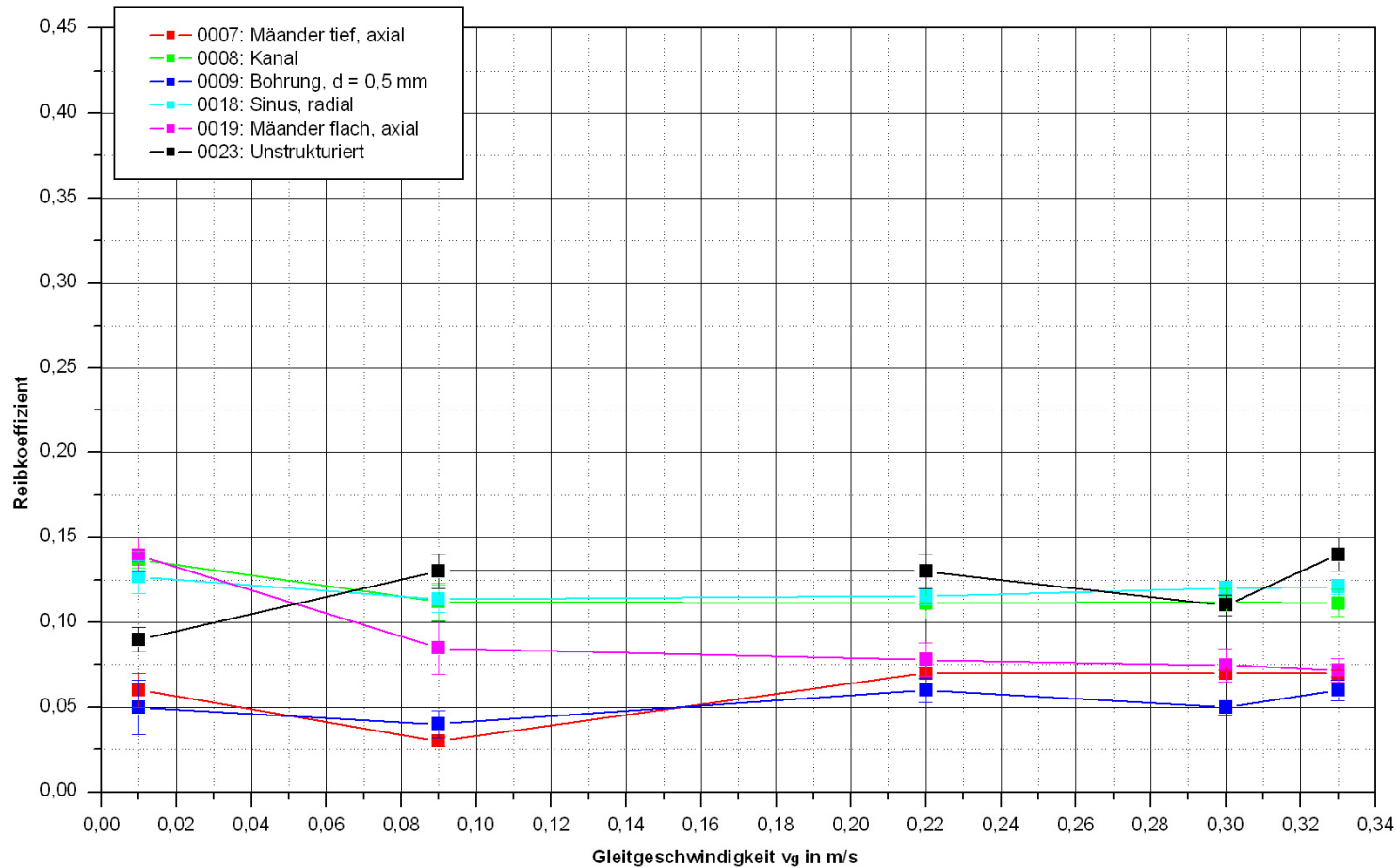
- Kontaktzeit 15min
- Ölschmierung
- 3 Wiederholungen

↓
4 Normalkräfte

↓
5 Drehzahlen

Ergebnisse Tribologische Untersuchungen Bsp.1

Stahlscheibe auf Stahlring
Reibkoeffizient μ in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit
 $p_n = 0,1 \text{ N/mm}^2$



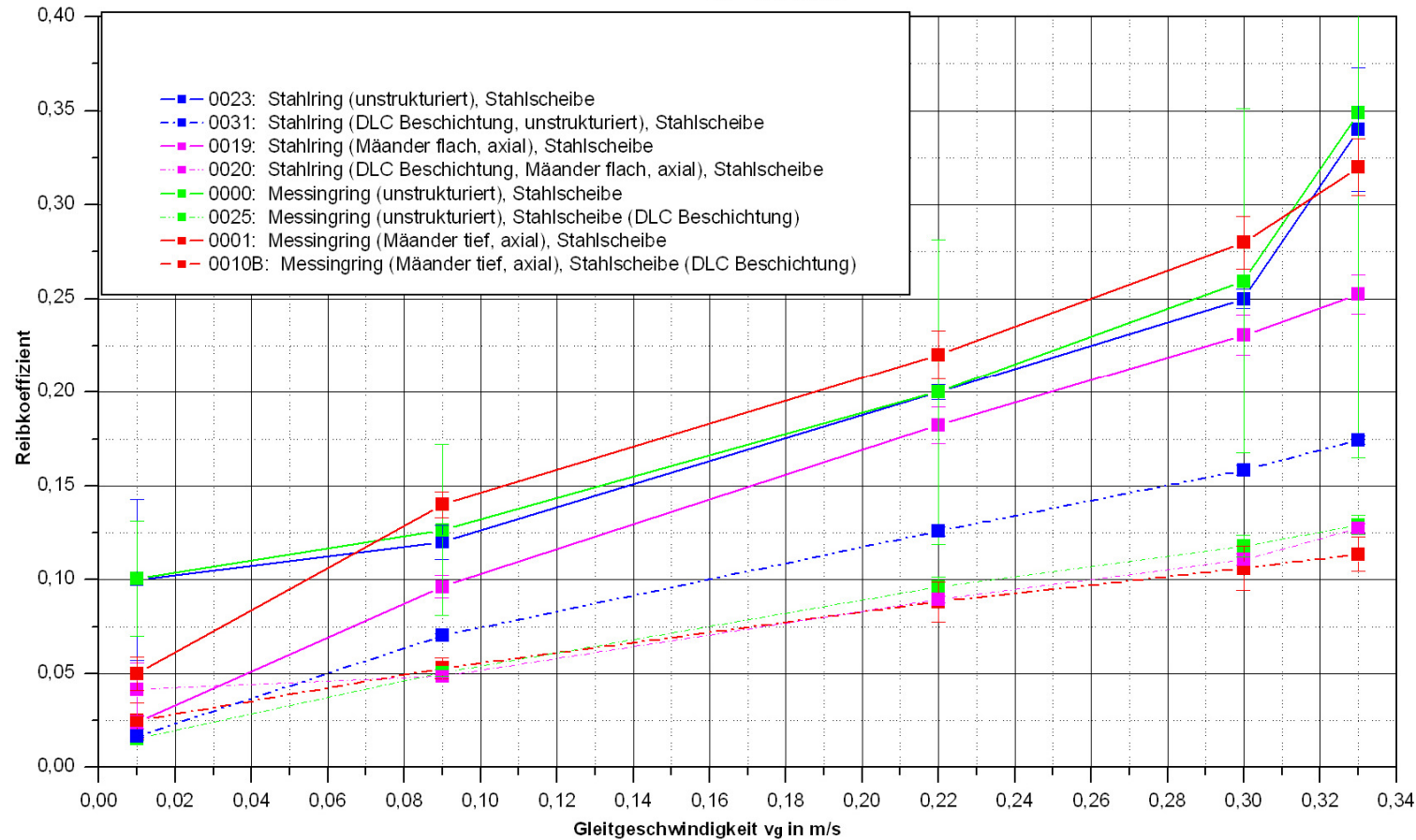
Eckert, U.

Ergebnisse Tribologische Untersuchungen Bsp. 2

Stahlscheibe auf Ring (MS58, Stahl, mit/ohne Beschichtung und mit/ohne Strukturierung)

Reibkoeffizient μ in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit

$p_n = 0,01 \text{ N/mm}^2$



Eckert, U.