

---

# Folienfreie Umformung von Edelstahlblechen mit durch Festklopfen strukturierten Werkzeugoberflächen

---

GfT - Tribologie Fachtagung 2013

F. Klocke, **D. Trauth**, M. Terhorst, P. Mattfeld

Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren  
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Göttingen, 02.10.2013

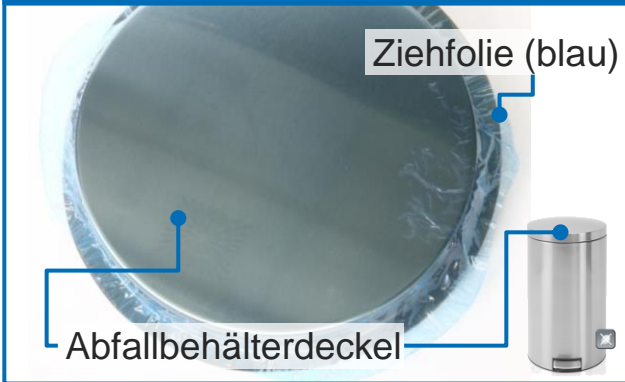
# Agenda

---

- 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

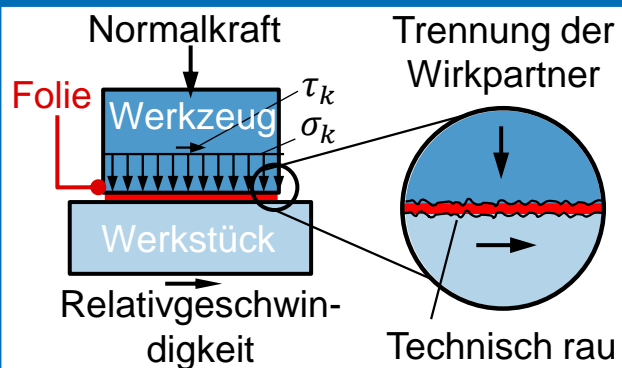
## Tiefziehen mit Folie



## Ausgangssituation und Problemstellung

- Schutzfolie als Trennmittel zwischen Werkzeug und Werkstück bei hohen optischen Anforderungen, z.B. bei der Umformung von Edelstahl
- Durchschnittliche Foliendicke von ca. 60  $\mu\text{m}$ , Reibwerte  $\mu < 0,1$
- **Applizierung** der Schutzfolie durch spezielle Anlagentechnologie und **manuelle Entfernung** der Schutzfolie nach der Fertigung oder beim Endkunden erfordern die **Substitution** der Schutzfolie
- → Ökologische, ökonomische und legislative Nachteile

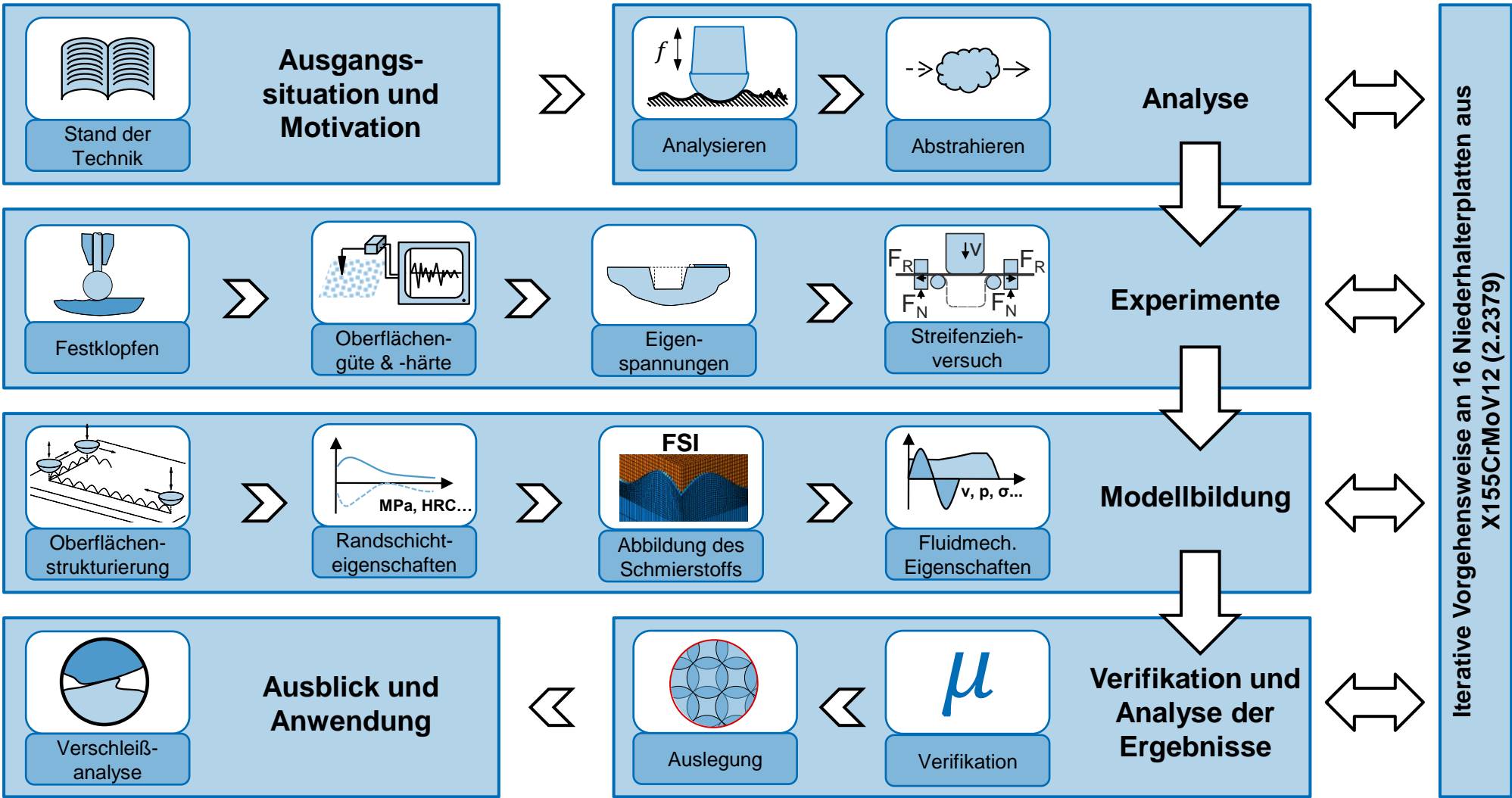
## Tribosystem mit Folie



## Motivation und Zielsetzung

- **Verlagerung** der Reib- und Verschleißigenschaften des tribologischen Systems von der Schutzfolie auf Werkzeugoberflächen
- **Strukturierung der Werkzeugoberflächen** durch maschinelles Festklopfen zur Ausnutzung fluidmechanischer Eigenschaften und zur Reduktion der wahren Kontaktfläche im Reibkontakt
- **Ausnutzung** von Kaltverfestigung und Druckeigenstressungen in der Werkzeugrandzone zur Verbesserung der Tragfähigkeit und Verschleißbeständigkeit der Strukturen

# Vorgehensweise



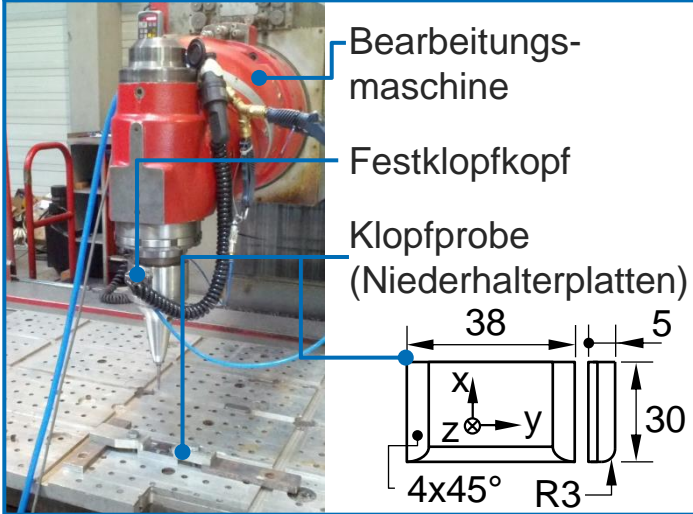
# Agenda

---

- 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

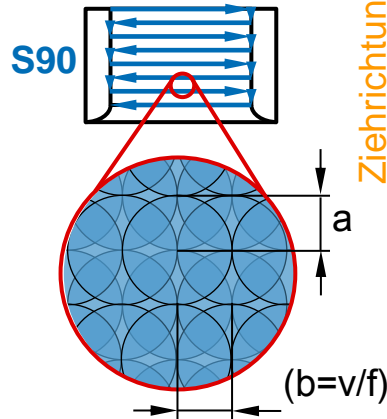
# Festklopfen von Niederhalter (NH)-platten für den Streifenziehversuch

## Festklopfen der NH-platten

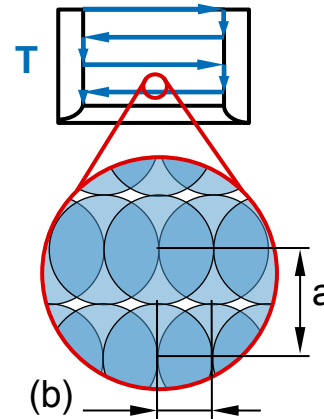


## Prozessparameter bei $f = 100$ Hz

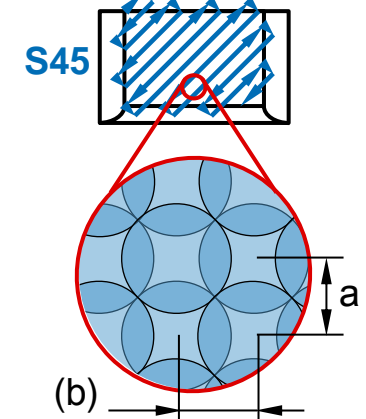
$a=0,245$ ;  $v=24,5$



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



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

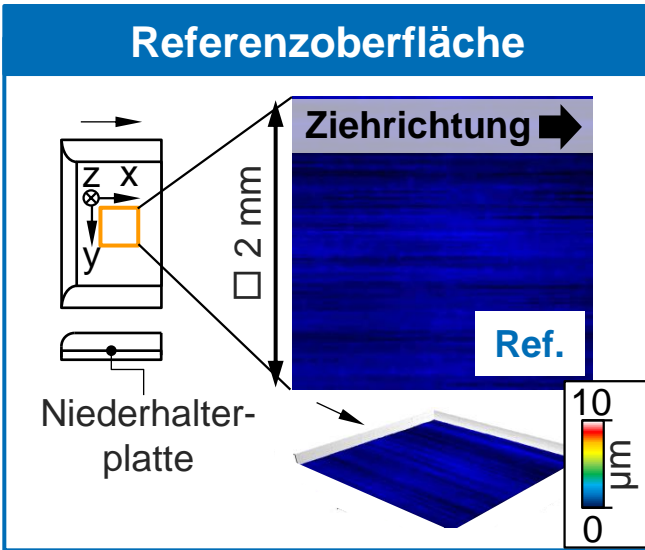


## Versuchsdurchführung

- 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  $r \approx 245$   $\mu\text{m}$  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

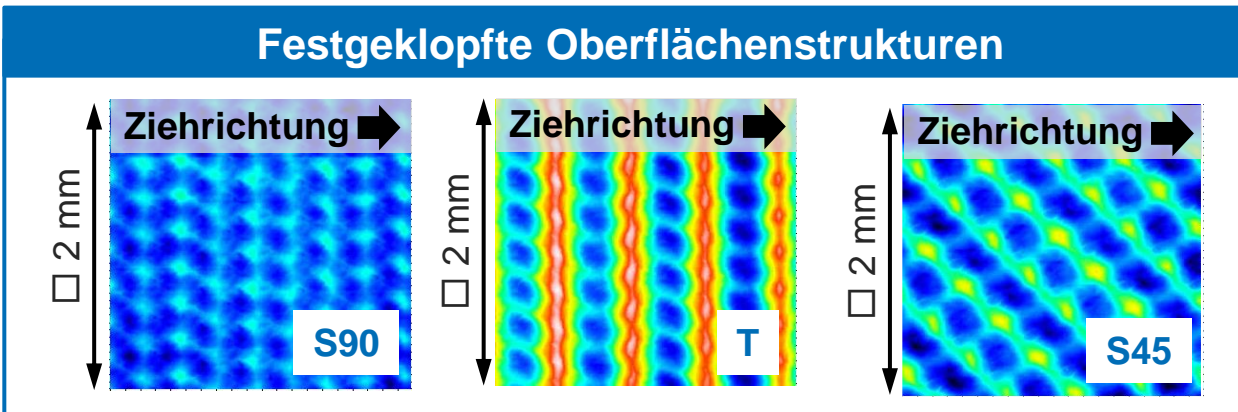
Legende:  $f$  = Klopf Frequenz [Hz],  $a$  = Klopfdruckabstand [mm],  $b$  = Klopfbahnabstand [mm],  $v$  = Maschinenvorschubgeschwindigkeit [mm/s],  $d$  = Klopfkopfdurchmesser [mm]

# 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



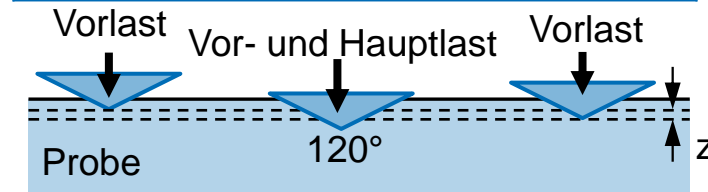
	Ref.	S90	T	S45
Smr [%]	<b>100</b>	4,82	0,61	1,17
Sv [µm]	0,51	1,80	<b>4,20</b>	2,38
Vv [µm³/µm²]	0,17	0,81	<b>3,50</b>	1,70
Sa [µm]	<b>0,10</b>	0,47	1,97	0,97
Sz [µm]	<b>0,97</b>	3,80	10,0	6,20

# 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

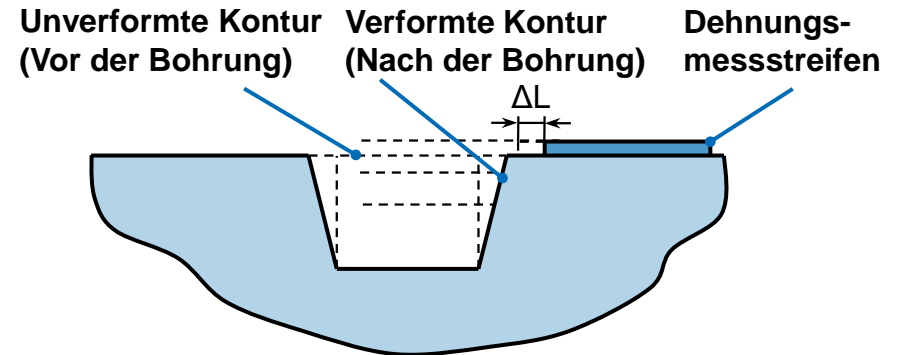
	Ref.	S90	T	S45
HRC	58	61,5	60	60,5



## Eigenspannungen

- Messung der Eigenspannungen quer und parallel zur Festklopfbearbeitungsrichtung mithilfe der Bohrlochmethode
- MTU Verfahrensnorm MTV 1129 in Bohrtiefen bis 500  $\mu\text{m}$
- 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 [ $\mu\text{m}$ ],  $\Delta L$  = Dehnungsänderung des DMS [ $\mu\text{m}$ ]



# 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

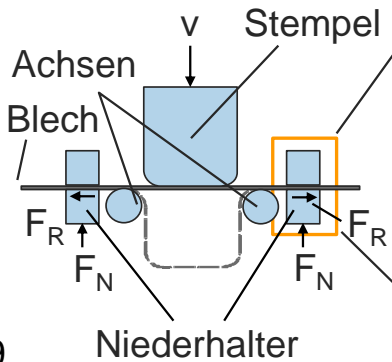
## Streifenziehversuch

### Wirkpaarung

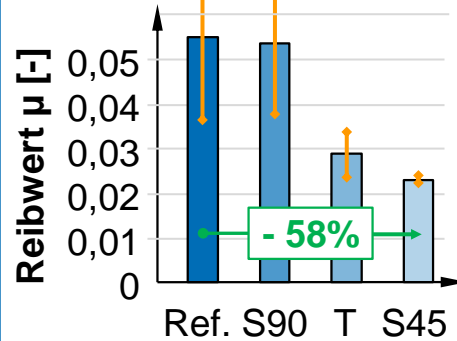
$\sigma_K(F_N) = 7 \text{ MPa}$   
 $v = 4 \text{ m/min}$   
 $T = 20 \text{ °C}$   
 Öl: Geroform 747

### Werkstoffe

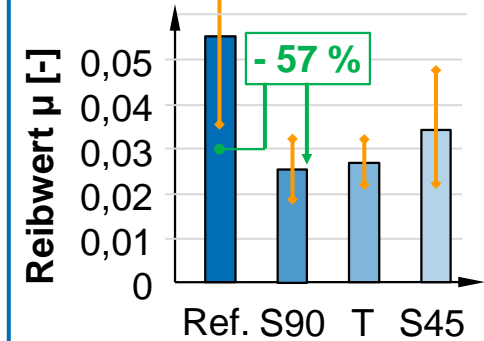
Blech: 1.4301  
 Niederhalter: 1.2379



## Reibwertanalyse (13 g/m<sup>2</sup>)



## Reibwertanalyse (4 g/m<sup>2</sup>)



## Versuchsdurchführung & -auswertung

- Kombiniertes Flachbahn-Umlenk-Streifenziehversuch
- Bestimmung der Reibwerte nach Coulomb
- Untersuchung der Reibwerte zweier unterschiedlicher Schmierzustände:
  - vollständige Benetzung (13 g/m<sup>2</sup>)
  - teilweise Benetzung (4 g/m<sup>2</sup>)
- 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:  $\sigma_K$  = Kontaktnormalspannung [MPa],  $F_N$  = Normalkraft [N],  $F_R$  = Reibkraft [N],  $v$  = Ziehgeschwindigkeit [m/min],  $T$  = Temperatur der Wirkpaarung [°C],  $\mu$  = Reibwert nach Coulomb [-]

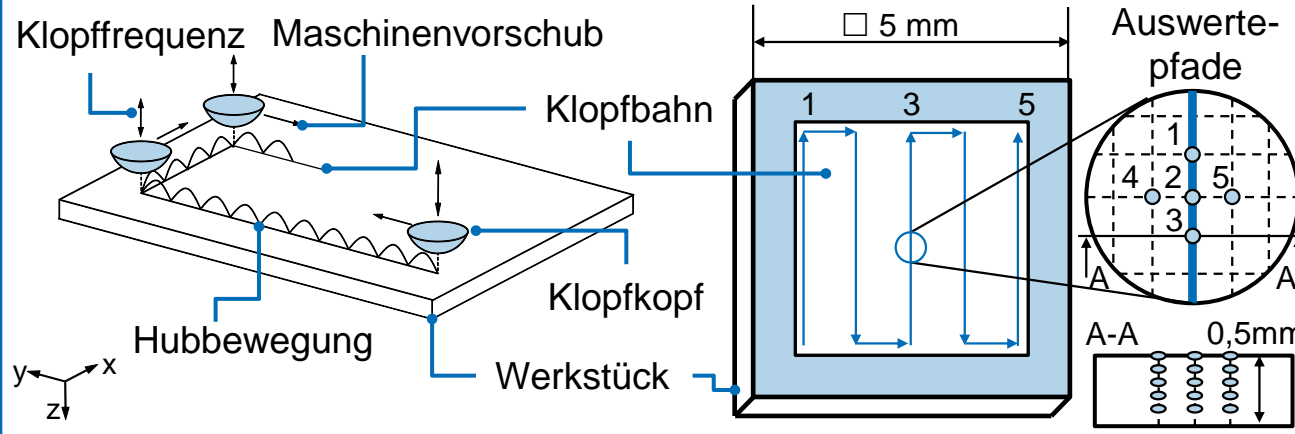
# Agenda

---

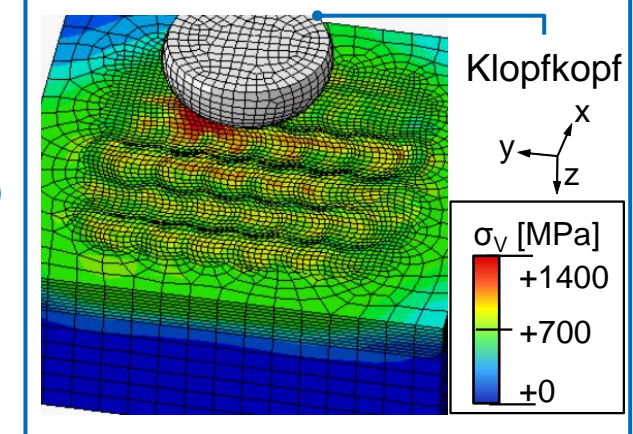
- 1 Ausgangssituation, Zielsetzung und Vorgehensweise
- 2 Herstellung und Charakterisierung festgeklopfter Oberflächenstrukturen
- 3 Experimentelle Reibwertanalyse festgeklopfter Oberflächenstrukturen
- 4 Numerische Modellierung des tribologischen Kontakts
- 5 Verifizierung des FE-Modells und Diskussion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

# Modellaufbau zur Abbildung der Randschichteigenschaften der Strukturen

## Modellaufbau



## FE-Modell

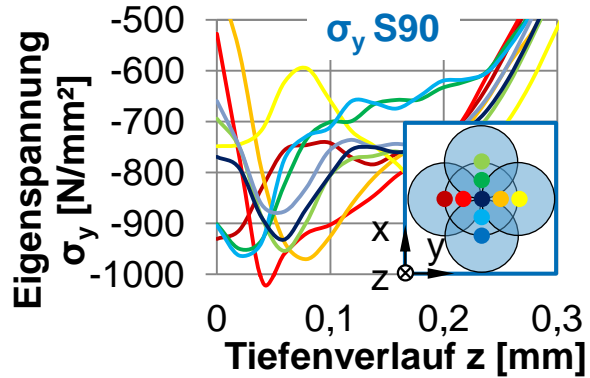


## Modellaufbau und -verifizierung

- Expliziter Solver, isotherme Berechnung
- Elasto-plastisches Materialverhalten (1.2379)
- Hexagonale Kontinuums-Elemente (C3D8R)
- Feinste Netzdichte 50  $\mu\text{m}$  ~ 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)
  - $S_{z_{SZV}} - S_{z_{FEM}} = \Delta S_{z_{S45}} = +0,17 \mu\text{m}$  ( $\sim 2,8\%$ ),
  - $\Delta S_{z_T} = +0,40 \mu\text{m}$  ( $\sim 4,0\%$ ),
  - $\Delta S_{z_{S90}} = +0,6 \mu\text{m}$  ( $\sim 5,2\%$ )

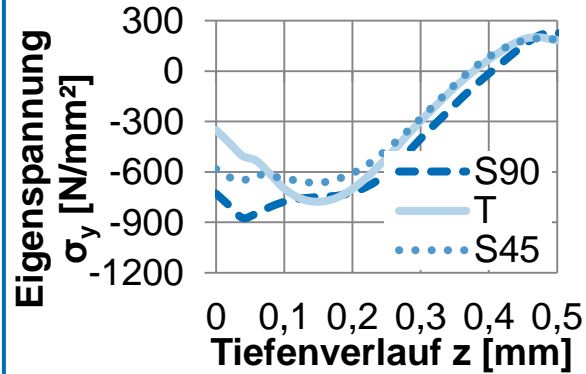
# Auswertung der Randschichteigenschaften nach der Festklopfsimulation

## Auswertung der Randschicht



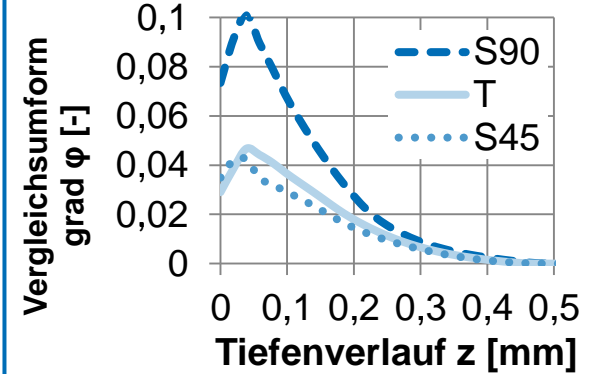
- Auswertung der Randschichteigenschaften an 9 Auswertepfaden in die Bauteiltiefe z
- Positionierung der Auswertepfade über einen kompletten Klopfeindruck
- Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse der 9 Pfade arithmetisch gemittelt

## Eigenspannungen im Vgl.



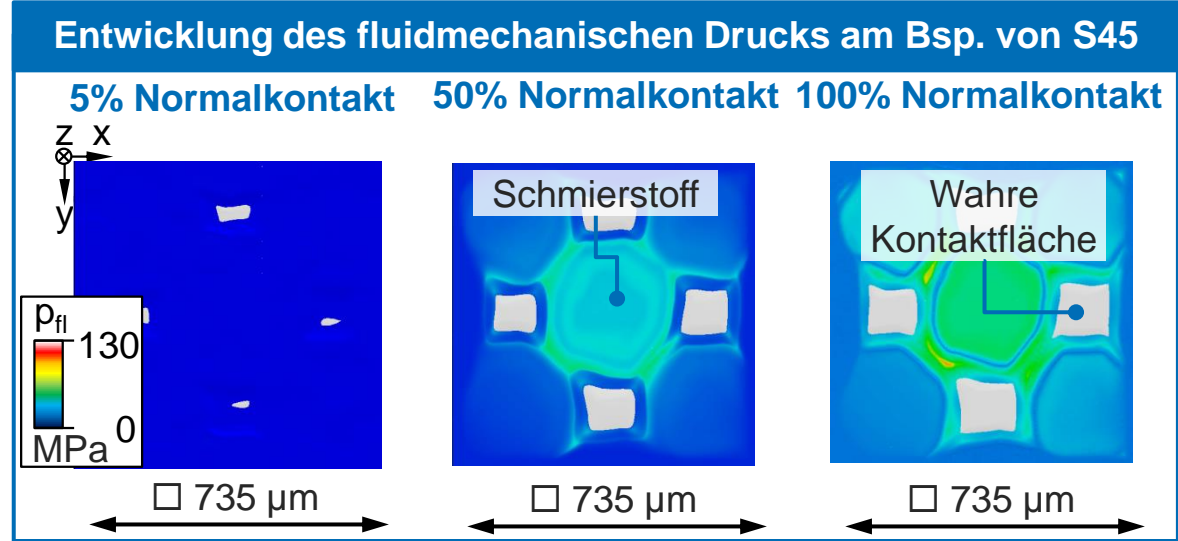
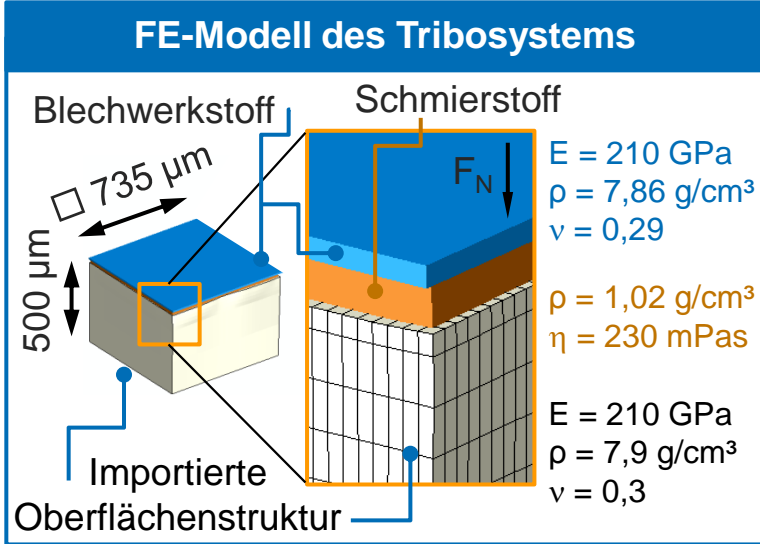
- Die Oberflächenstrukturen unterscheiden sich primär im Betrag der
  - unmittelbaren oberflächennahen Druckeigenspannungen
  - maximalen Druckeigenspannungen
- Der restliche Tiefenverlauf ist qualitativ gleich

## 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

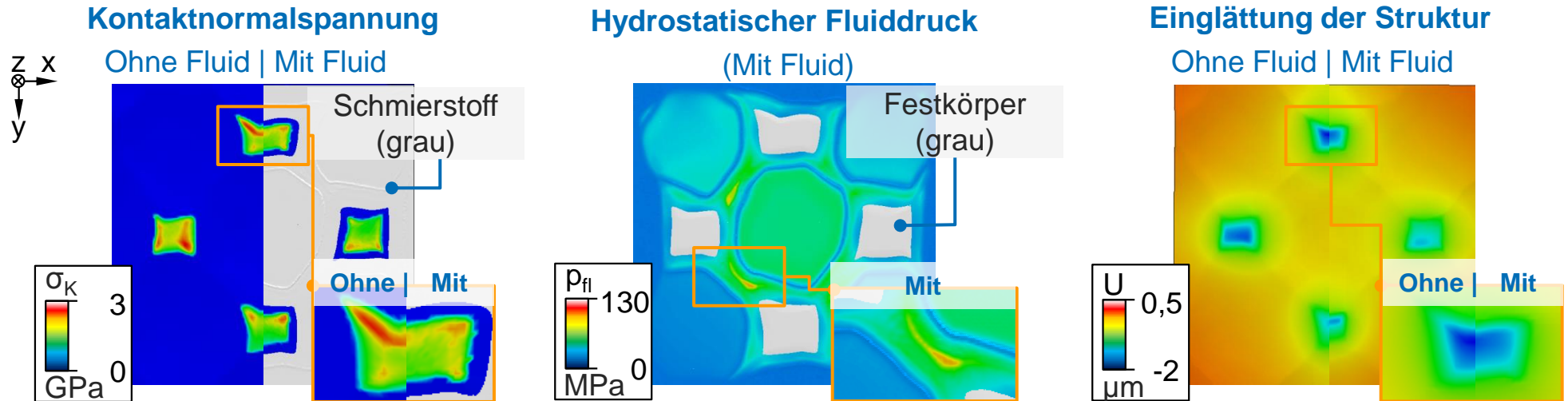


## Modellaufbau

- 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],  $\rho$  = Dichte [ $\text{g/cm}^3$ ],  $\nu$  = Querkontraktionszahl [-],  $\eta$  = 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:  $\sigma_K$  = Kontaktnormalspannung [GPa],  $p_{fl}$  = Fluidmechanische Drücke [MPa],  $U$  = Verschiebung des Werkstoffs [ $\mu\text{m}$ ]

# 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



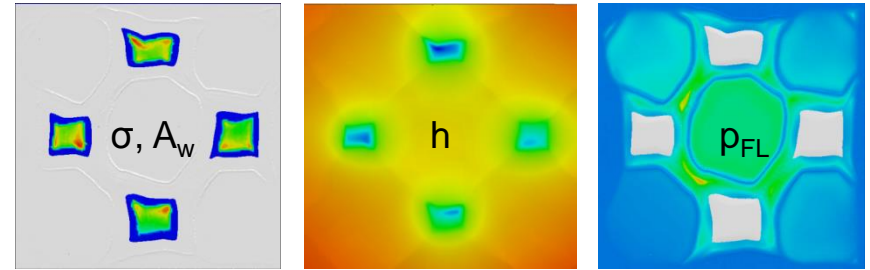
# Verifizierung des FSI-Modells

## Reibgesetz nach Emmens\*

$$\mu = \underbrace{\mu_0}_{\text{Festkörperreibung}} - \underbrace{\frac{p_{fl}}{\sigma_K} (1 - \alpha)}_{\text{Mischreibung}} \cdot \mu_0 + \underbrace{\frac{\eta v_{rel}}{h}}_{\text{Hydrodynamische Reibung}} \cdot \frac{1 - \alpha}{\sigma_K}$$

- 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



	$\sigma_K$ [MPa]	$A_w$ [mm <sup>2</sup> ]	$\alpha$ [-]	$h$ [μm]	$p_{fl}$ [MPa]
Ref.	7	0,540	100%	-	-
S45	78,9	0,048	9%	4,1	49,3

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

Legende:  $A_w$  = wahre Kontaktfläche,  $\alpha$  = 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

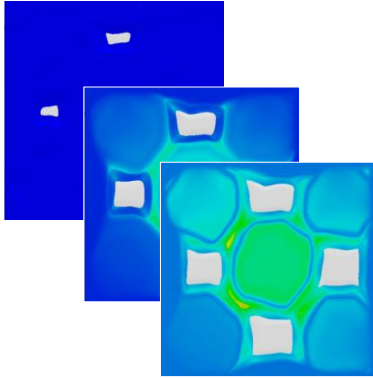
## Fazit

- 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

---