

Experimentell-numerische Analyse eines geschmierten Reibkontakts mit festgeklopften Werkzeugoberflächen für die Blechumformung

Workshop Machine Hammer Peening

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Daniel Trauth

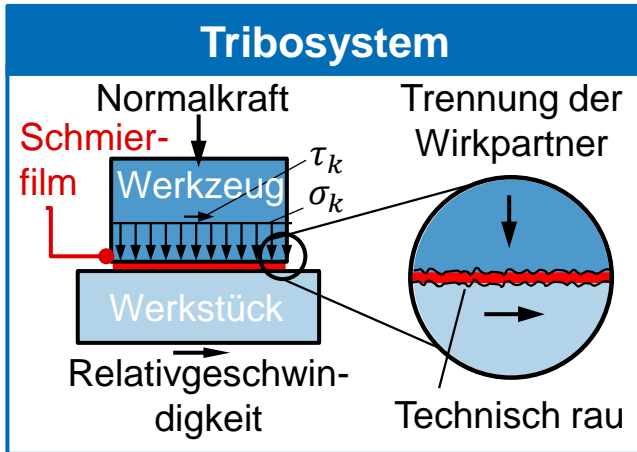
Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Wien, 16.10.2013

Agenda

- 1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise**
- 2 Herstellung und Charakterisierung festgeklopfter Oberflächenstrukturen**
- 3 Experimentelle Reibwertanalyse festgeklopfter Oberflächenstrukturen**
- 4 Numerische Modellierung des tribologischen Kontakts**
- 5 Verifizierung des FE-Modells und Diskussion der Ergebnisse**
- 6 Fazit und Ausblick**

Ausgangssituation und Zielsetzung



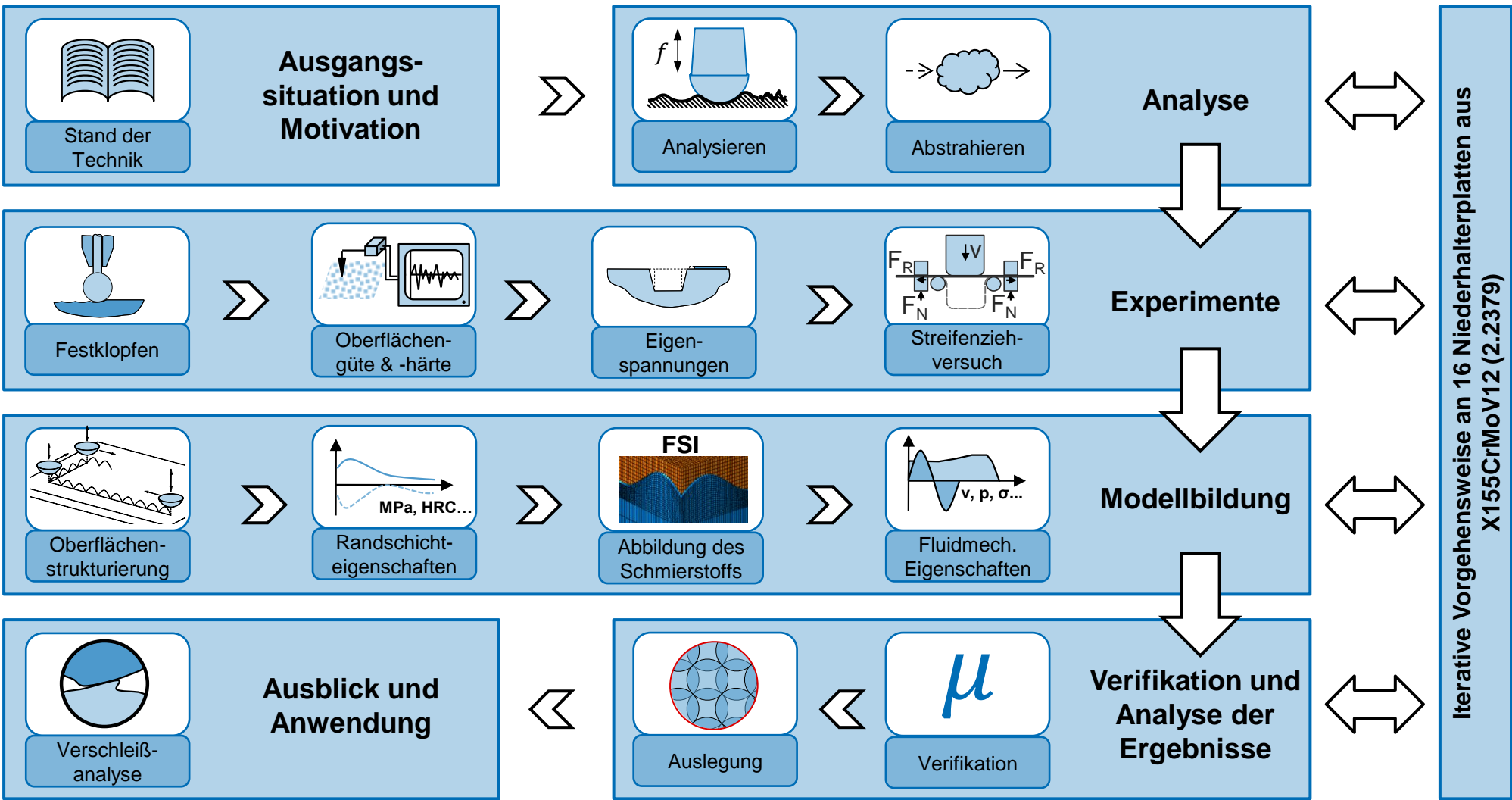
Ausgangssituation und Problemstellung

- Trend nach Ressourcen- und Energieeffizienz erfordert den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen
- Erhöhte Reibung und erhöhter Verschleiß infolge der Verwendung von Leichtbauwerkstoffen
- Gleichzeitig erfordern aktuelle Gesetzgebungen umweltfreundliche Tribosysteme, womit allerdings den erhöhten Prozessanforderungen nicht vollständig nachgekommen werden kann

Motivation und Zielsetzung

- **Verlagerung** der reibungs- und verschleißminimierenden Schmierstoffeigenschaften auf strukturierte Werkzeugoberflächen
- **Strukturierung der Werkzeugoberflächen** durch maschinelles Festklopfen zur Ausnutzung fluidmechanischer Eigenschaften und zur Reduktion der wahren Kontaktfläche im Reibkontakt
- **Ausnutzung** von Kaltverfestigung und Druckeigenspannungen in der Werkzeugrandzone zur Verbesserung der Tragfähigkeit und Verschleißbeständigkeit der Strukturen

Vorgehensweise

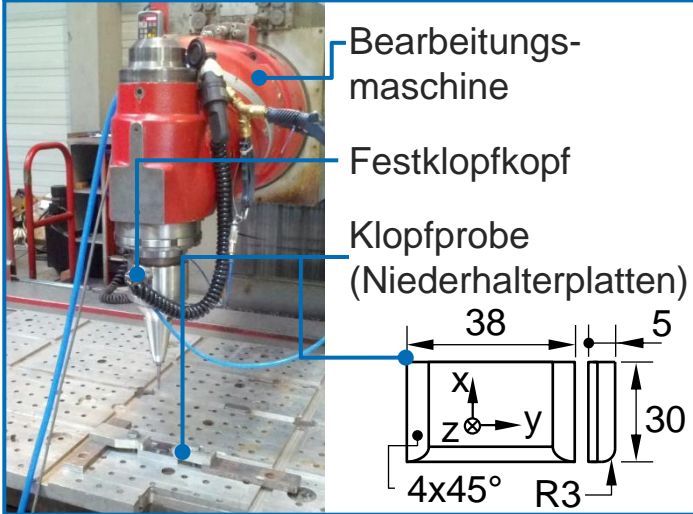


Agenda

- 1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise
- 2 **Herstellung und Charakterisierung festgeklopfter Oberflächenstrukturen**
- 3 Experimentelle Reibwertanalyse festgeklopfter Oberflächenstrukturen
- 4 Numerische Modellierung des tribologischen Kontakts
- 5 Verifizierung des FE-Modells und Diskussion der Ergebnisse
- 6 Fazit und Ausblick

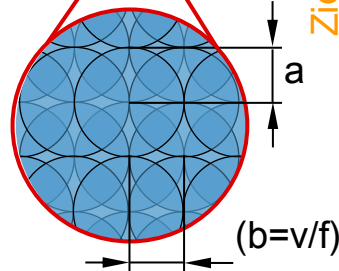
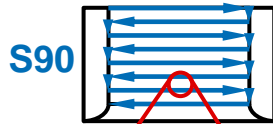
Festklopfen von Niederhalter (NH)-platten für den Streifenziehversuch

Festklopfen der NH-platten

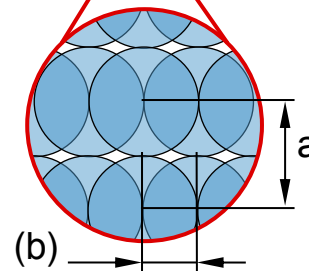
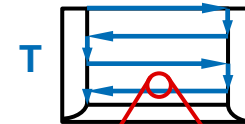


Prozessparameter bei $f = 100$ Hz

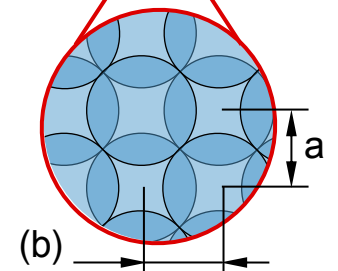
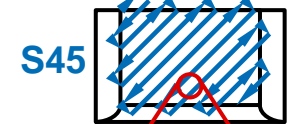
$a=0,245$; $v=24,5$



$a=0,490$; $v=24,5$



$a=0,346$; $v=34,6$

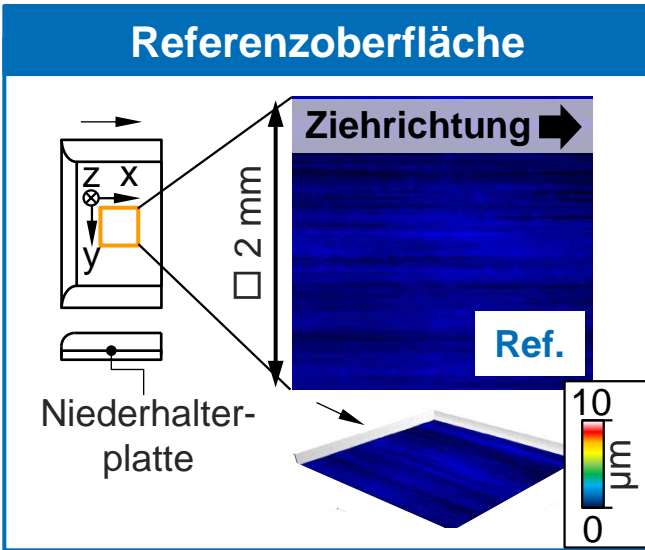


Versuchsdurchführung

- 3-Achs-Horizontal-Fräsbearbeitungszentrum EMCO MECOF Typ AGILE CS 500
- Klopfsystem der Fa. accurapuls mit 3 kW-Klopfleistung
- Niederhalterplatten aus 1.2379 (X155CrMoV12) auf 58 HRC vakuumgehärtet
- Klopfdruckradius $r \approx 245$ μm bei Klopf Frequenz $f = 100$ Hz und Klopfkopfdurchmesser $d = 6$ mm
- Festklopfen von **drei** unterschiedlichen Oberflächenstrukturen (S90, T, S45) die unterschiedliche Traganteile und Schmierstofftaschenvolumen erwarten lassen

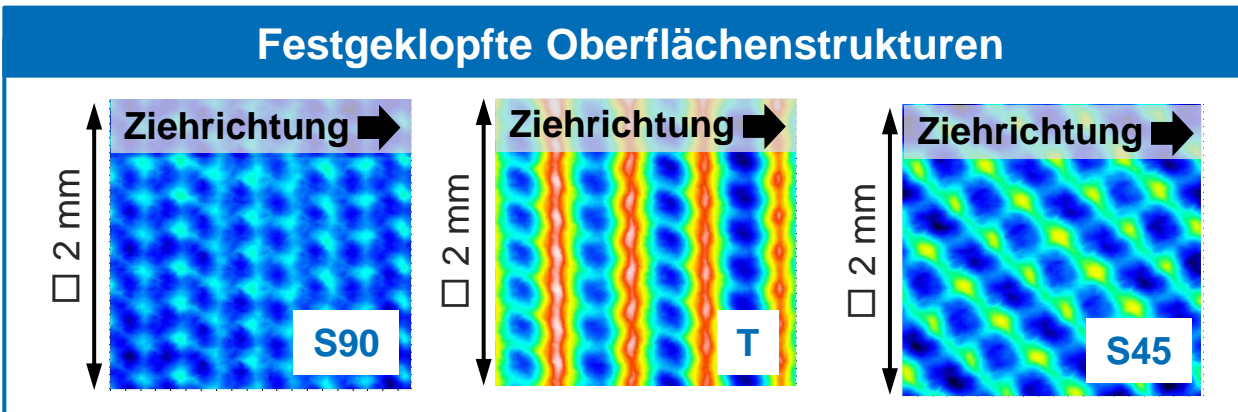
Legende: f = Klopf Frequenz [Hz], a = Klopfdruckabstand [mm], b = Klopfbahnabstand [mm], v = Maschinenvorschubgeschwindigkeit [mm/s], d = Klopfkopfdurchmesser [mm]

Charakterisierung der Oberflächengüte



Oberflächengüte

- **Taktile** Charakterisierung der Oberfläche mit dem kombinierten Rauheits- und Konturmesssystem Hommel-Etamic T8000 RC
- Auswertung von **Flächenkenngrößen** entsprechend ISO 25178 und EUR 15178N in einem **Messbereich** von 2 x 2 mm und einer **Messauflösung** von 5 µm
- Zusätzliche Charakterisierung einer geschliffenen Werkzeugoberfläche als **Referenz** (Ref.)
- Ref. weist den größten Traganteil (Smr) auf, T hat das größte Potential Schmierstoffvolumen aufzunehmen (Sv, Vv), S90 weist die geringste Rauheit (Sa, Sz); S45 liegt bei allen Kenngrößen im mittleren Bereich



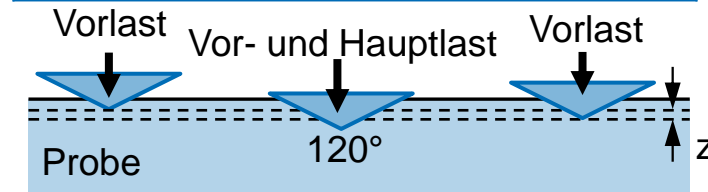
	Ref.	S90	T	S45
Smr [%]	100	4,82	0,61	1,17
Sv [µm]	0,51	1,80	4,20	2,38
Vv [µm³/µm²]	0,17	0,81	3,50	1,70
Sa [µm]	0,10	0,47	1,97	0,97
Sz [µm]	0,97	3,80	10,0	6,20

Charakterisierung der Randzoneeneigenschaften

Kaltverfestigung

- Kaltverfestigung wurde in Form der Makrohärte nach Rockwell gemessen
- Ausgangshärte nach dem Vakuumhärten von 58 HRC
- Härtesteigerung in Folge der Festklopfbearbeitung bis zu 3,5 HRC auf 61,5 HRC

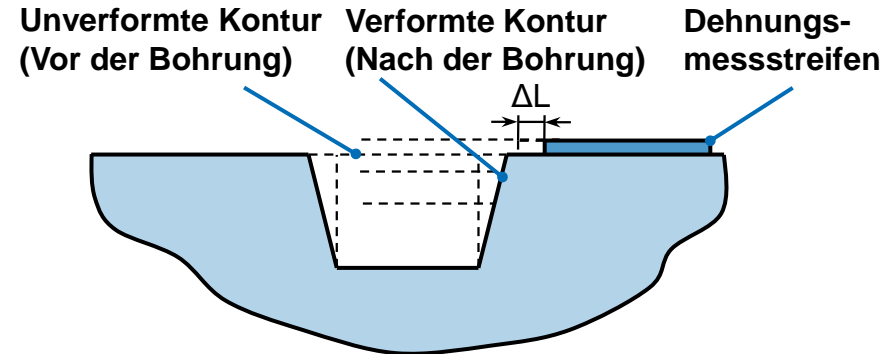
	Ref.	S90	T	S45
HRC	58	61,5	60	60,5



Eigenspannungen

- Messung der Eigenspannungen quer und parallel zur Festklopfbearbeitungsrichtung mithilfe der Bohrlochmethode
- MTU Verfahrensnorm MTV 1129 in Bohrtiefen bis 500 μm
- Zugeigenspannungen in Folge des Schleifprozesses von ca. +150 MPa konnten durch Festklopfen um ca. 1000 MPa kompensiert werden.

	Ref.	S90	T	S45
$\sigma_{x,\text{max}}$ [MPa]	+150	-850	-800	-650



Legende: z = plastische Eindringtiefe [μm], ΔL = Dehnungsänderung des DMS [μm]

Agenda

- 1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise
- 2 Herstellung und Charakterisierung festgeklopfter Oberflächenstrukturen
- 3 Experimentelle Reibwertanalyse festgeklopfter Oberflächenstrukturen
- 4 Numerische Modellierung des tribologischen Kontakts
- 5 Verifizierung des FE-Modells und Diskussion der Ergebnisse
- 6 Fazit und Ausblick

Reibwertermittlung im Streifenziehversuch

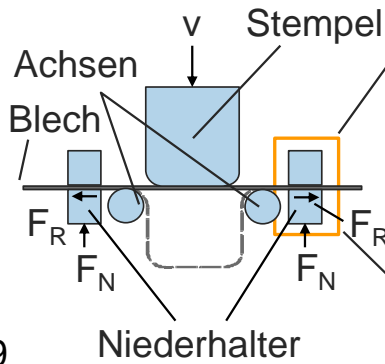
Streifenziehversuch

Wirkpaarung

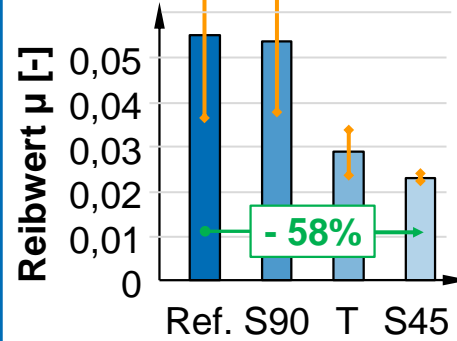
$\sigma_K(F_N) = 7 \text{ MPa}$
 $v = 4 \text{ m/min}$
 $T = 20 \text{ °C}$
 Öl: Geroform 747

Werkstoffe

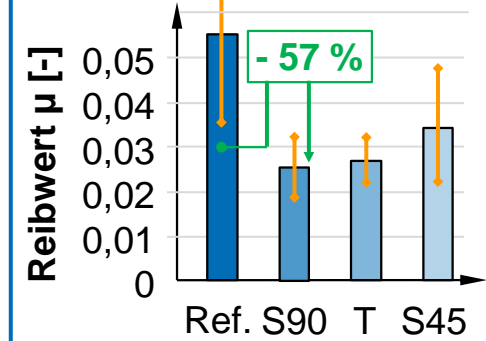
Blech: 1.4301
 Niederhalter: 1.2379



Reibwertanalyse (13 g/m²)



Reibwertanalyse (4 g/m²)



Versuchsdurchführung & -auswertung

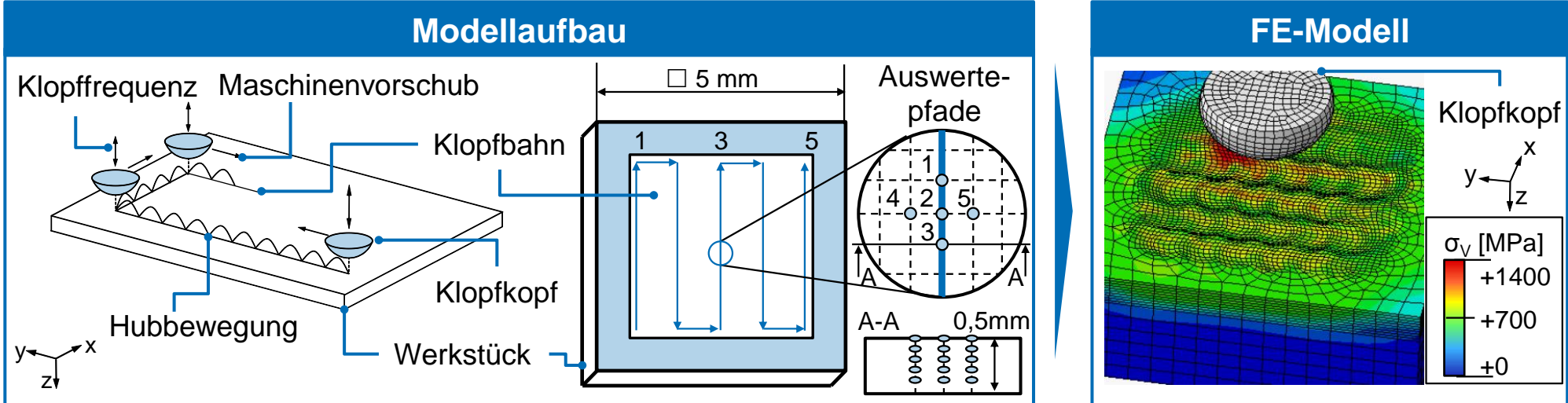
- Kombiniertes Flachbahn-Umlenk-Streifenziehversuch
- Bestimmung der Reibwerte nach Coulomb
- Untersuchung der Reibwerte zweier unterschiedlicher Schmierzustände:
 - vollständige Benetzung (13 g/m²)
 - teilweise Benetzung (4 g/m²)
- Reibwertermittlung jeweils am linken und rechten Niederhalterpaar
- Zur statistischen Absicherung wurden die Versuche fünfmal wiederholt. Hieraus ergeben sich 10 Messwerte
- Bei sonst konstanten Versuchsbedingungen konnten die Reibwerte ggü. der Ref. um bis zu 58% reduziert werden

Legende: σ_K = Kontaktnormalspannung [MPa], F_N = Normalkraft [N], F_R = Reibkraft [N], v = Ziehgeschwindigkeit [m/min], T = Temperatur der Wirkpaarung [°C], μ = Reibwert nach Coulomb [-]

Agenda

- 1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise
- 2 Herstellung und Charakterisierung festgeklopfter Oberflächenstrukturen
- 3 Experimentelle Reibwertanalyse festgeklopfter Oberflächenstrukturen
- 4 Numerische Modellierung des tribologischen Kontakts
- 5 Verifizierung des FE-Modells und Diskussion der Ergebnisse
- 6 Fazit und Ausblick

Modellaufbau zur Abbildung der Randschichteigenschaften der Strukturen

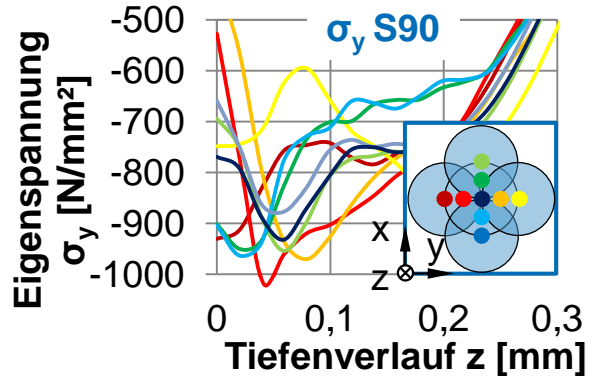


Modellaufbau und -verifizierung

- Expliziter Solver, isotherme Berechnung
- Elasto-plastisches Materialverhalten (1.2379)
- Hexagonale Kontinuums-Elemente (C3D8R)
- Feinste Netzdichte 50 μm ~ 300 000 Elemente
- Abbildung der Kinematik der Klopfbewegung mittels Fourier-Transformation
- Prozesskinematik und Materialmodell bereits verifiziert
- Zusätzliche Verifizierung des Strukturierungsprozesses anhand der experimentellen Oberflächenkenngröße S_z und der Berg-zu-Tal-Distanz im FE-Modell (Abweichungen)
 - $S_{z_{SZV}} - S_{z_{FEM}} = \Delta S_{z_{S45}} = +0,17 \mu\text{m}$ ($\sim 2,8\%$),
 - $\Delta S_{z_T} = +0,40 \mu\text{m}$ ($\sim 4,0\%$),
 - $\Delta S_{z_{S90}} = +0,6 \mu\text{m}$ ($\sim 5,2\%$)

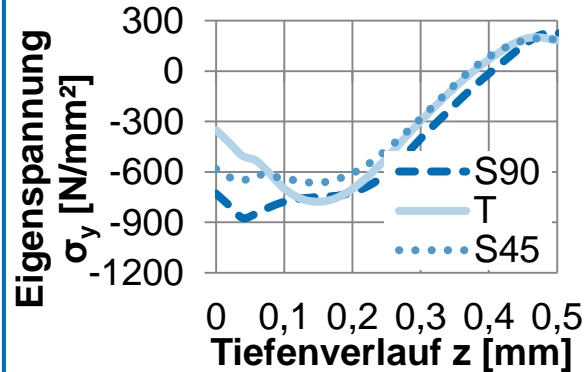
Auswertung der Randschichteigenschaften nach der Festklopfsimulation

Auswertung der Randschicht



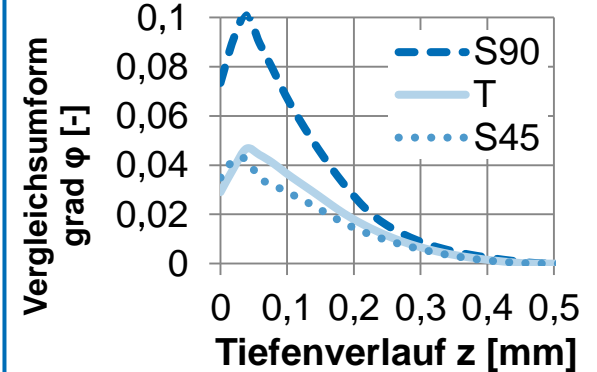
- Auswertung der Randschichteigenschaften an 9 Auswertepfaden in die Bauteiltiefe z
- Positionierung der Auswertepfade über einen kompletten Klopfeindruck
- Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse der 9 Pfade arithmetisch gemittelt

Eigenspannungen im Vgl.



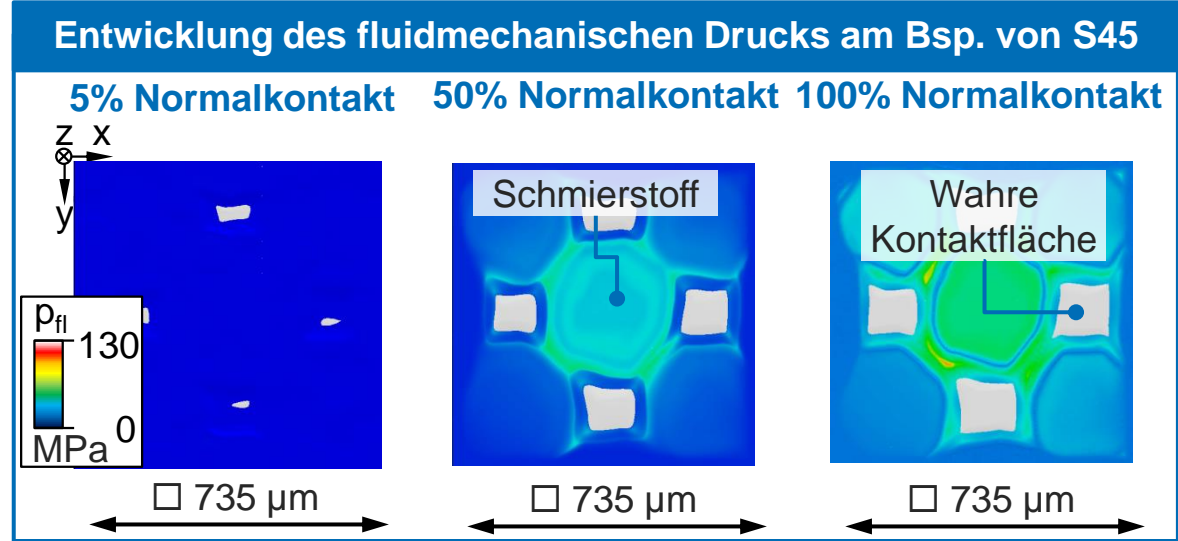
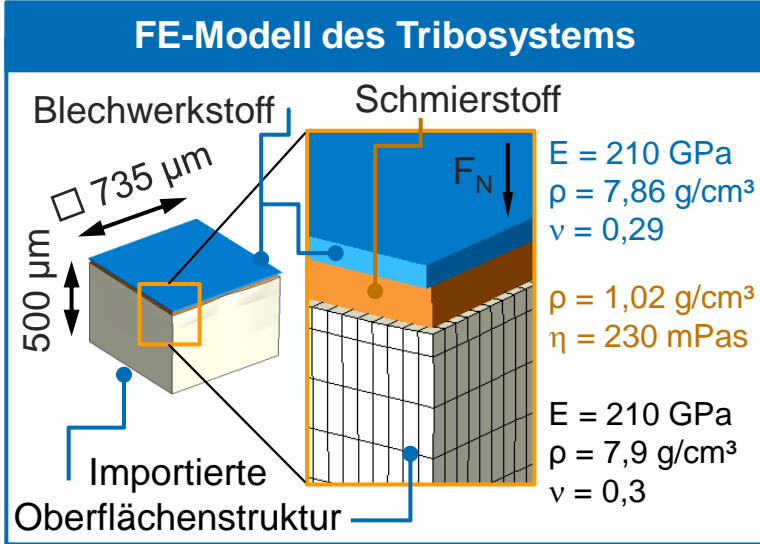
- Die Oberflächenstrukturen unterscheiden sich primär im Betrag der
 - unmittelbaren oberflächennahen Druckeigenspannungen
 - maximalen Druckeigenspannungen
- Der restliche Tiefenverlauf ist qualitativ gleich

Kaltverfestigung im Vgl.



- Die Oberflächenstrukturen sind alle durch ein hohes Maß an Kaltverfestigung charakterisiert
- Die Kaltverfestigung korreliert mit dem Grad der Überdeckung

Modellaufbau zur Abbildung des Normalkontakts

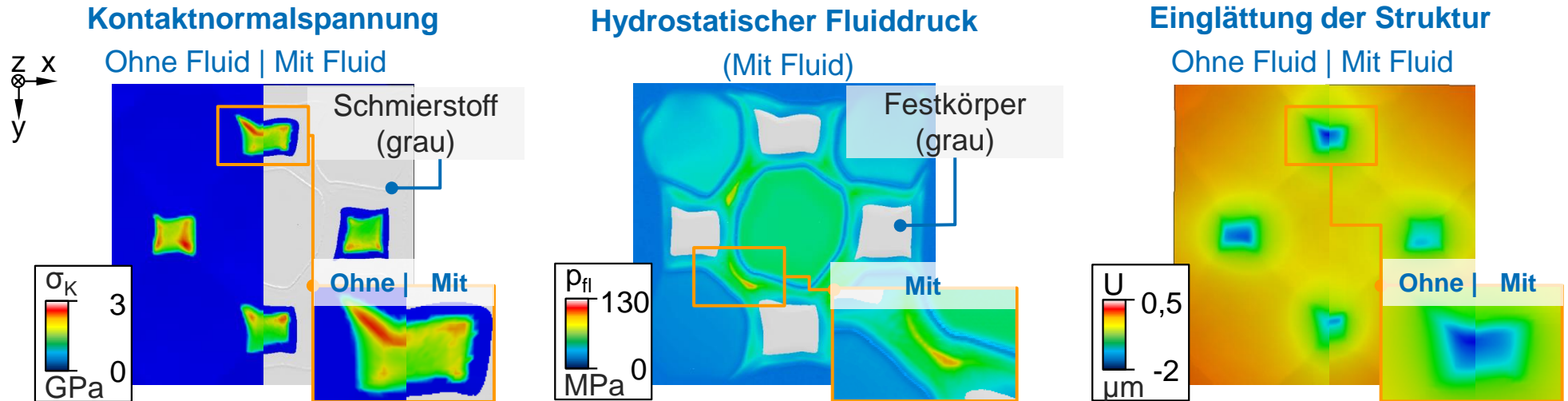


Modellaufbau

- Reduktion des FE-Modells auf ein Strukturmerkmal
- Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) auf Basis des gekoppelten Euler-Lagrange-Ansatzes in Abaqus (CEL)
- Modellierung des Schmierstoffs als Newtonsches Fluid
- Ca. 600 000 Elemente
- Kaltverfestigung und Eigenspannungen über predefined fields übernommen
- Skalierung der Prozessgrößen des Streifenziehversuchs auf die Modellgröße der FSI-Simulation

Legende: p_{fl} = Fluidmechanische Drücke [MPa], E = Elastizitätsmodul [GPa], ρ = Dichte [g/cm^3], ν = Querkontraktionszahl [-], η = dynamische Viskosität [mPas]

Auswertung der fluidmech. Eigenschaften infolge des Normalkontakts



- Reduktion der Kontaktfläche
- Reduktion der Kontaktnormalspannung

- Abgeschlossene Schmierstofftaschen bilden hydrostatische Drücke bis zu 50 MPa

- Reduzierte Verformung der Strukturberge
- Geringere „Auffüllung“ der Strukturtäler

Legende: σ_K = Kontaktnormalspannung [GPa], p_{FL} = Fluidmechanische Drücke [MPa], U = Verschiebung des Werkstoffs [μm]

Agenda

- 1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise
- 2 Herstellung und Charakterisierung festgeklopfter Oberflächenstrukturen
- 3 Experimentelle Reibwertanalyse festgeklopfter Oberflächenstrukturen
- 4 Numerische Modellierung des tribologischen Kontakts
- 5 Verifizierung des FE-Modells und Diskussion der Ergebnisse
- 6 Fazit und Ausblick

Verifizierung des FSI-Modells

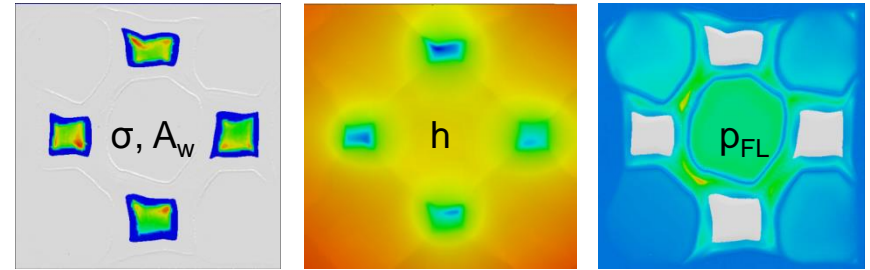
Reibgesetz nach Emmens*

$$\mu = \mu_0 - \frac{p_{fl}}{\sigma_K} (1 - \alpha) \cdot \mu_0 + \frac{\eta v_{rel}}{h} \cdot \frac{1 - \alpha}{\sigma_K}$$

μ₀ — Festkörperreibung
(1 - α) · μ₀ — Mischreibung
(1 - α) / σ_K — Hydrodynamische Reibung

- Unterteilung der Reibung in drei Terme zur Beschreibung von
 - Festkörperreibung
 - Mischreibungseffekten
 - Hydrodynamischen Reibungseffekten
- Alle Parameter können der **FSI-Simulation** und den Versuchsergebnissen entnommen werden

Analyse der tribologischen Kontaktverhältnisse



	σ _K [MPa]	A _w [mm ²]	α [-]	h [μm]	p _{fl} [MPa]
Ref.	7	0,540	100%	-	-
S45	78,9	0,048	9%	4,1	49,3

- Beispiel S45:
 - Experimenteller Reibwert: μ_{SZV} = 0,0229
 - Reibwert nach Emmens: μ_{EMM} = 0,0234
 - Abweichung: 1,75% → FSI-Modell verifiziert

Legende: A_w = wahre Kontaktfläche, α = Prozentualer Anteil der wahren Kontaktfläche, h = Höhe der Schmierstofftaschen

Quelle: *Emmens, W.-C.: Tribology of flat contacts and its application in deep drawing. PHD-Thesis, University of Twente, 1997.

Agenda

- 1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise**
- 2 Herstellung und Charakterisierung festgeklopfter Oberflächenstrukturen**
- 3 Experimentelle Reibwertanalyse festgeklopfter Oberflächenstrukturen**
- 4 Numerische Modellierung des tribologischen Kontakts**
- 5 Verifizierung des FE-Modells und Diskussion der Ergebnisse**
- 6 Fazit und Ausblick**

Fazit und Ausblick

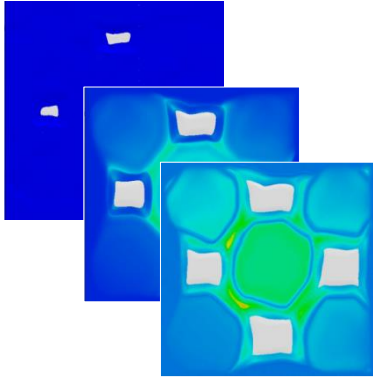
Fazit

- Das Festklopfen eignet sich zum Strukturieren von Werkzeugoberflächen
- Gleichzeitig werden Kaltverfestigung und Druckeigenspannungen induziert
- Durch Festklopfen modifizierte Niederhalterplatten können den Reibwert um bis zu 58% reduzieren
- Die gekoppelte Euler-Lagrange-Methode ist geeignet, den tribologischen Kontakt mithilfe der Finite-Elemente-Methode zu untersuchen
- Es konnte gezeigt werden, dass die wahre Kontaktfläche auf 9% reduziert werden kann (S45)
- Gleichzeitig entstehen in den Strukturtälern fluidmechanische Drücke bis 50 MPa
- In den Strukturtälern können darüber hinaus Abriebpartikel aufgenommen werden und Schmierstoff in die Kontaktzone nachgeführt werden

Ausblick

- Analyse der Verschleißentwicklung der in der Reibwertanalyse untersuchten Strukturen im Streifenziehversuch
- Analyse der Schichthaftung und Benetzbarkeit von strukturierten Oberflächen
- Untersuchung ökologischer Tribosysteme auf Basis selbstschmierender Beschichtungen und polymerbasierter Ester-Schmierstoffe





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

- Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Daniel Trauth
- Gruppe Umformende Fertigungsverfahren
- Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen



+49 241/ 80 27999



D.Trauth@wzl.rwth-aachen.de



Ziel2.NRW

Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung

Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Industrie, Mittelstand und Handwerk
des Landes Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Agenda

- 1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise**
- 2 Herstellung und Charakterisierung festgeklopfter Oberflächenstrukturen**
- 3 Experimentelle Reibwertanalyse festgeklopfter Oberflächenstrukturen**
- 4 Numerische Modellierung des tribologischen Kontakts**
- 5 Verifizierung des FE-Modells und Diskussion der Ergebnisse**
- 6 Fazit und Ausblick**

Backup
