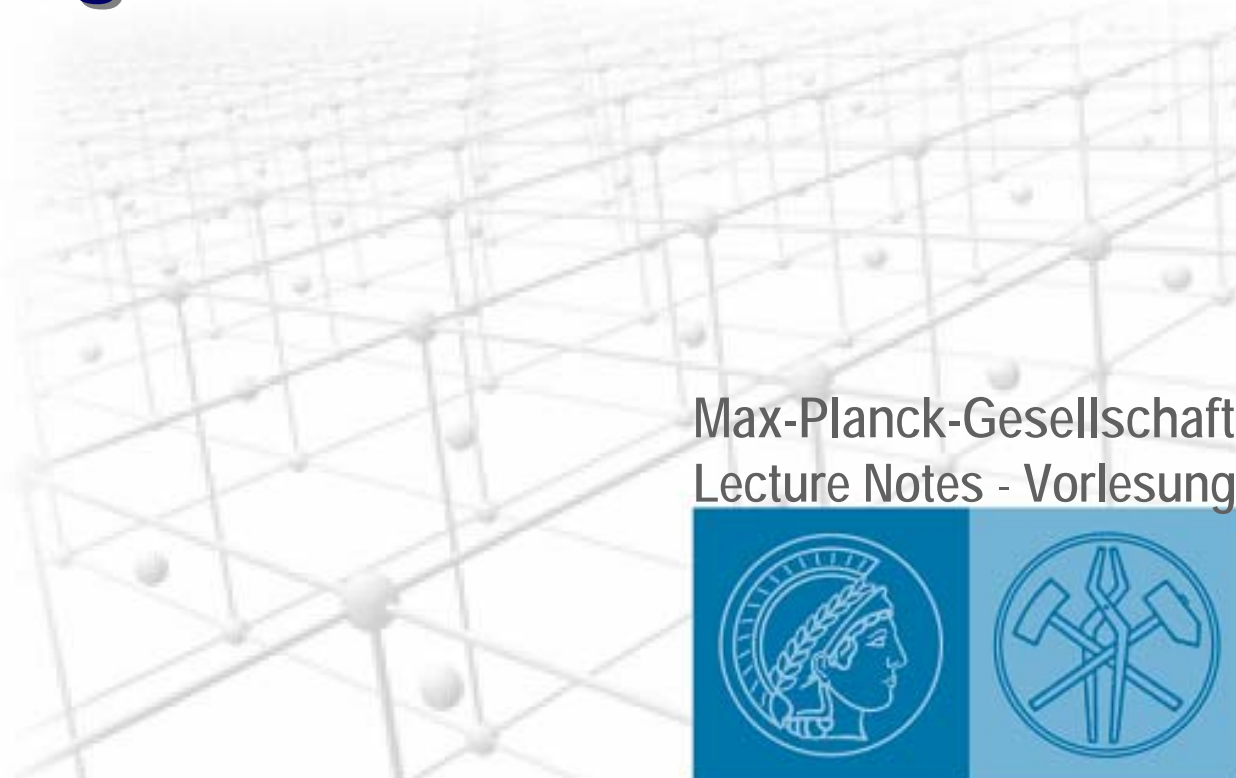


**Dierk Raabe**  
**Max-Planck-Institut, Max-Planck-Str.1**  
**40237 Düsseldorf, Germany, raabe@mpie.de**

<http://www.mpg.de>   <http://www.mpie.de>   <http://edoc.mpg.de>

# **Rauheit, Oberflächenmechanik und Reibung im Hinblick auf Rückfederung**



Max-Planck-Gesellschaft  
Lecture Notes - Vorlesung





**D. Raabe, M. Sachtleber, Z. Zhao, F. Roters, S. Zaefferer: Acta Materialia 49 (2001) 3433–344, „Micromechanical and macromechanical effects in grain scale polycrystal plasticity experimentation and simulation”**

**M. Sachtleber, Z. Zhao, D. Raabe: Materials Science and Engineering A 336 (2002) 81–87, “Experimental investigation of plastic grain interaction”**

**D. Raabe, P. Klose, B. Engl, K.-P. Imlau, F. Friedel, F. Roters: Advanced Engineering Materials 4 (2002) 169-180, „Concepts for integrating plastic anisotropy into metal forming simulations”**

**D. Raabe: Advanced Engineering Materials 4 No. 5 (2002) p. 255-267, „Don’t Trust your Simulation - Computational Materials Science on its Way to Maturity ?”**

**D. Raabe: Advanced Materials 14 No. 9 (2002) p. 639-650, „Challenges in Computational Materials Science”**

**D. Raabe, M. Sachtleber, H. Weiland, G. Scheele, and Z. Zhao: Acta Materialia 51 (2003) 1539-1560., „Grain-scale micromechanics of polycrystal surfaces during plastic straining”**

**D. Raabe, M. Sachtleber, L. F. Vega, and H. Weiland: Advanced Engineering Materials, 4 (2002) p. 859-864., “Surface Micromechanics of Polymer Coated Aluminium Sheets during Plastic Deformation”**



Einleitung

Grundlagen der Reibung

Experimente

Theorien zur Oberflächenmechanik

Kristallmechanik

FE Simulationen zur Rückfederung

Reibgesetze für die Blechumformung



# Einleitung

Grundlagen der Reibung

Experimente

Theorien zur Oberflächenmechanik

Kristallmechanik

FE Simulationen zur Rückfederung

Reibgesetze für die Blechumformung



## Hauptprobleme bei der Beschreibung des Einflusses der Oberfläche auf Reibung und Blechumformung

**dynamischer Prozeß**

**sehr schwer durch Messungen zu charakterisieren**

**tribologische Verhältnisse ändern sich während der Umformung**

**eine Vielzahl unterschiedlichster makroskopischer (z.B. Werkzeuggeometrie), mesoskopischer (z.B. Geometrie und Einformung der Rauheitsspitzen) und mikroskopischer (z.B. Gefügerauheit) tribologischer Mechanismen und Randbedingungen können gleichzeitig bzw. zeitlich und lateral versetzt wirken**



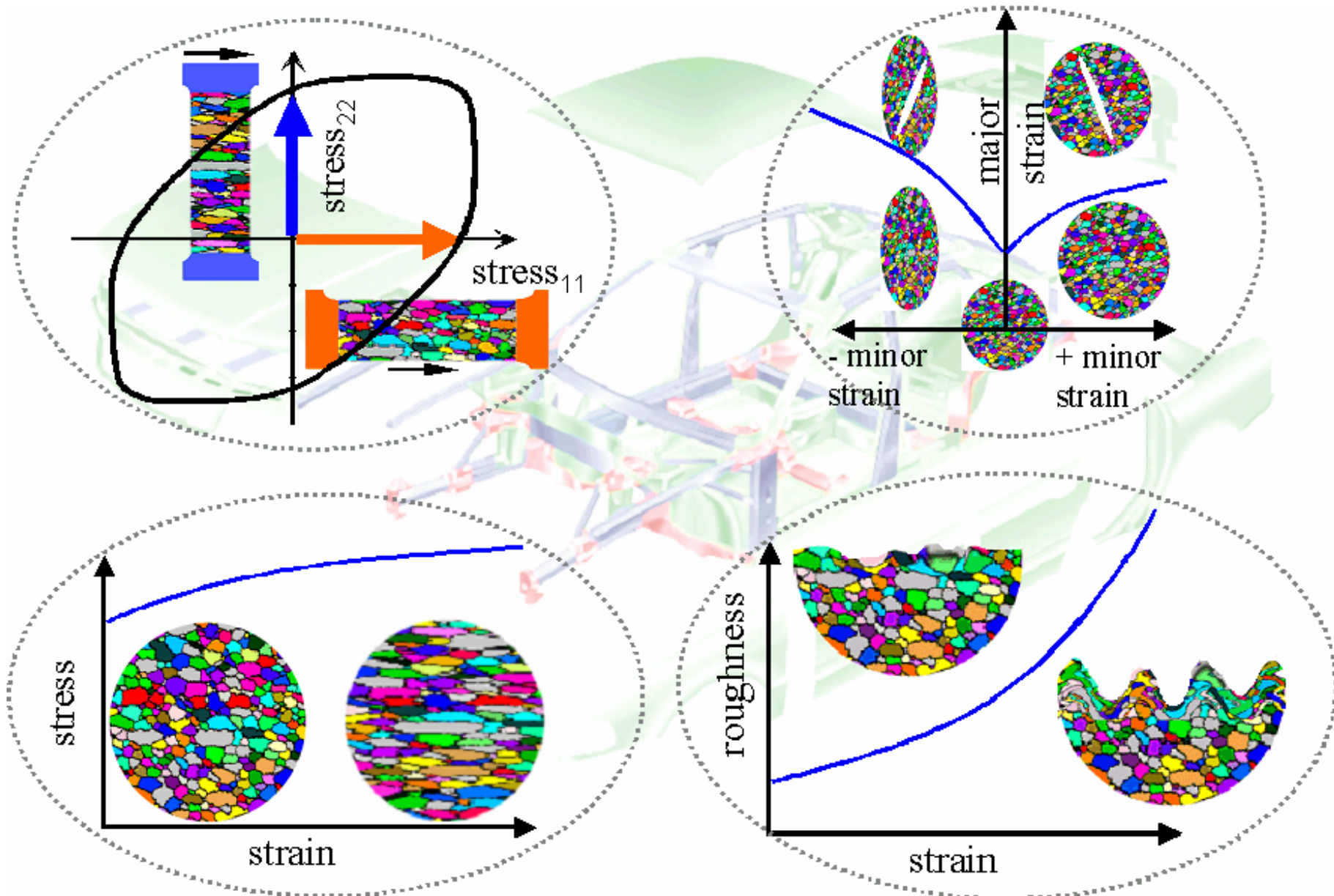
## Daraus ergeben sich 2 Hauptaufgaben

**konsequent am Grundlagenverständnis der beteiligten Prozesse arbeiten**

***Empirisches* Reibgesetz entwickeln und an Daten anpassen**

**Reibgesetz zunächst nur auf Blechumformung ausrichten**

# Neue Anforderungen an die Werkstoffbeschreibung





Einleitung

# **Grundlagen der Reibung**

Experimente

Theorien zur Oberflächenmechanik

Kristallmechanik

FE Simulationen zur Rückfederung

Reibgesetze für die Blechumformung





## Kontinuumstheorie (Mechanische Theorie)

**Reibung durch mechanische Wechselwirkungen zwischen Reibpartnern**

**Elastisch-plastische Verformungen der in Kontakt stehenden Oberflächenbereiche**

**Mechanisches Abscheren der Rauheitsspitzen**

**Rauheitsspitzen der härteren Oberfläche durchfurchen Oberfläche des weicheren Reibpartners**

**Reibung durch die Oberflächengeometrien der beteiligten Reibpartner und die Fließspannung des weicheren Reibpartners bestimmt**



## **Atomistische Theorie (Mikroskopische Theorie, Molekulare Theorie)**

**Reibung wird durch die atomare bzw. molekulare Wechselwirkungen in den Kontaktstellen der Reibpartner (Adhäsion) hervorgerufen**

**Annäherung auf atomare Abstände, Bildung gemeinsamer Bindungen**

**Die auf diese Weise wirkenden atomaren Bindungen zwischen den Reibpartnern werden im Laufe des Reibungsprozesses ständig wieder gelöst und bilden sich an anderen Stellen neu**

**Reibung wird danach bestimmt durch die Adhäsionsneigung zwischen den Oberflächen der Reibpartner und die Scherfestigkeit des weicheren Reibpartners**

**Die Adhäsionsneigung einer Werkstoffpaarung hängt von der Adhäsionsenergie ab. Bei gleichartigen Werkstoffen ist sie am größten und sinkt mit der Verschiedenartigkeit der gepaarten Werkstoffe.**



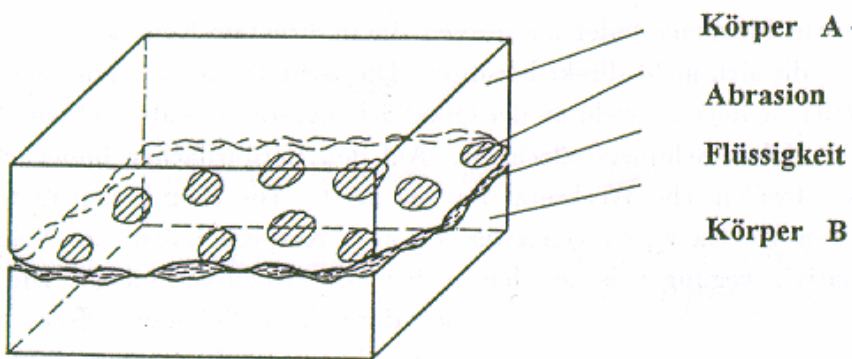
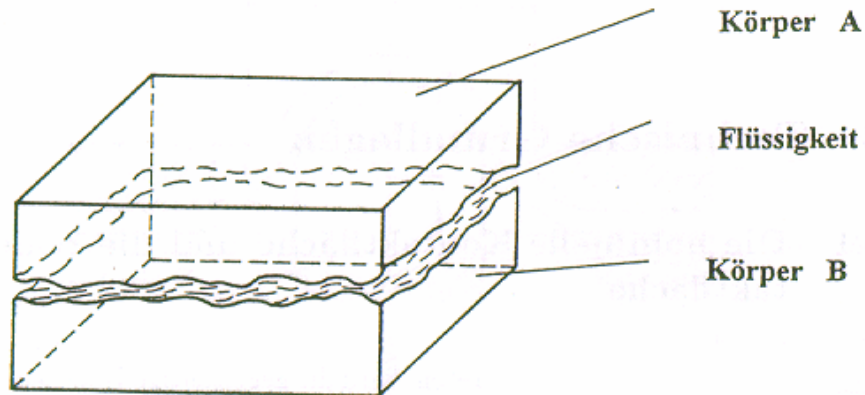
## Hybridtheorie

**Zumeist gilt eine Hybridtheorie aus den beiden obigen Ansätzen, bei der die Reibung sowohl durch mechanische als auch durch molekulare Wechselwirkungen im Kontaktbereich der Reibpartner, die mit einer Mikroformänderung der Oberflächen verbunden sind, hervorgerufen wird.**

# Reibzustände

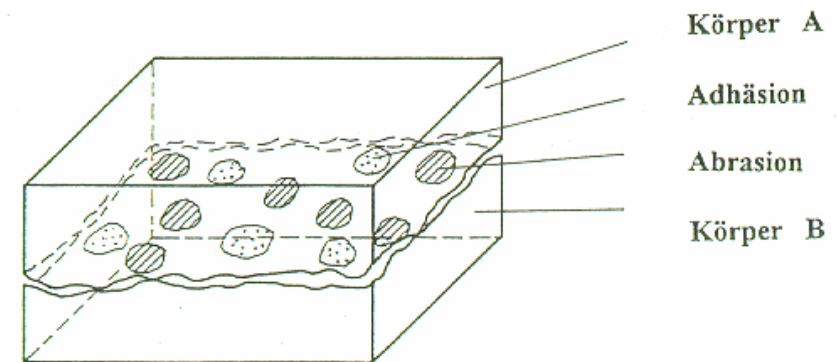
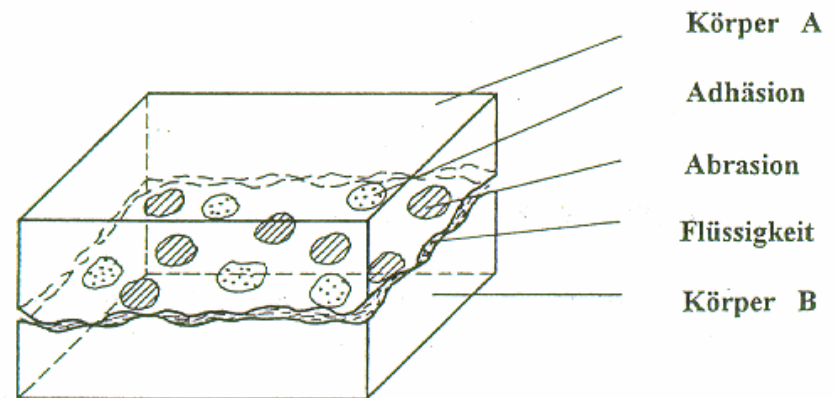


## Flüssigkeitsreibung



## Mischreibung

## Grenzreibung



## Festkörperreibung oder trockene Reibung



## Flüssigkeitsreibung

**Flüssigkeitsreibung liegt vor, wenn Werkstück und Werkzeug durch einen Schmierfilm vollständig voneinander getrennt sind**

**Gesamte Drucklast wird vom Schmierstoff getragen**

**Schmierspalt ist größer als Rauhtiefen der Reibpartner**

**Vor Beginn der Relativbewegung zwischen den Reibkörpern Aufbau eines hydrostatischen Drucks**

**Reibungskraft wird durch die Scherfestigkeit des Schmierstoffes bestimmt (dynamische Viskosität)**

**Bei hydrodynamischer Schmierung entsteht der Druck unter dem Einfluß der Relativbewegung zwischen benachbarten, nur teilweise geschlossenen Volumenbereichen**

**In der Regel treten beide Arten des Druckaufbaus zu unterschiedlichen Anteilen gleichzeitig auf**

**Hydrostatischer und hydrodynamischer Druck sind von der Oberflächentopologie der Reibpartner abhängig**



## **Festkörperreibung oder trockene Reibung**

**Direkter Kontakt nicht oxidierten Werkstoffe**

**Blech und Werkzeug sind nicht durch Schmierstoff getrennt**

**Kaltverschweißungen**

**Reine Festkörperreibung ohne Einfluß von künstlichen oder umgebungsbedingten Trennschichten kommt nur selten vor, beispielsweise unter Vakuum oder Inertgas-Atmosphäre, bei sehr hohen Flächenpressungen und bei sehr hohen elastisch-plastischen Verformungen mit einer schnellen Bildung neuer metallischer, d.h. nicht-oxidierter Oberflächen**

**Die sehr hohe Reibungskraft wird ausschließlich von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Reibpartner bestimmt**

**Die Gleitgeschwindigkeit hat nur einen geringen Einfluß**



## Grenzreibung

**Schmierstoffschicht stark zusammengequetscht**

**metallischer Kontakt wird gerade noch unterbunden**

**Bedingungen meist gegeben, wenn die Umformgeschwindigkeit zu gering ist, um hydrodynamischen Druck aufzubauen, oder wenn Belastung zu groß**

**Reibung und Verschleiß sind stark von der sich bildenden Grenzschicht zwischen den Reibpartnern beeinflusst**

**Bei Anwesenheit eines Schmierstoffes kann es zur Absorption von Schmierstoffmolekülen und zur Bildung chemischer Reaktionsprodukte auf den Oberflächen der Reibpartner kommen. Diese Trennschichten verringern die Adhäsionsneigung zwischen den Reibpartnern, so daß die Reibung deutlich niedriger ist als bei der Festkörperreibung**



## Mischreibung

**Bei Mischreibung liegen die oben genannten Reibungszustände örtlich nebeneinander vor**

**Ist der bei Blechumformvorgängen überwiegend auftretende Reibungszustand**

**Während bei der Mischreibung an den Rauheitsspitzen beispielsweise ein direkter örtlicher Kontakt der metallischen Reibpartner besteht, kann an anderen Stellen eine vollständige Trennung der Oberflächen durch einen Schmierstoffilm vorliegen**

**Die relativen Anteile der einzelnen Reibungszustände an der Gesamtreibung sind von der Gleitgeschwindigkeit, der Flächenpressung und der Schmierstoffviskosität abhängig**

**Der hydrodynamische Anteil der Reibung nimmt mit steigender Gleitgeschwindigkeit und Schmierstoffviskosität zu und die Gesamtreibungskraft ab**





## Abhängigkeit des Reibzustandes von Normalkraft und Relativgeschwindigkeit

Keiner der zuvor geschilderten Reibmechanismen tritt im Tiefziehprozeß allein auf

Beim Aufsetzen der Werkzeugoberfläche auf das Blech beschränkt sich der Kontakt zunächst nur auf die Rauheitserhebungen

Bereits bei geringen Normalkräften kommt es zu einer mechanischen Einebnung der Rauheitsspitzen

In den Profiltälern bildet sich hydrostatischer Druck

Teil-Verdrängung des Schmierstoffes führt zu Grenzschnierfilm

Relativbewegung der Oberflächen bewirkt zusätzliche Schubspannungen; dies führt zur weiteren Einebnung der Spitzen

Erhöhung der Ziehgeschwindigkeit bewirkt Zunahme an hydrodynamischer Flüssigkeitsreibung

# Reibverhältnisse bei der Blechumformung



**Tribologischen Verhältnisse in der Blechumformung:**

**geringe Relativgeschwindigkeiten**

**geringe Flächenpressungen**

**große Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück**

**In der Wirkfuge liegt zumeist Mischreibung vor**

**Die typischerweise vorliegenden niedrigen Relativgeschwindigkeiten sind für reine Flüssigkeitsreibung normalerweise nicht ausreichend**

**Bei Anwesenheit von Schmierstoff kann die Reibungszahl bei höheren spezifischen Flächenpressungen mit zunehmender Flächenpressung abfallen**

**Der Einfluß der Flächenpressung auf die Mischreibung beruht vermutlich auf der Einformung der Rauheitsspitzen des weicheren Reibpartners und der Zunahme der Schmierstoffviskosität mit steigendem Druck**

**Bei Anwesenheit von Schmierstoff nimmt die Reibung bei sonst konstanten Bedingungen mit steigender Ziehgeschwindigkeit ab**

# Formgebungszustände bei der Blechumformung

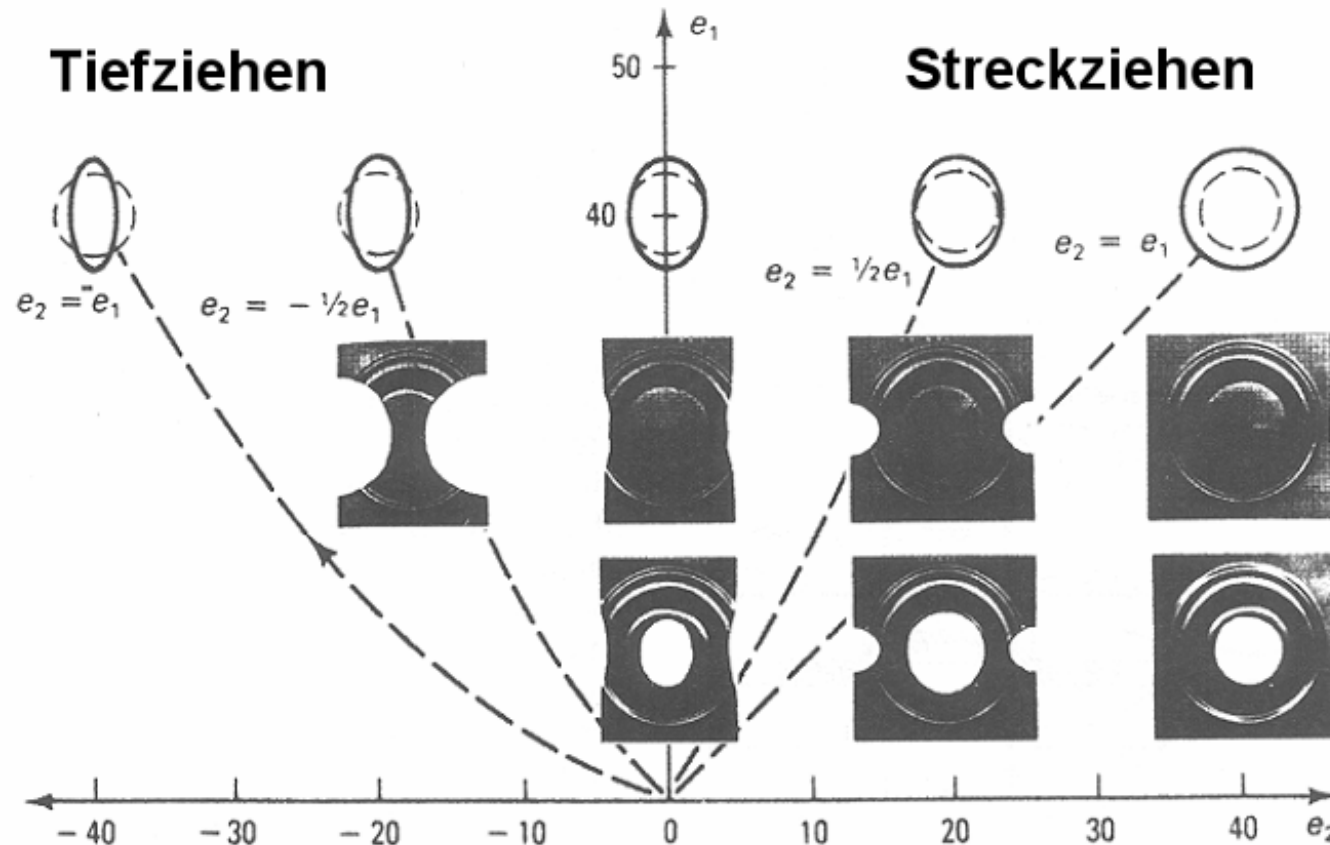


Ziehteilflansch, Einlaufradius:  
geringe Reibung erwünscht

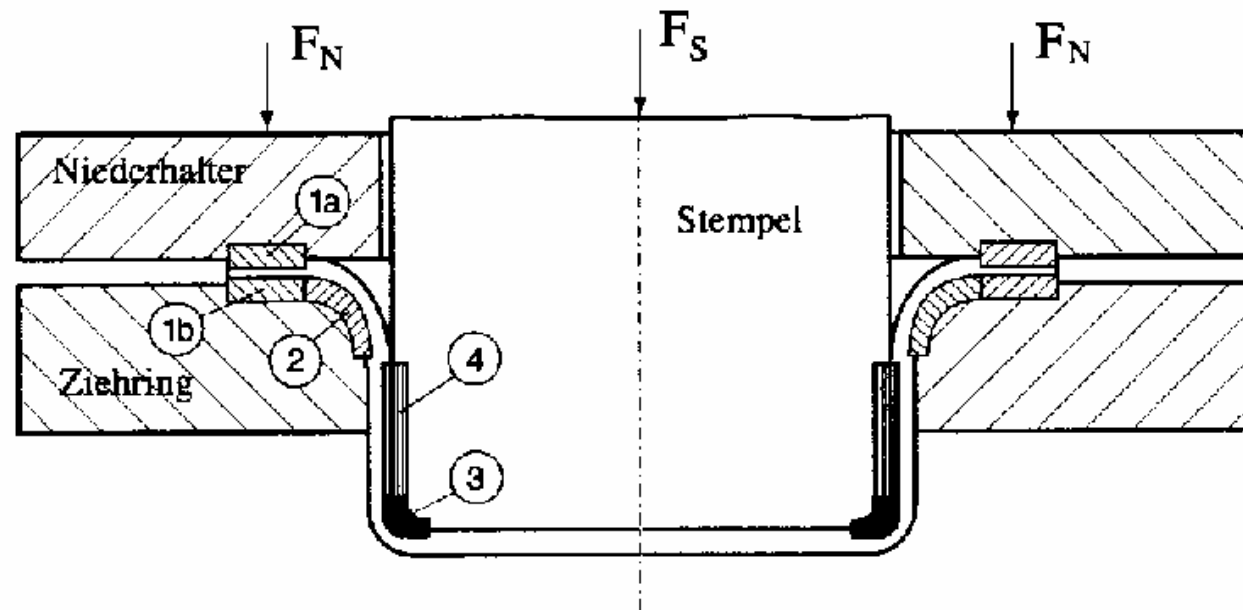
Außenkanten des Bleches:  
hohe Reibung erwünscht

Stempelkante:  
hohe Reibung erwünscht

Zwischen Stempel und Blech:  
geringe Reibung erwünscht



# Formgebungszustände bei der Blechumformung



## Tribosysteme:

- ①a Niederhalter / Schmierstoff / Blech
- ①b Ziehring / Schmierstoff / Blech
- ② Ziehringrundung / Schmierstoff / Blech
- ③ Stempelkantenrundung / Schmierstoff / Blech
- ④ Stempelmantelfläche / Schmierstoff / Blech



**Anforderungen an das Reibungsverhalten sind nach Umformverfahren unterschiedlich**

**Wichtige Zonen unterschiedlicher Reibverhältnisse und Reibkräfte beim Tiefziehen: Zone zwischen Ziehring und Niederhalter, Einlaufradius, Stempelkopfradius, bei flach bombierten Karosserieteilen auch die Stempelstirn**

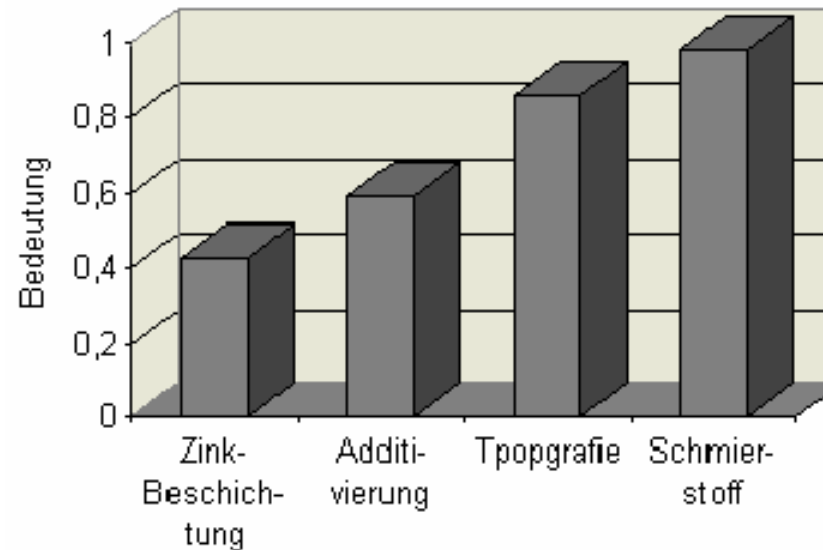
**Tiefziehen: Im Bereich des Ziehteilflansches und des Einlaufradius sollte die Reibung gering sein um die Umformkräfte klein zu halten. An der Stempelkante sollte zur Erhöhung der in der Zarge übertragbaren Umformkraft die Reibung groß sein.**

**Streckziehen: andere Anforderungen an Reibung als beim Tiefziehen, die Reibung an den Außenkanten des Bleches sollte für eine feste Einspannung hoch sein. Zwischen Stempel und Blech sollte die Reibung gering sein um eine gleichmäßige Spannungs- und Formänderungsverteilung zu erreichen**

**Das Ziehen von Karosserieteilen stellt eine Kombination der Verfahren Streckziehen und Tiefziehen dar. Bei der Herstellung tieferer Ziehteile wie z.B. Kotflügel oder Ölwannen dominiert der Tiefziehanteil, während beim Ziehen flacher Teile (z.B. Motorhaube, Dach) der Streckziehanteil höher ist. Um optimale Umformergebnisse zu erzielen, sind unterschiedliche Reibungszustände in den verschiedenen Kontaktbereichen zwischen Werkzeug und Werkstück anzustreben.**



**Betrachtungen zu den Haupteinflußgrößen auf Reibung und Sensitivitätsabschätzung legt Blechumformung und Mischreibung zugrunde**



*nach Staevens*

## Haupteinflußgrößen

1. Flächenpressung
2. Oberflächenbeschaffenheit von Werkzeug und Werkstück (Anteil der Mikrokontaktfläche an der Gesamtkontaktfläche)
3. Schmierstoff: Scherfestigkeit der Grenzschmierschicht (Viskosität )

**Aus Arbeiten zu Tief- und Streckziehen zeigt sich, daß der Oberflächenbeschaffenheit und dem Schmierstoff die entscheidende Bedeutung zukommt**



Einleitung

Grundlagen der Reibung

## **Experimente**

Theorien zur Oberflächenmechanik

Kristallmechanik

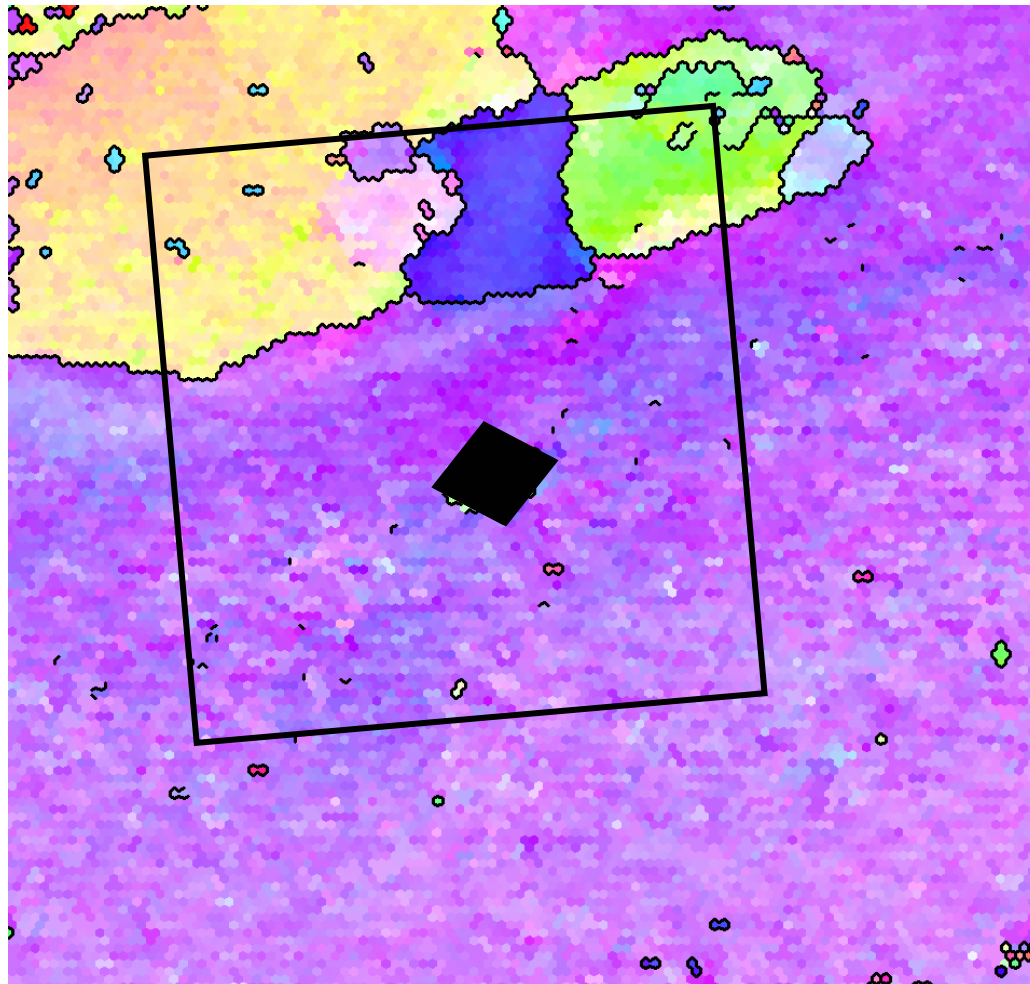
FE Simulationen zur Rückfederung

Reibgesetze für die Blechumformung

# Experimente zur Rauheitsentwicklung



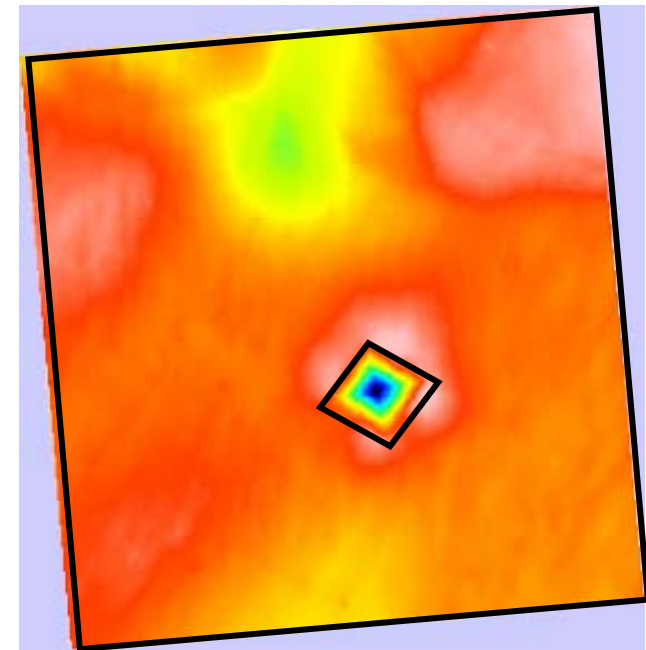
## Mikrotextur



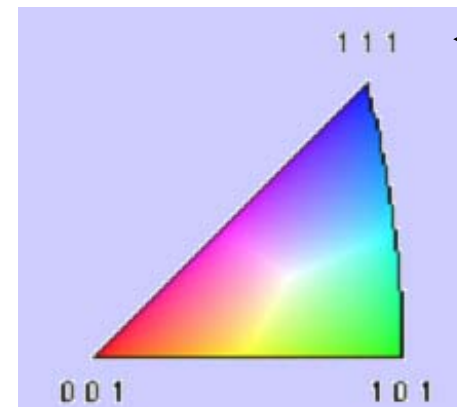
125.0  $\mu\text{m}$  = 25 steps    Boundary levels: 15°  
IPF [100]

$\varepsilon = 12\%$

## Rauheit



100  $\mu\text{m}$

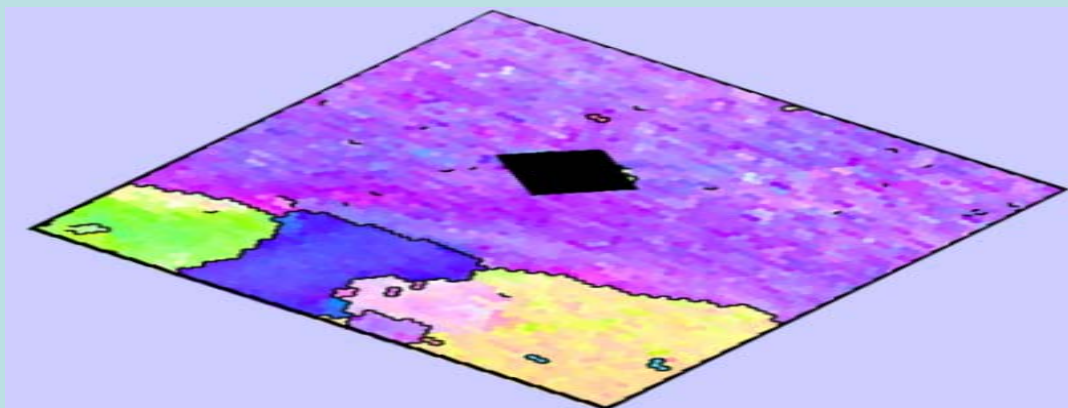
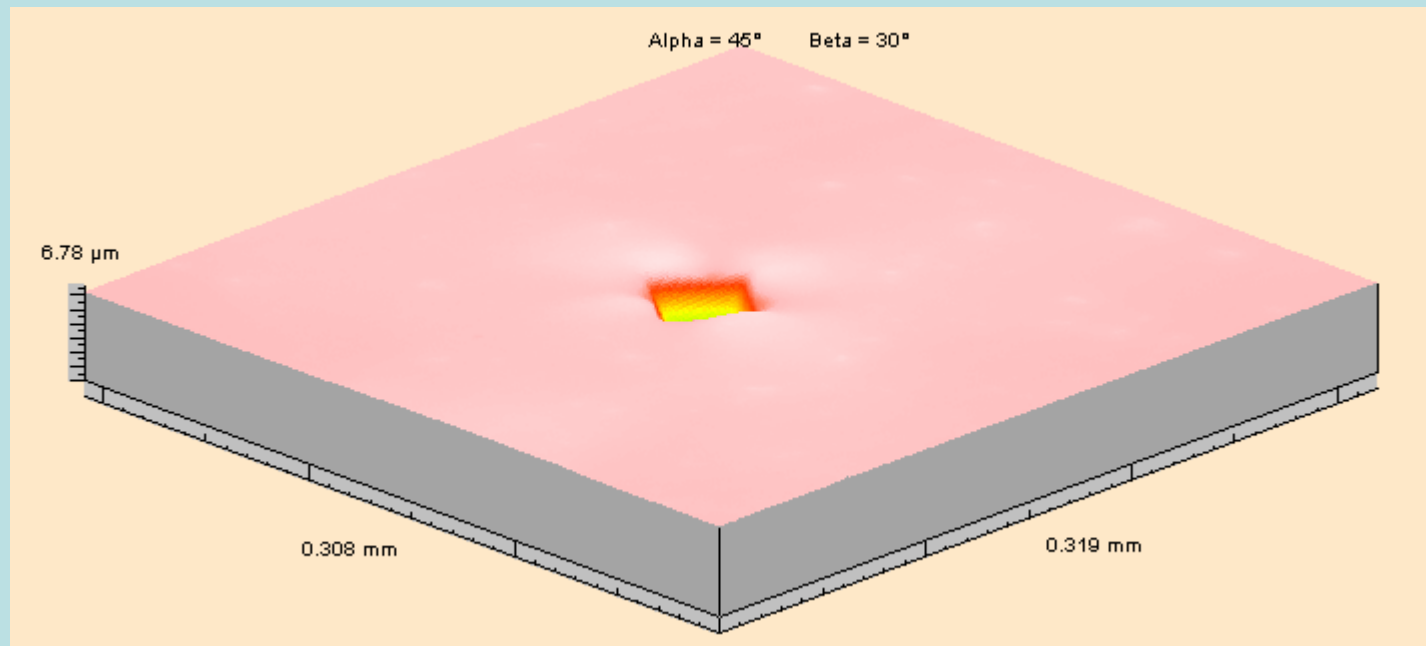




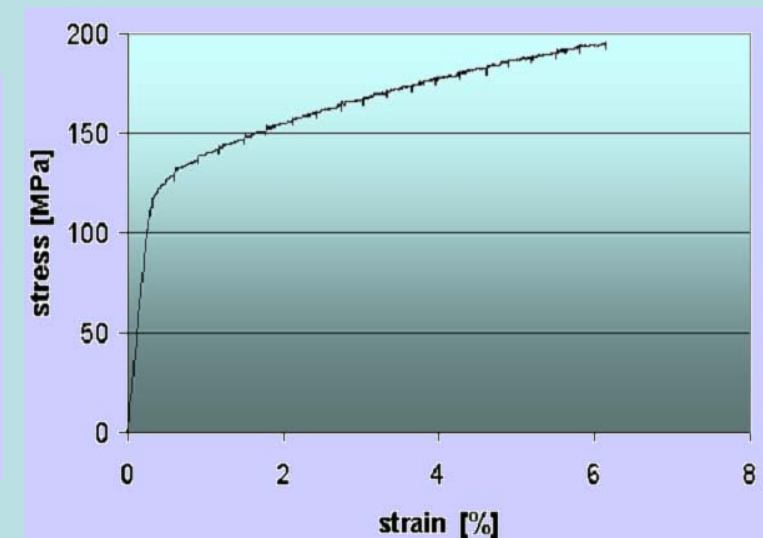
# Experimente zur Rauheitsentwicklung



## Rauheit

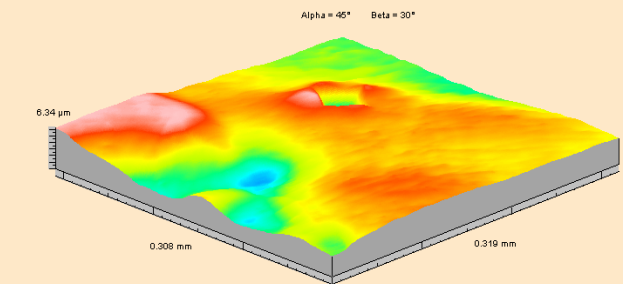
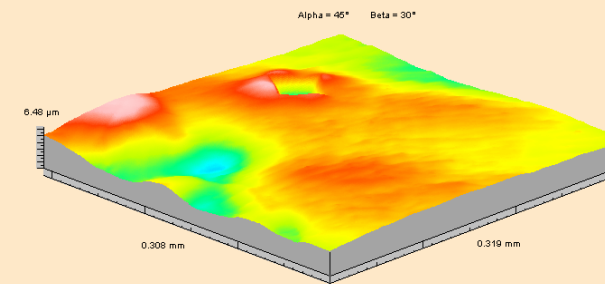
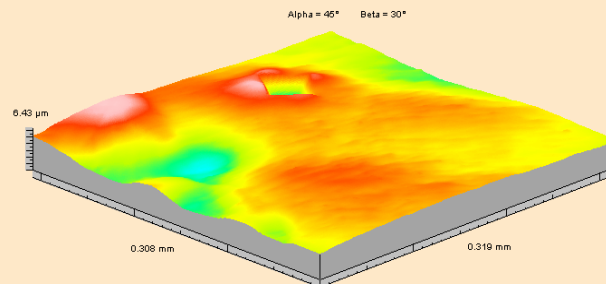
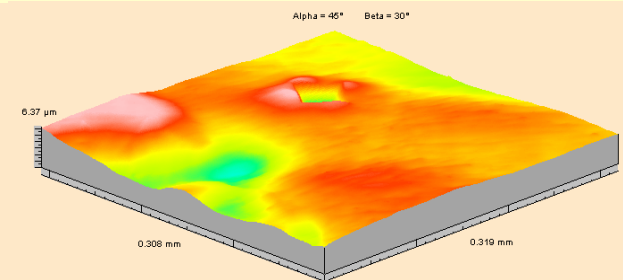
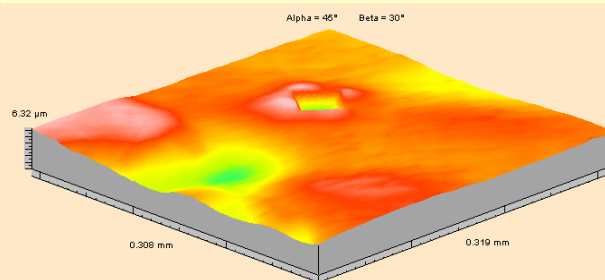
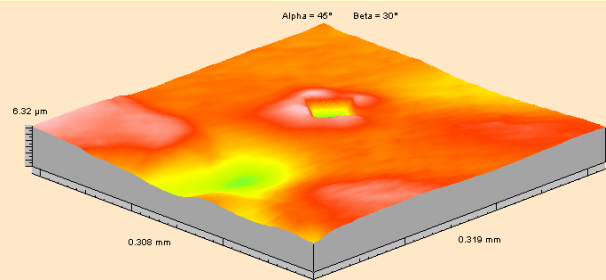
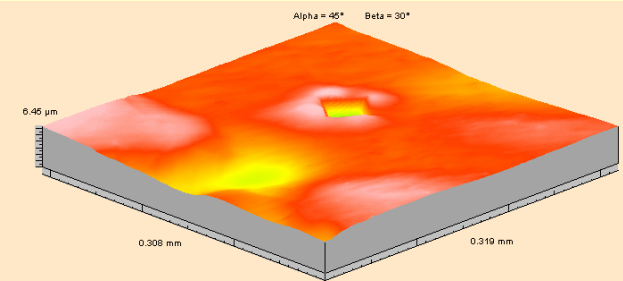
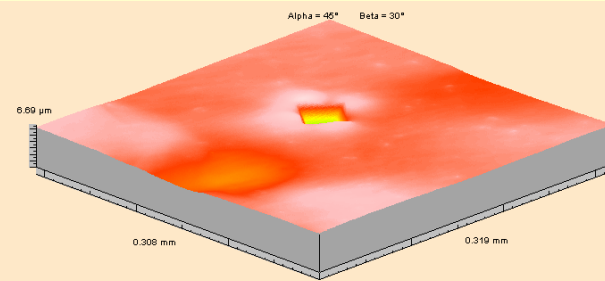
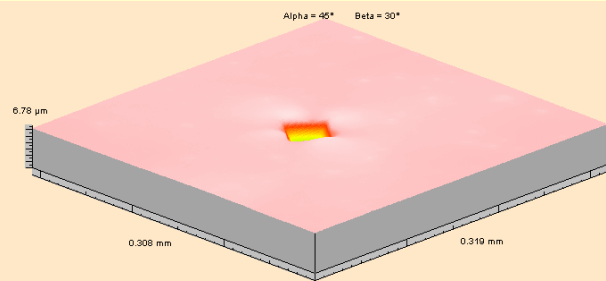


**Mikrotextur**

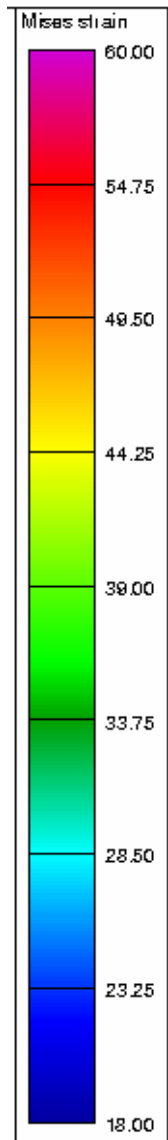


**Mechanik**

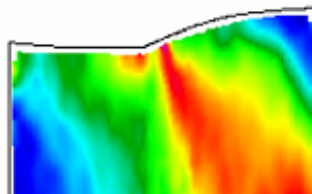
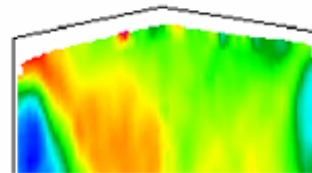
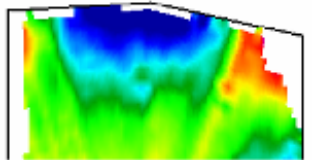
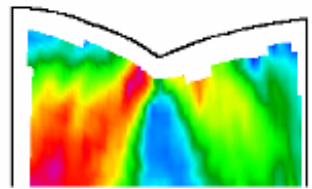
# Experimente zur Rauheitsentwicklung



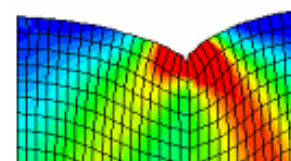
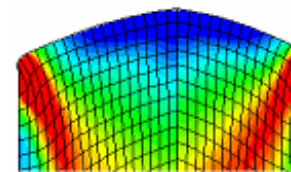
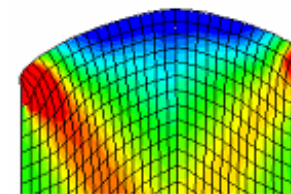
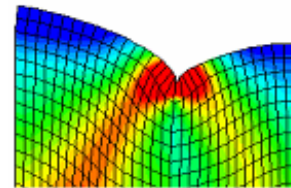
# Experimente zur Rauheitsentwicklung



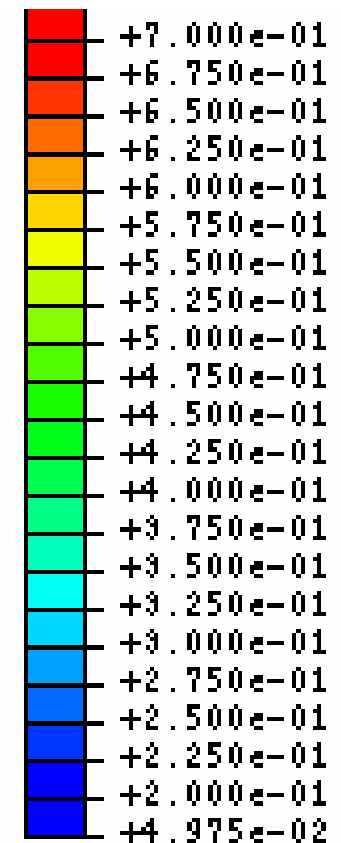
## Experiment (Bikristalloberfläche)



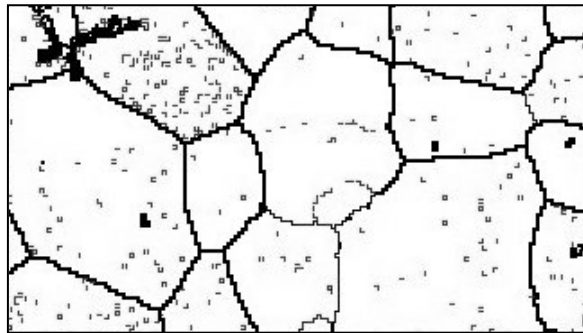
## Simulation (Kristallplastisch)



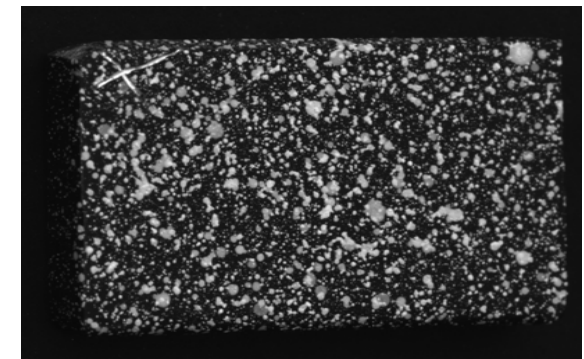
10mm



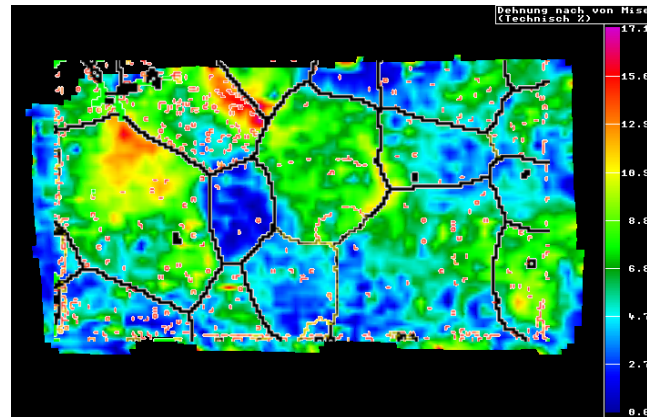
# Experimente zur Rauheitsentwicklung



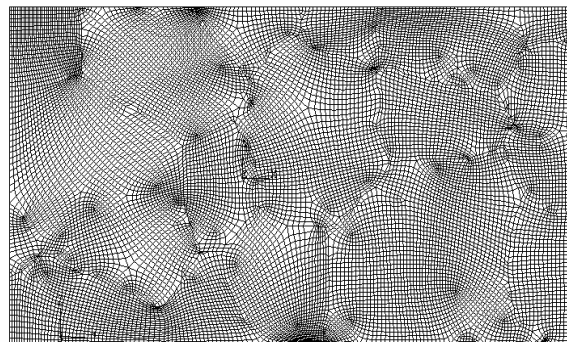
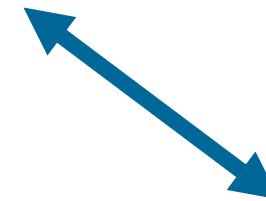
microtexture



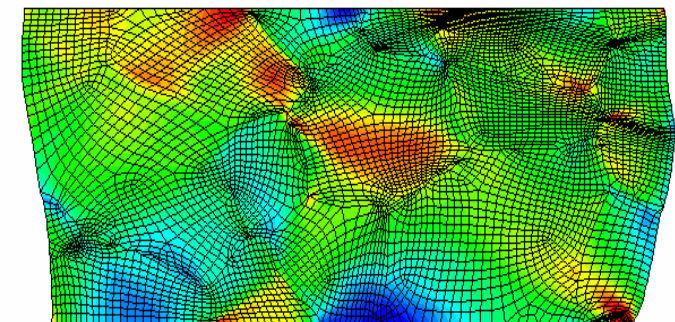
photogrammetry



strain mapping



FEM mesh

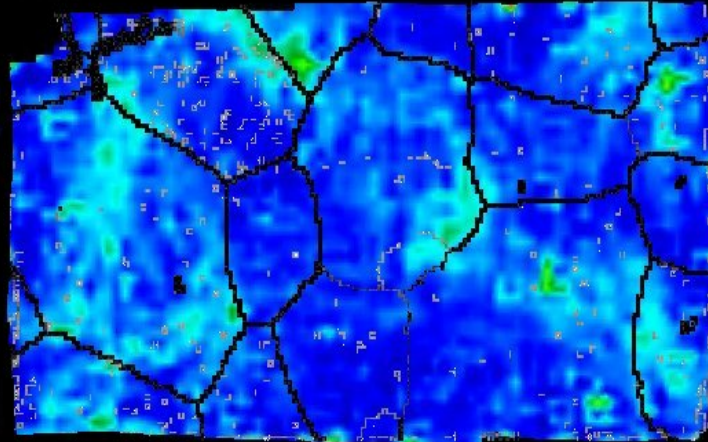


FEM simulation

# Experimente zur Rauheitsentwicklung



3%

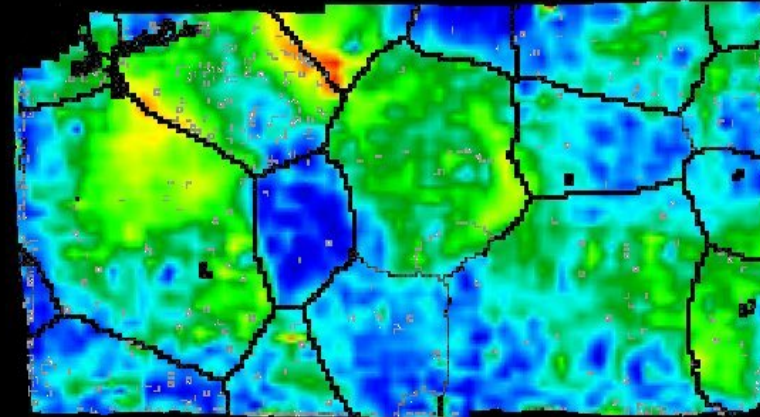


5mm

Dehnung nach von Mises  
(Technisch %)



8%

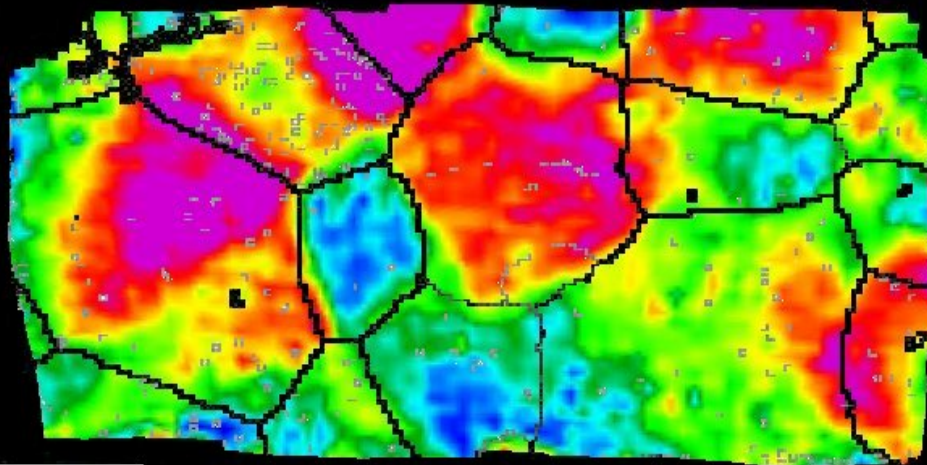


5mm

Dehnung nach von Mises  
(Technisch %)



13%

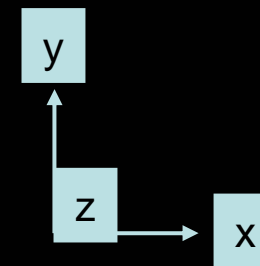


5mm

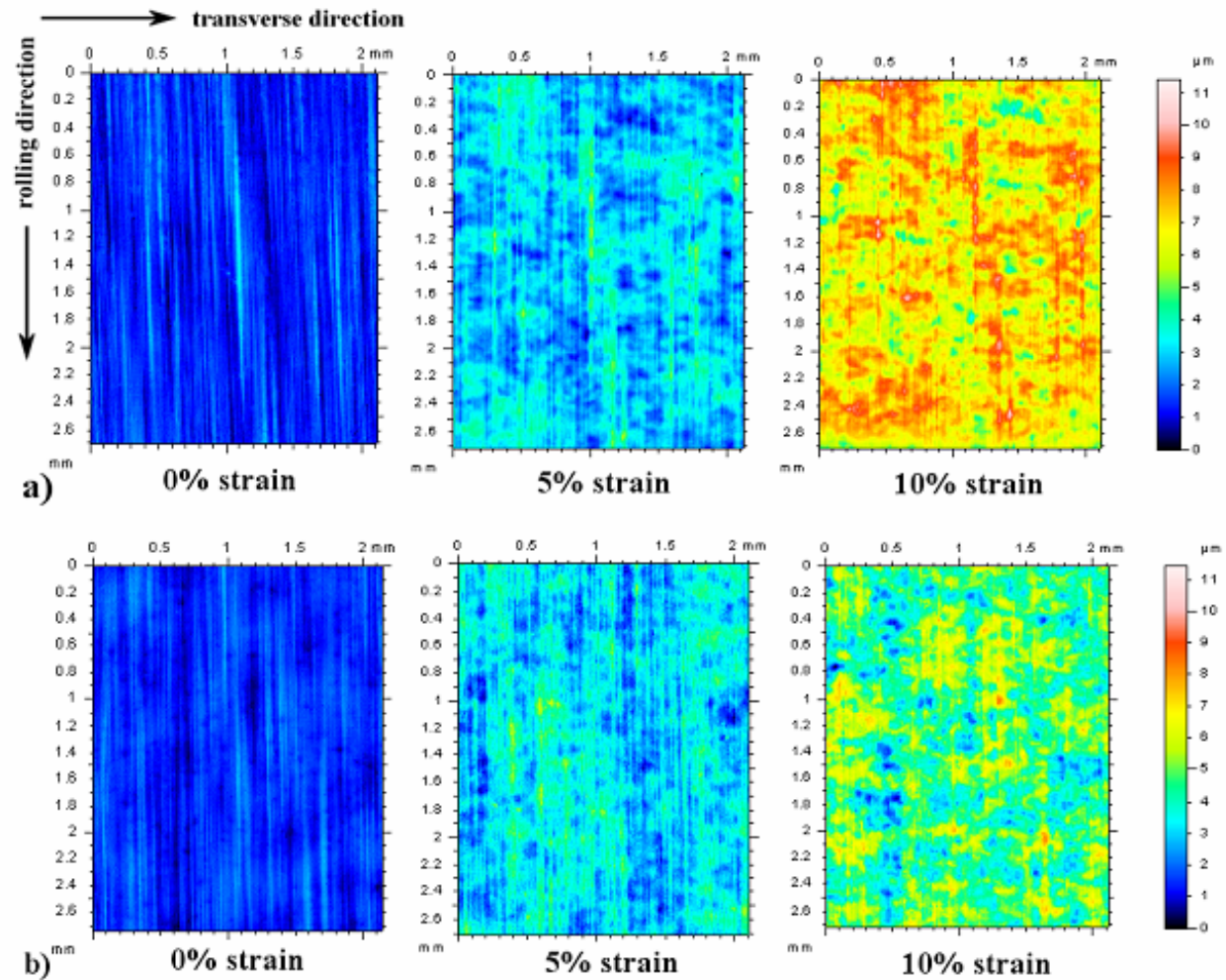
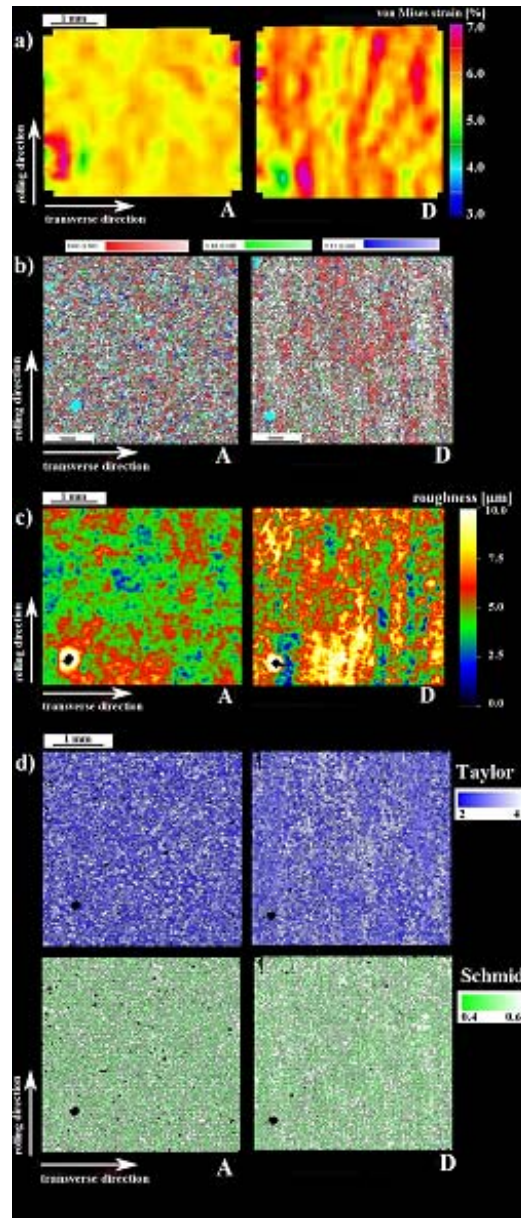
Dehnung nach von Mises  
(Technisch %)

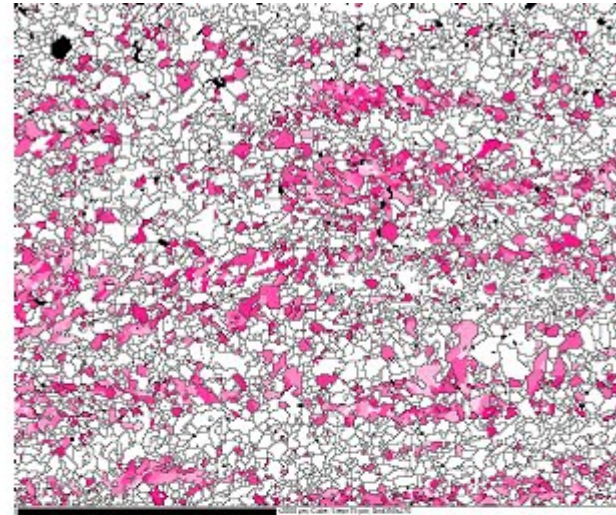
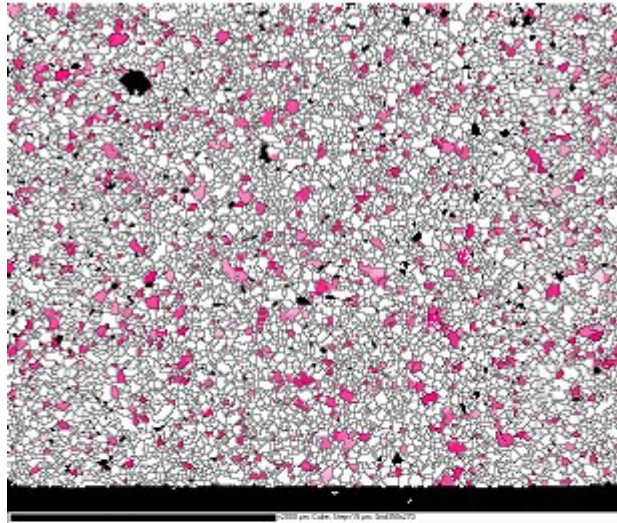


plastische v. Mises  
Dehnung in unterschiedlichen  
Körnern

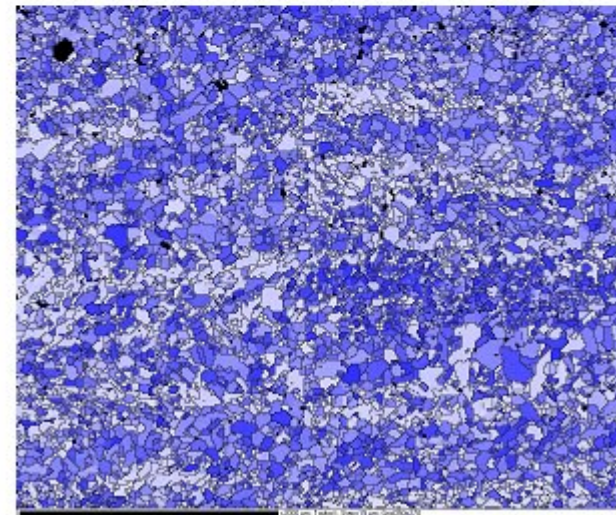
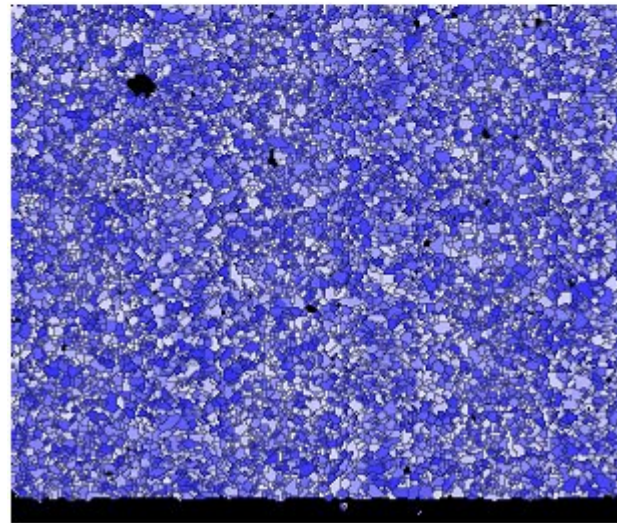


# Experimente zur Rauheitsentwicklung



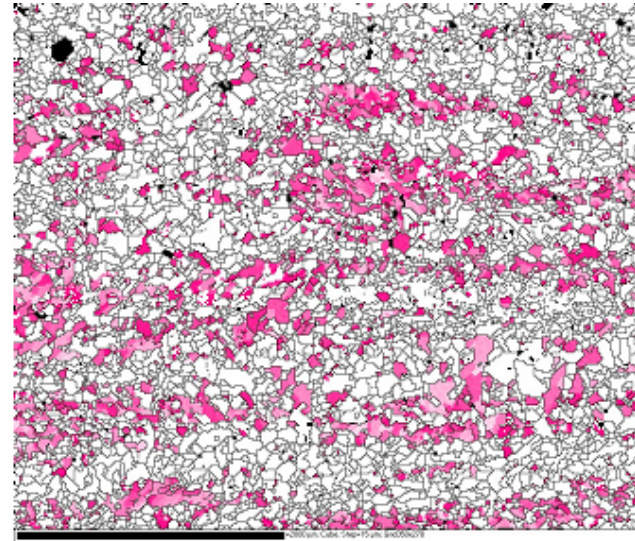
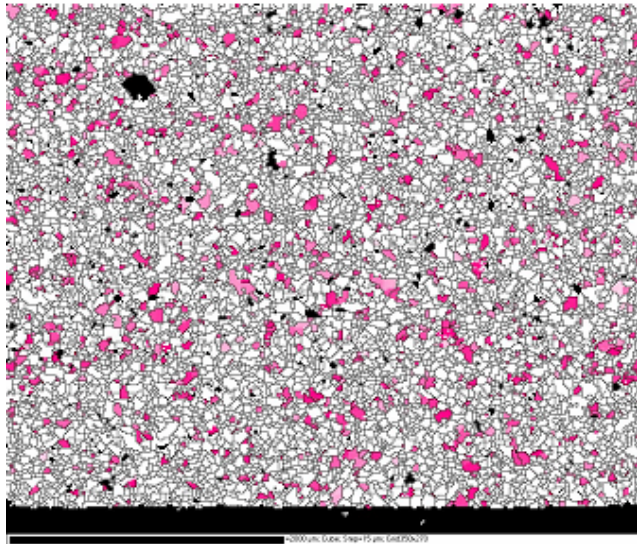


**Texturzeitigkeit**

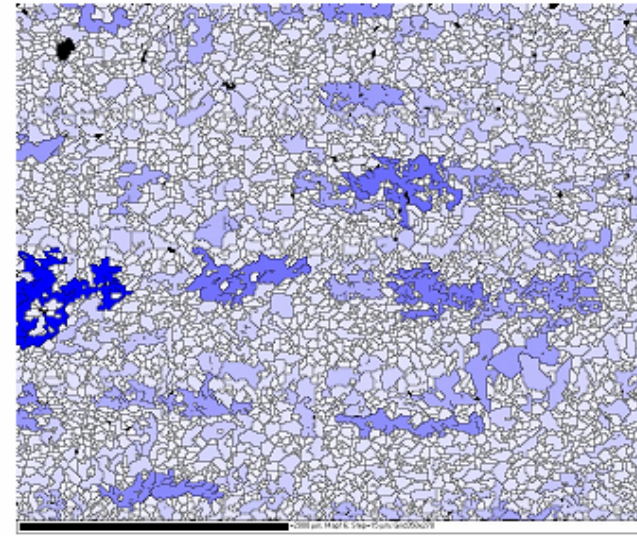
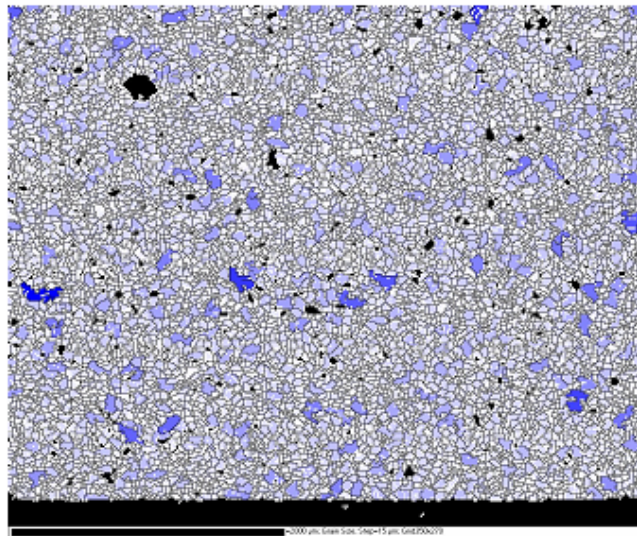


**Mikromechanik  
(Taylorfaktor)**

# Experimente zur Rauheitsentwicklung



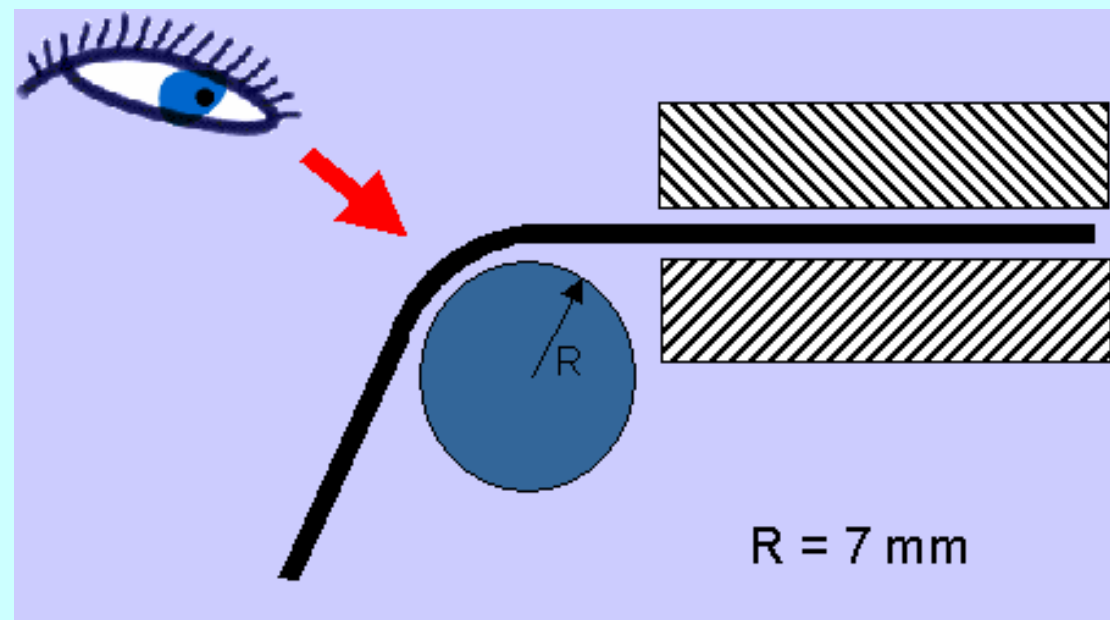
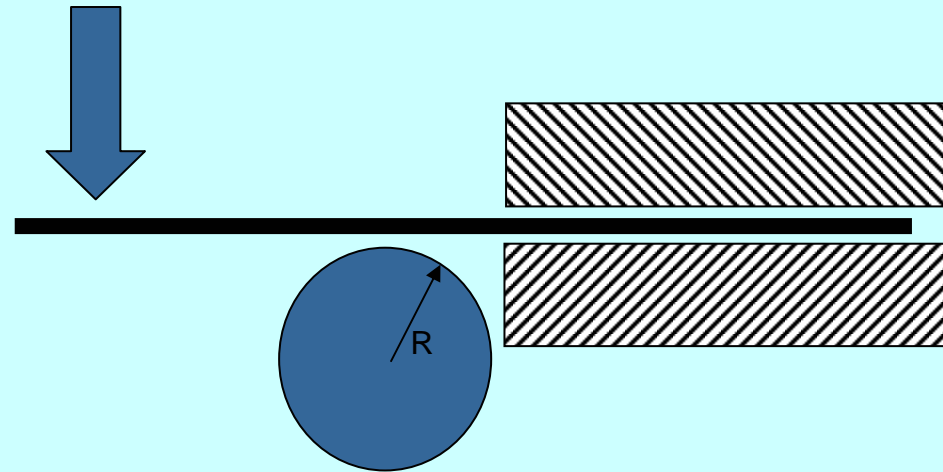
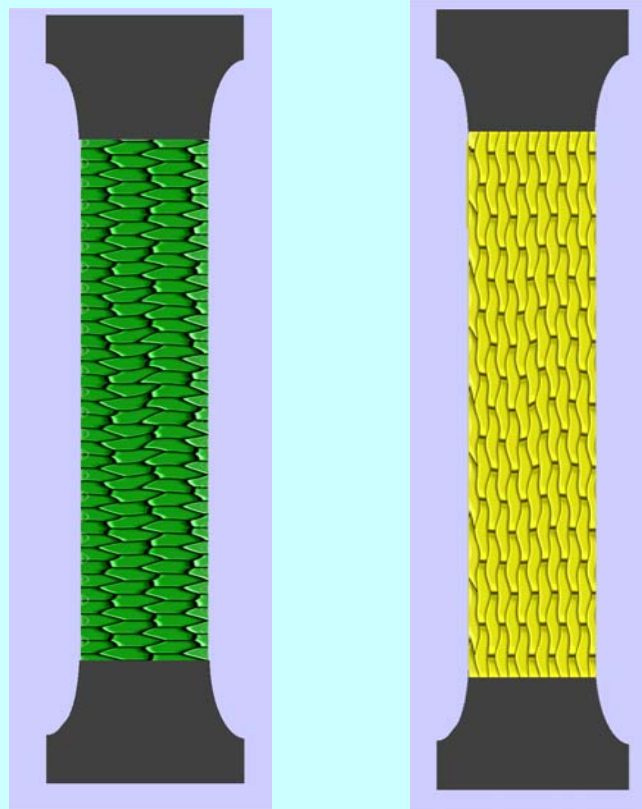
**Texturzeitigkeit**



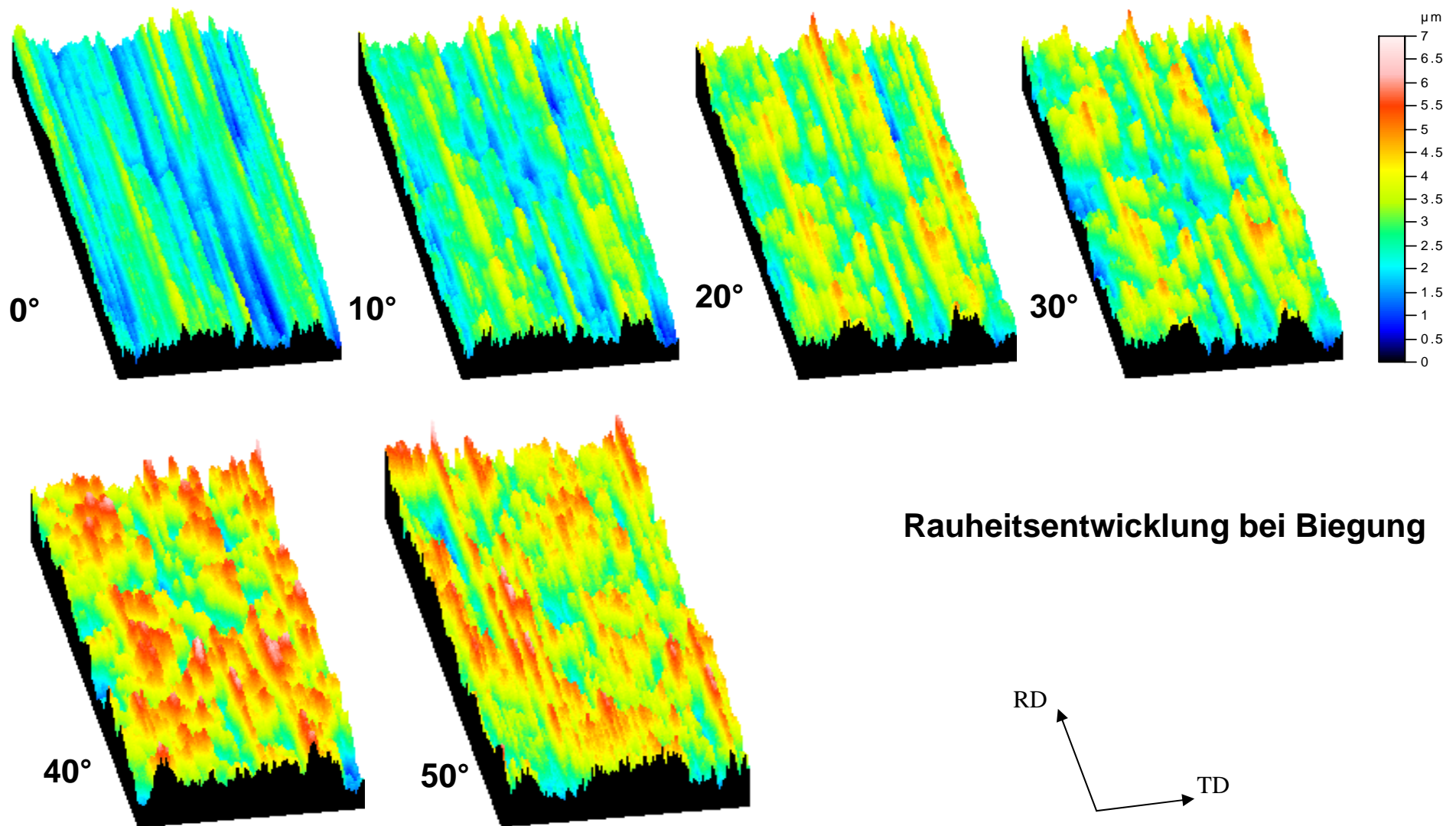
**Kornzeitigkeit**



# Experimente zur Rauheitsentwicklung



# Experimente zur Rauheitsentwicklung

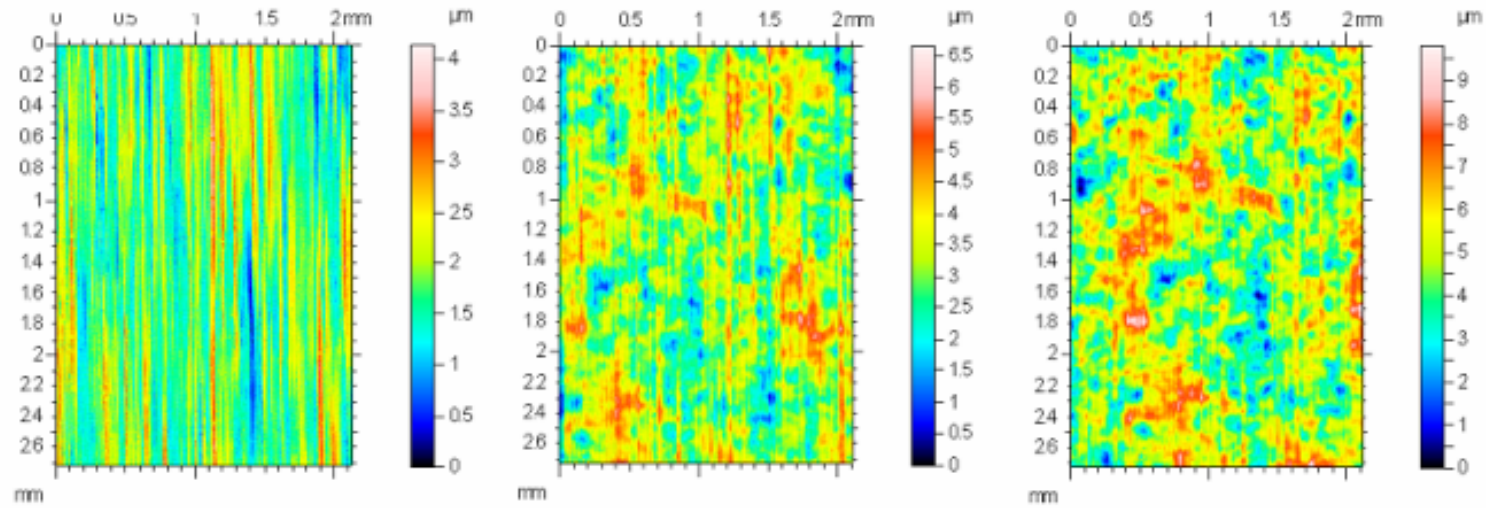


**Rauheitsentwicklung bei Biegung**

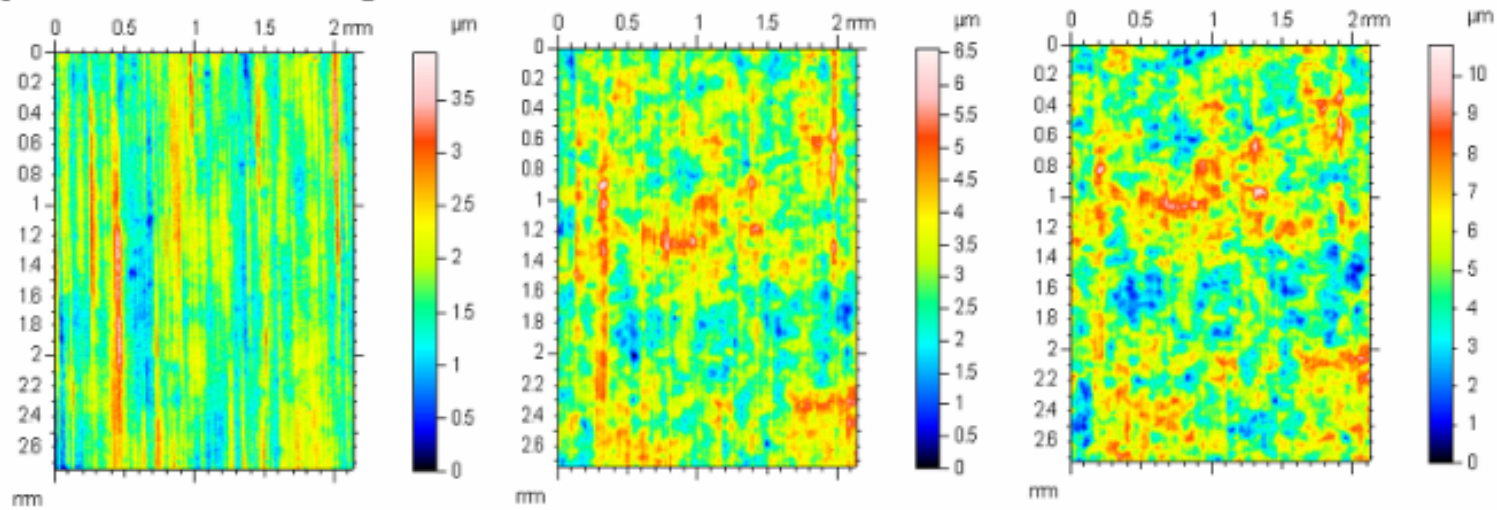
# Experimente zur Rauheitsentwicklung



## unbeschichtet



## Polymerbeschichtung

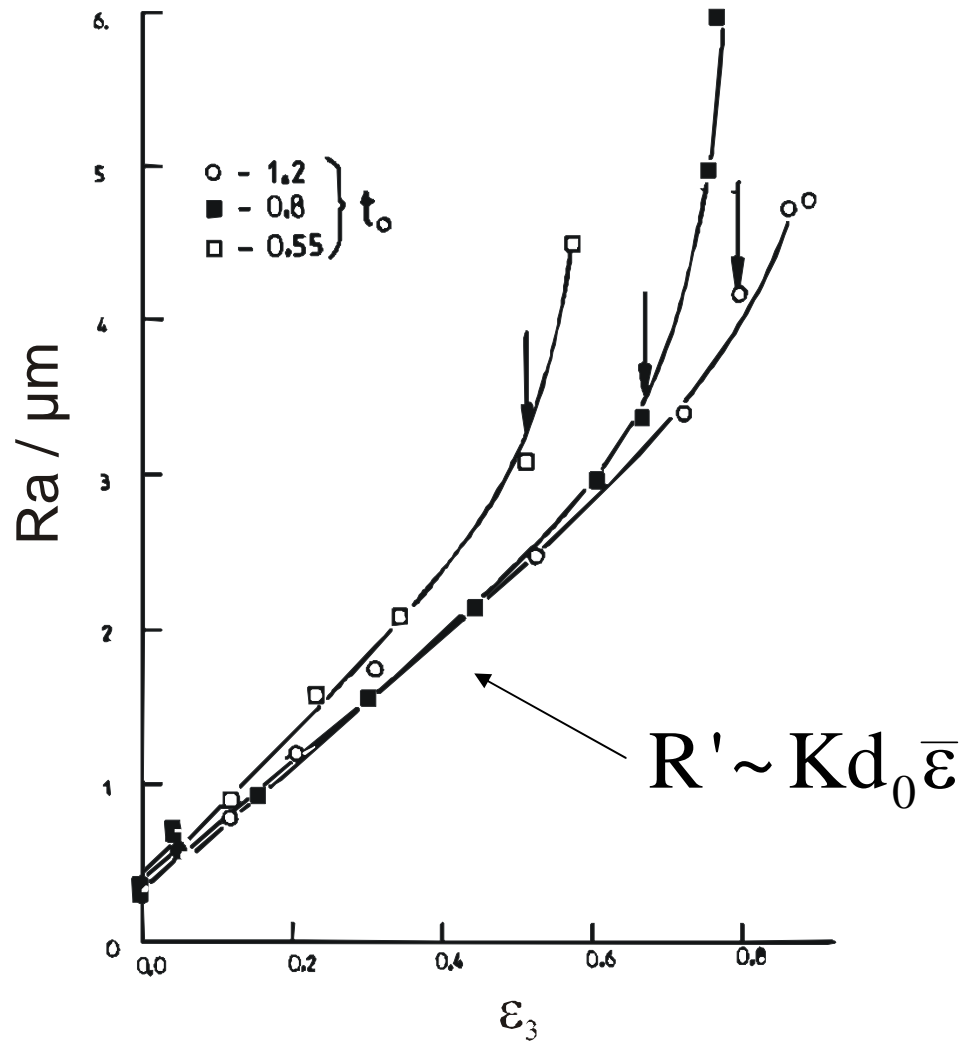


0%

5%

10%

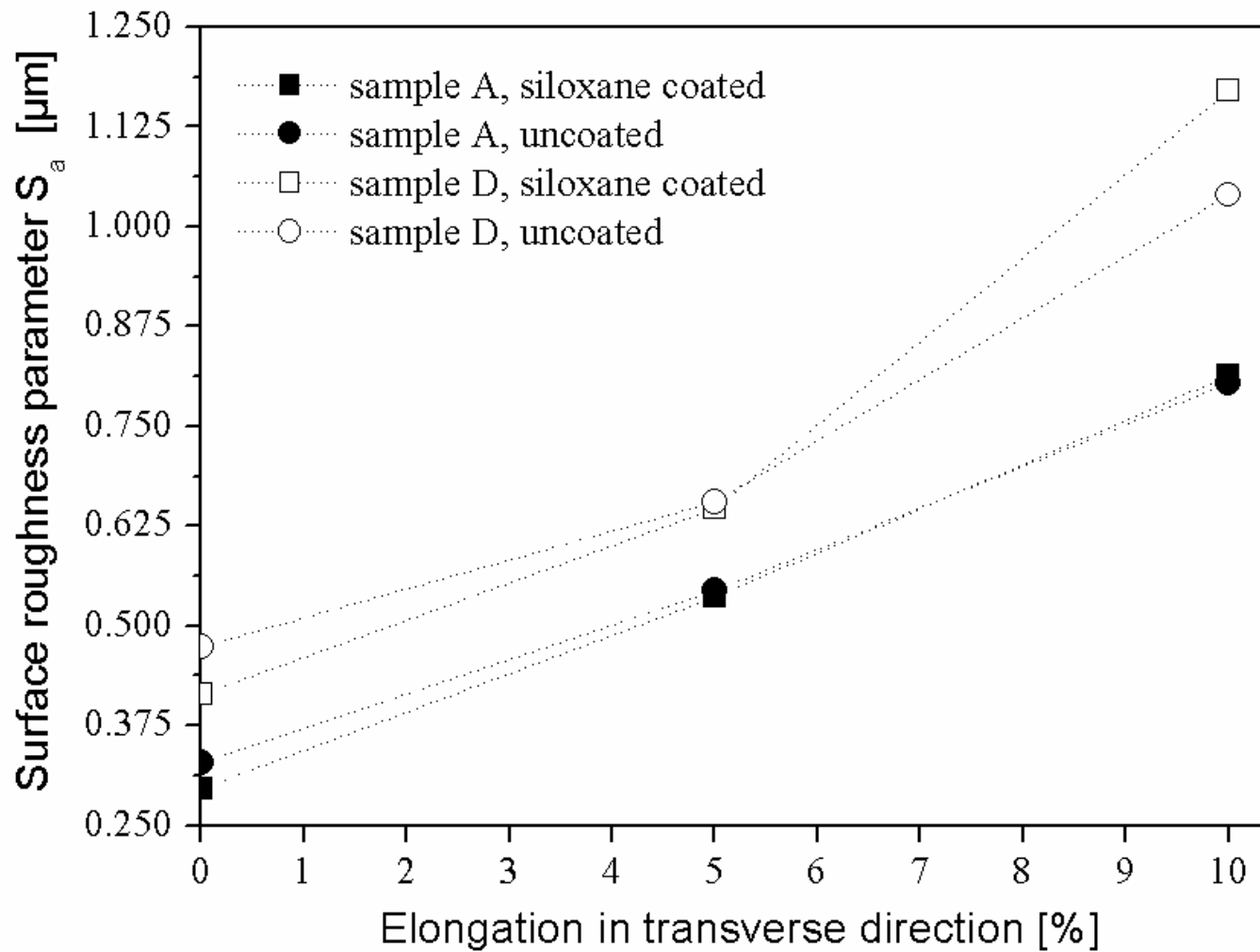
# Rauheitsentwicklung der freien Oberfläche



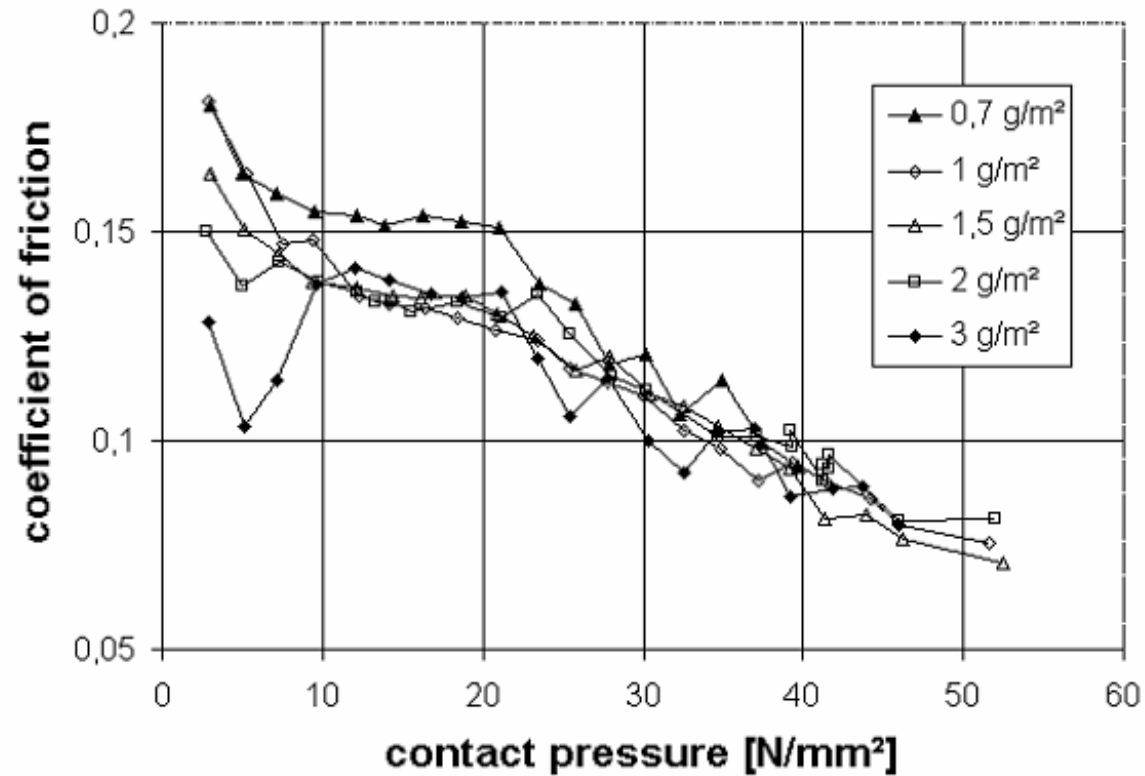
$t_0$  = Blechdicke  
 $d_0$  = 67  $\mu m$   
 $e_3$  = Dehnung

Daten:  
Wilson, D. V.  
Roberts, W. T.  
Rodriguez, P. M. B.  
Met Trans A, Sep. 1981, 1595ff

# Rauheitsentwicklung der freien Oberfläche

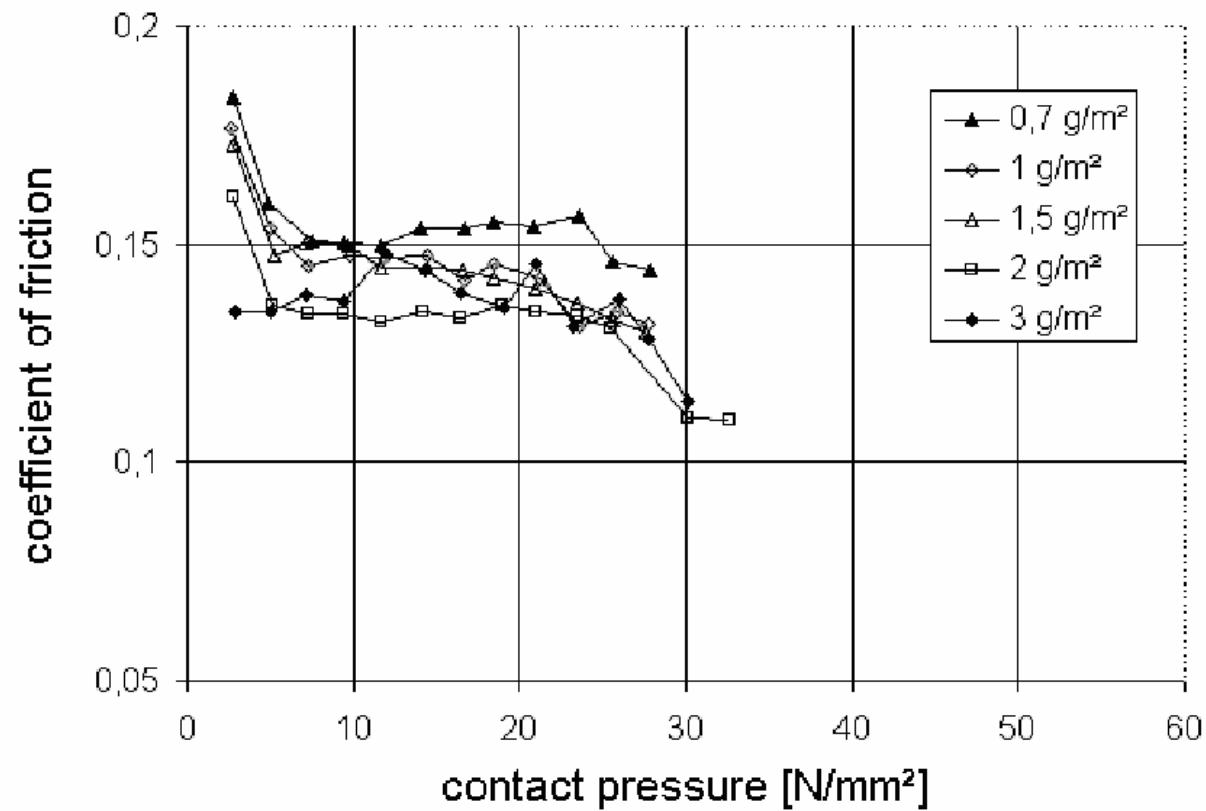


# Experimente zur Reibung



EDT (Daten von Schmoekel et al.)

# Experimente zur Reibung



**EBT (Daten von Schmoekel et al.)**

# Charakterisierung der Rauheit



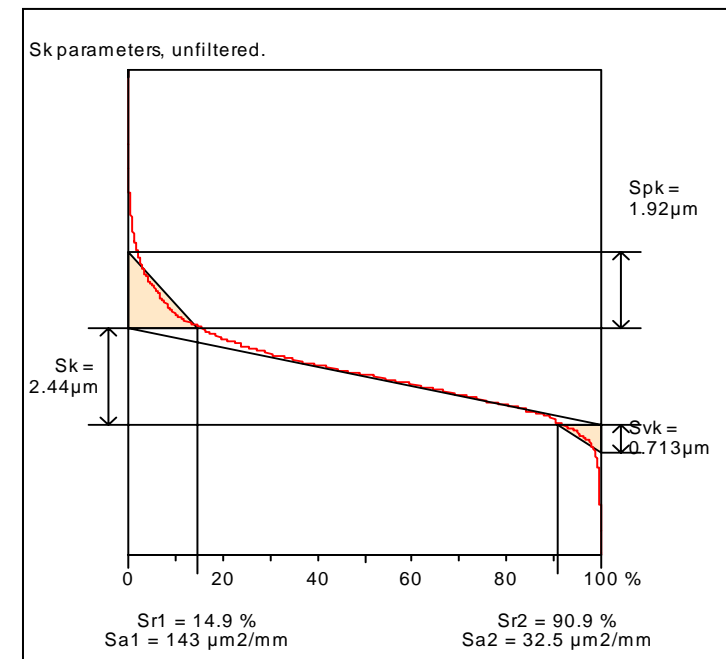
3D-Parameters	
Sa (µm)	mean absolute deviation from the mean
Sq (µm)	root mean squared deviation from the mean
Sp (µm)	distance between the highest point and the mean
Sv (µm)	distance between the lowest point and the mean
Ssk	skewness of the hights distribution zero = normal distribution; neg.= larger valleys than peaks; pos.= larger peaks than valleys
Sku	kurtosis of the hights distribution zero = normal distribution; neg.= more valleys than peaks, pos.= more peaks than valleys
SPc (pks / mm <sup>2</sup> )	peak count between two thresholds
Sds (pks / mm <sup>2</sup> )	density of peaks (higher than 8 neighbours)
Spk (µm)	reduced peak height
Svk (µm)	reduced valley height
Sk (µm)	core roughness depth
Sr1 (%)	peak material component
Sr2 (%)	valley material component
Sbi	surface bearing index

$$Sa = \frac{1}{NM} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M |z_{x,y}|$$

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M z_{x,y}^2}$$

$$Ssk = \frac{1}{NMS_q^3} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M z_{x,y}^3$$

$$Sku = \frac{1}{NMS_q^4} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M z_{x,y}^4$$







Einleitung

Grundlagen der Reibung

Experimente

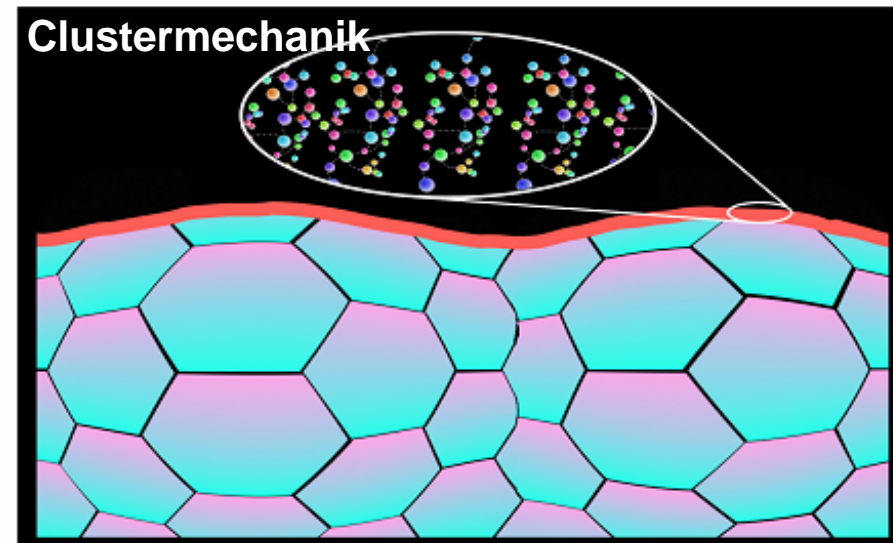
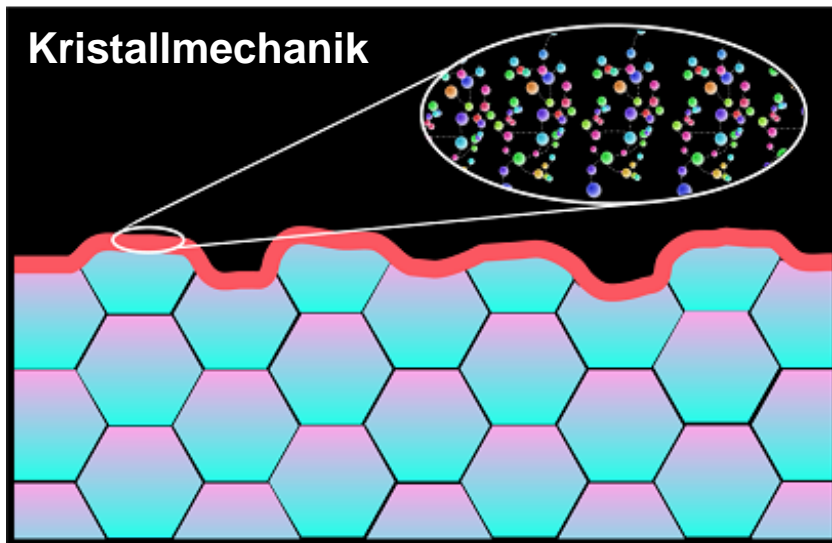
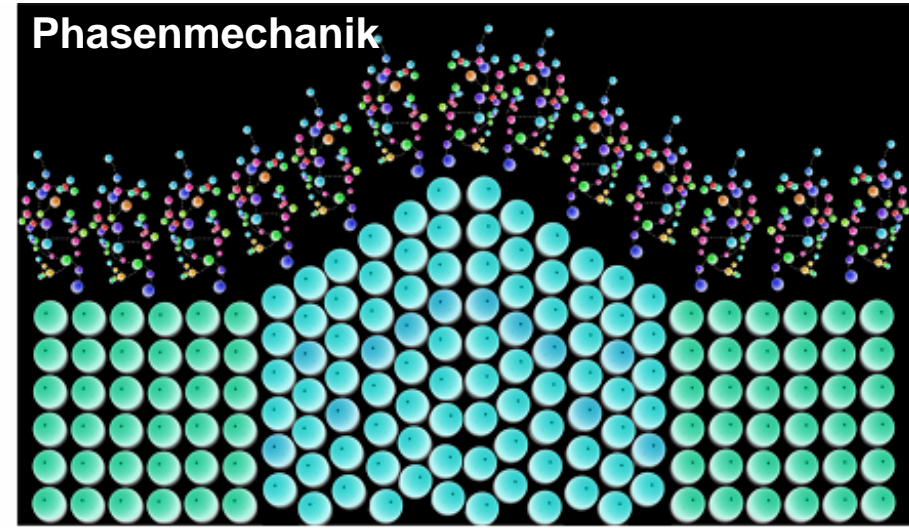
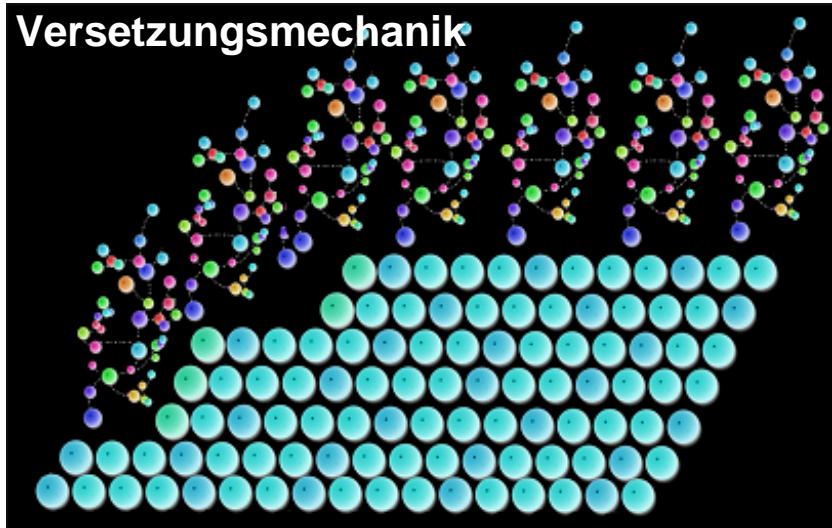
# **Theorien zur Oberflächenmechanik**

Kristallmechanik

FE Simulationen zur Rückfederung

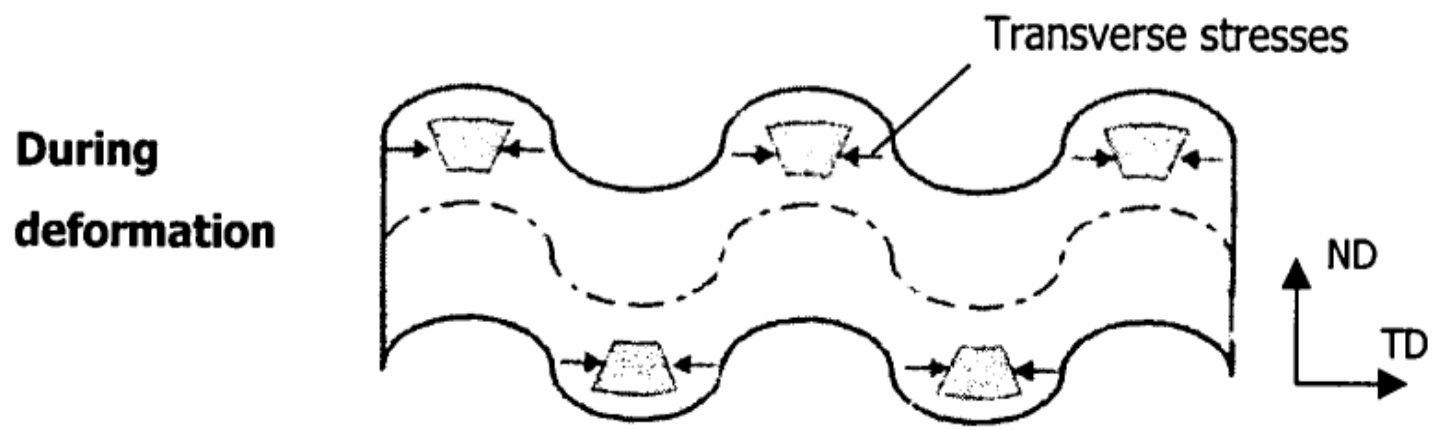
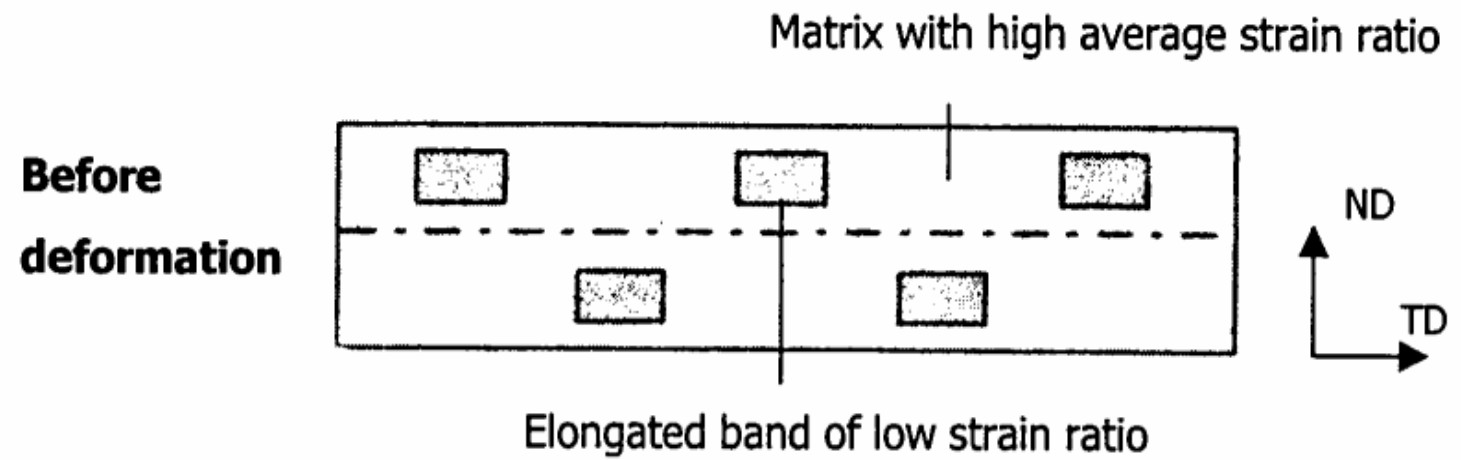
Reibgesetze für die Blechumformung

# Theorien zur Rauheitsentwicklung

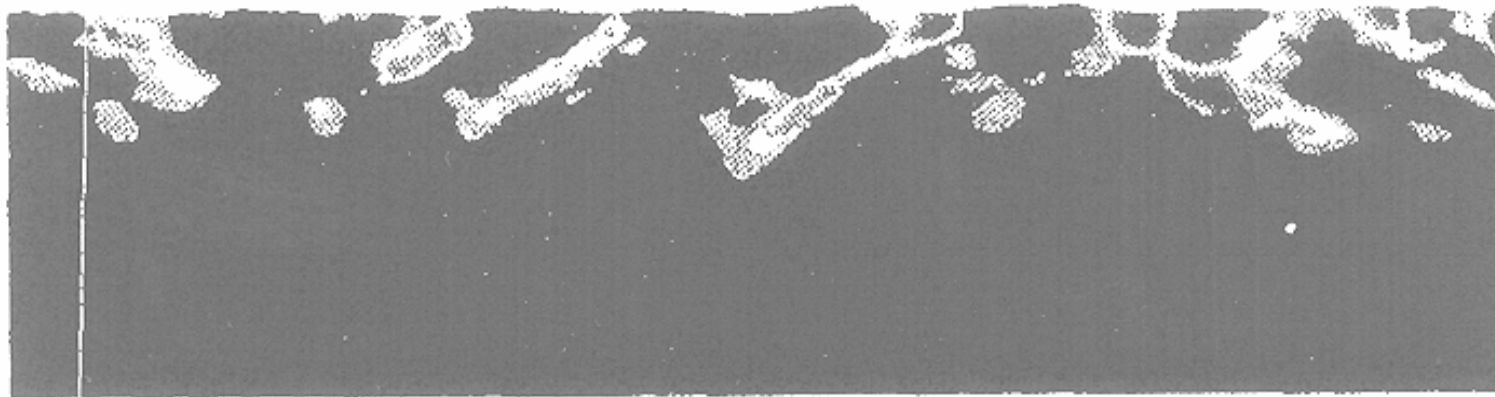
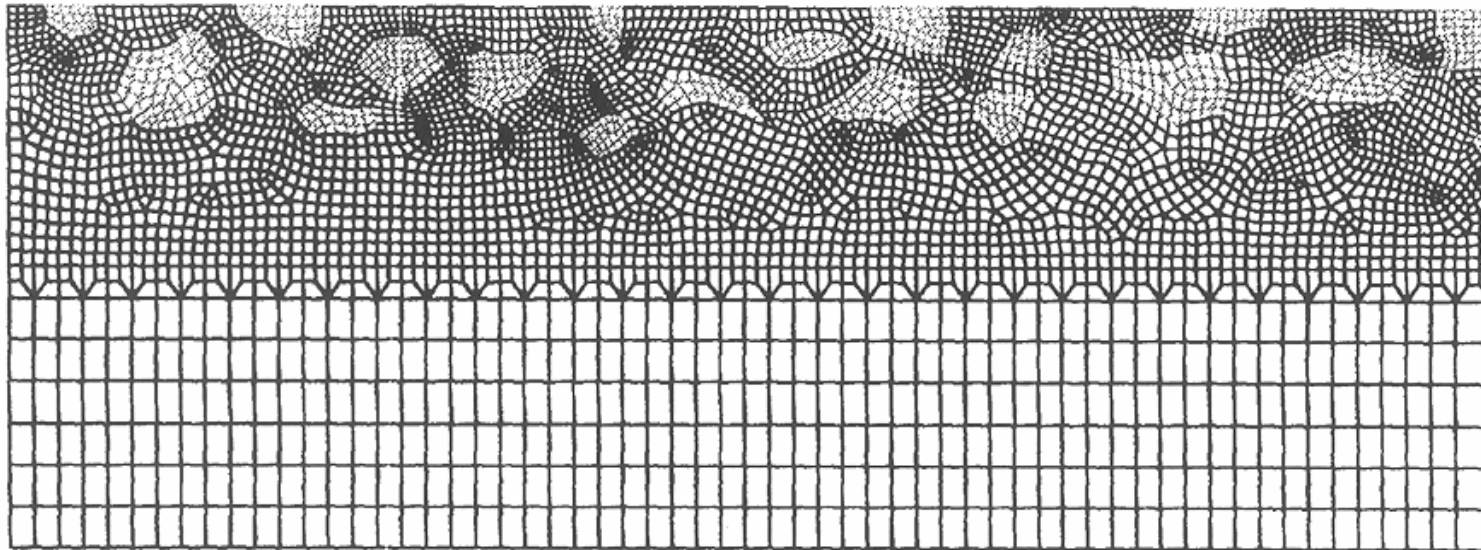


**Schemaskizzen**

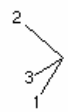
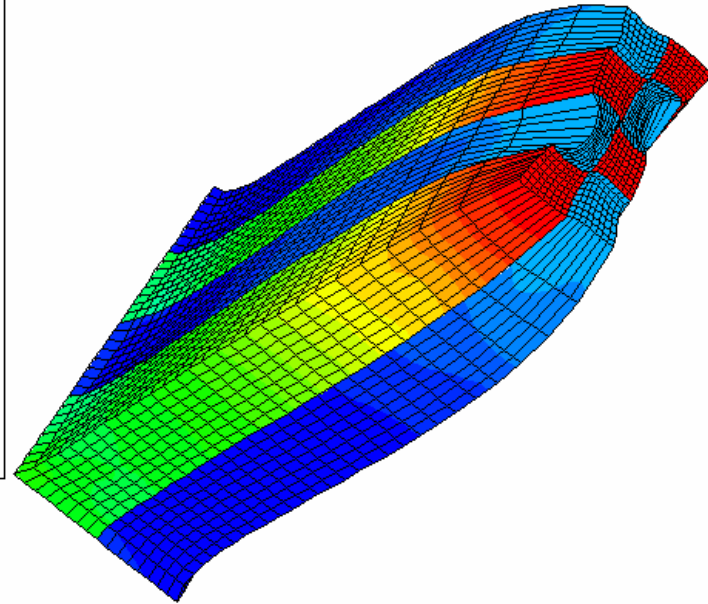
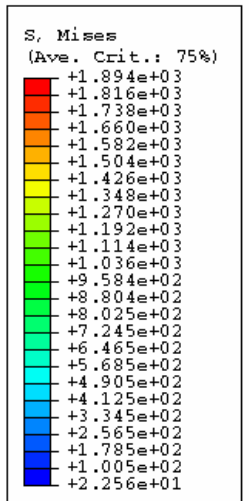
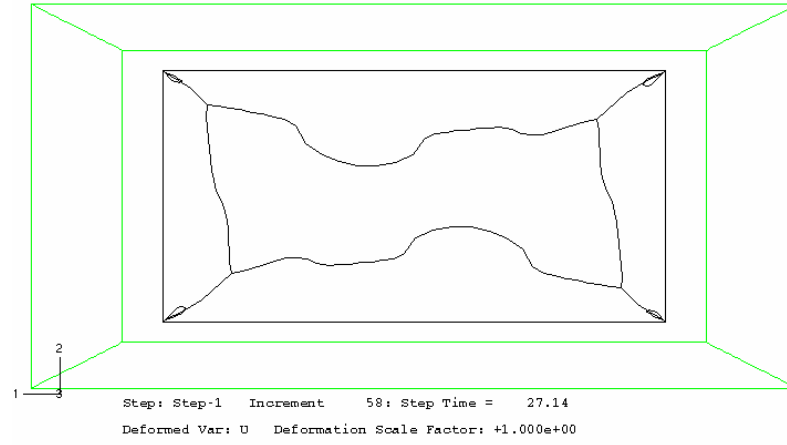
# Theorien zur Rauheitsentwicklung



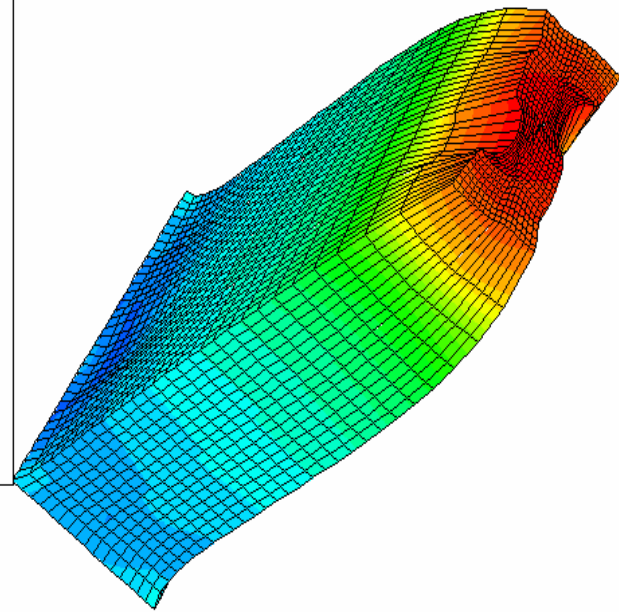
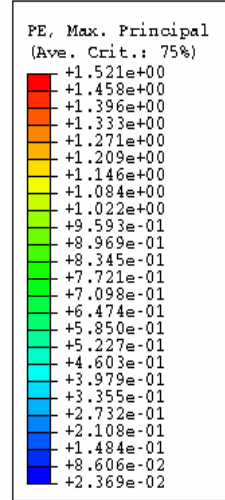
# Theorien zur Rauheitsentwicklung



# Theorien zur Rauheitsentwicklung



Step: Step-1 Increment 58: Step Time = 27.14  
Primary Var: S, Mises  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Step: Step-1 Increment 58: Step Time = 27.14  
Primary Var: PE, Max. Principal  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Einleitung

Grundlagen der Reibung

Experimente

Theorien zur Oberflächenmechanik

## **Kristallmechanik**

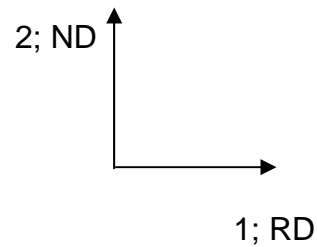
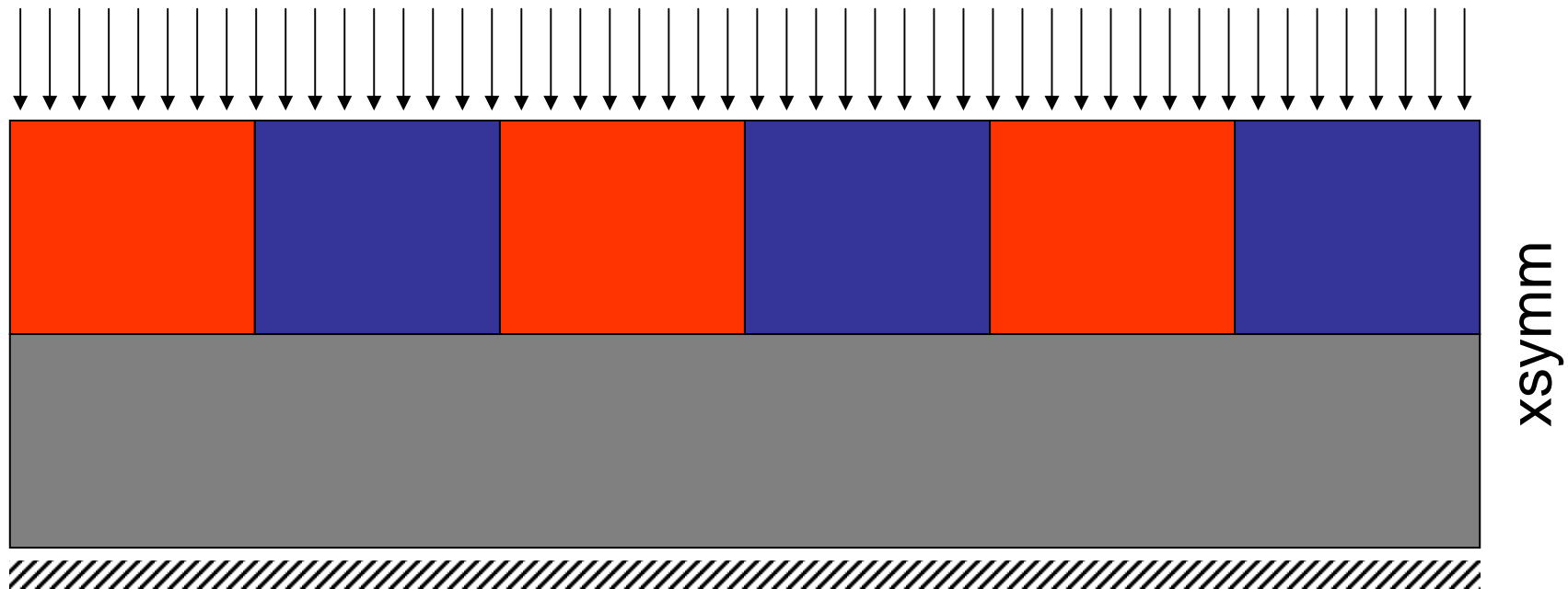
FE Simulationen zur Rückfederung

Reibgesetze für die Blechumformung




# Kristallmechanik der Rauheit



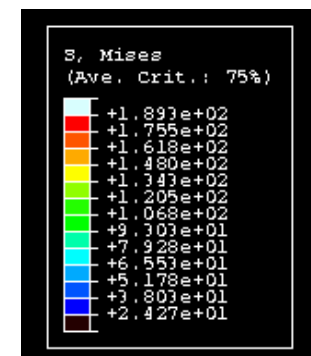
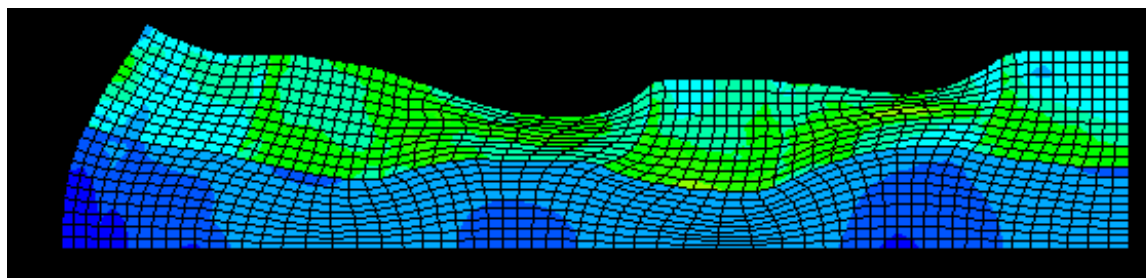
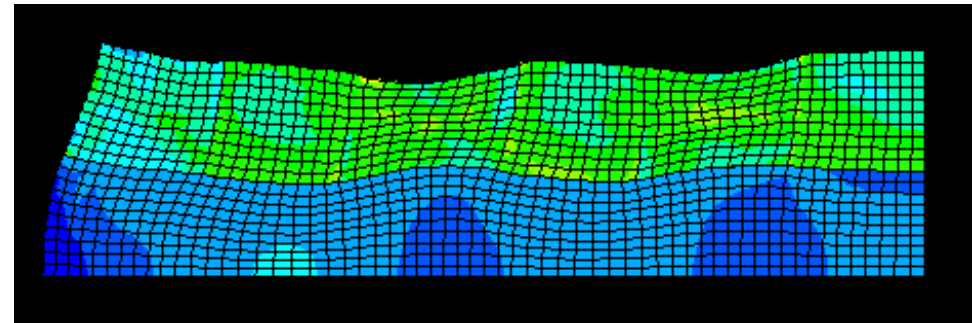
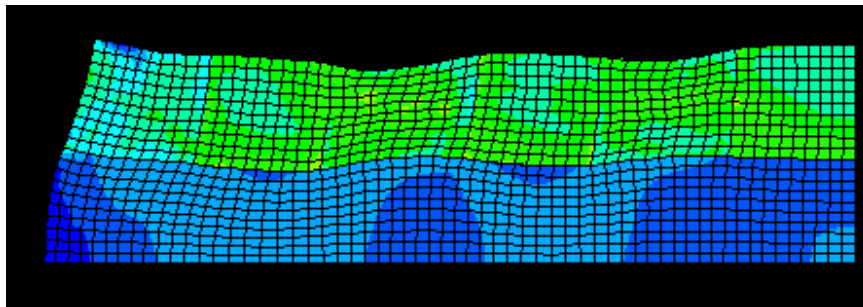
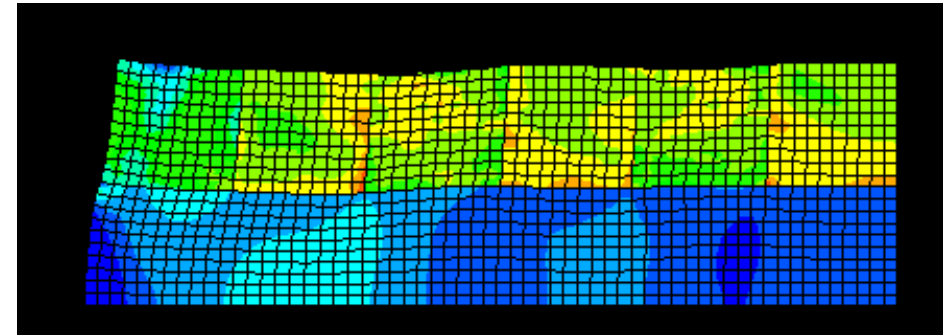
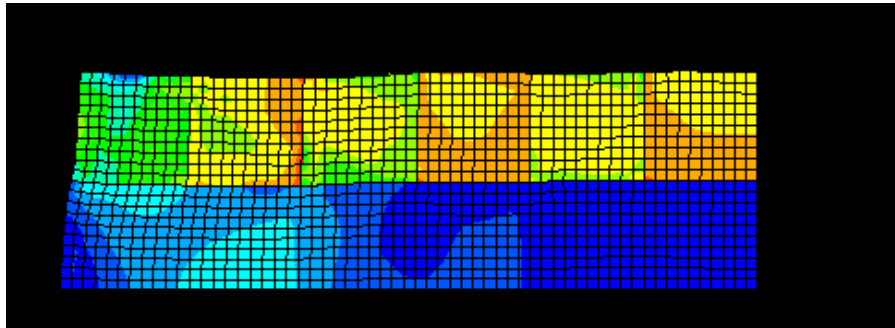
konstanter Druck =  $300 \text{ N/mm}^2$



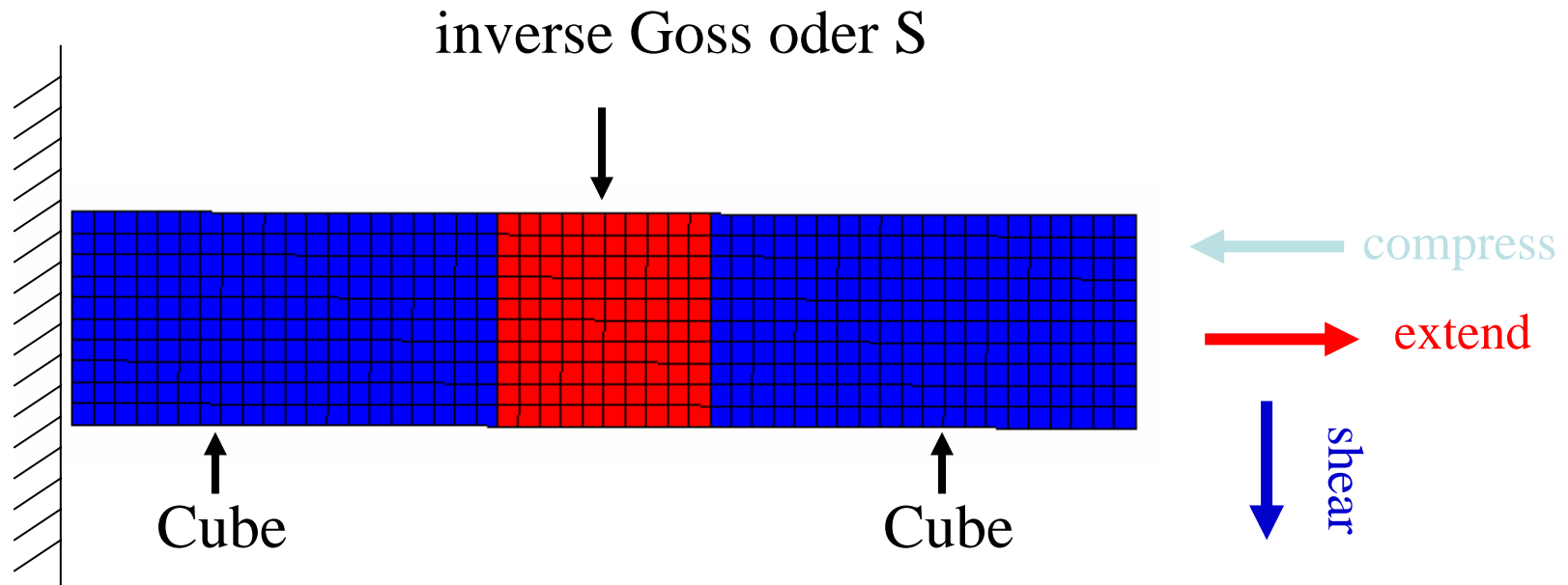
$$u_2 = 0$$

-  Orientation 1
-  Orientation 2
-  Isotropic

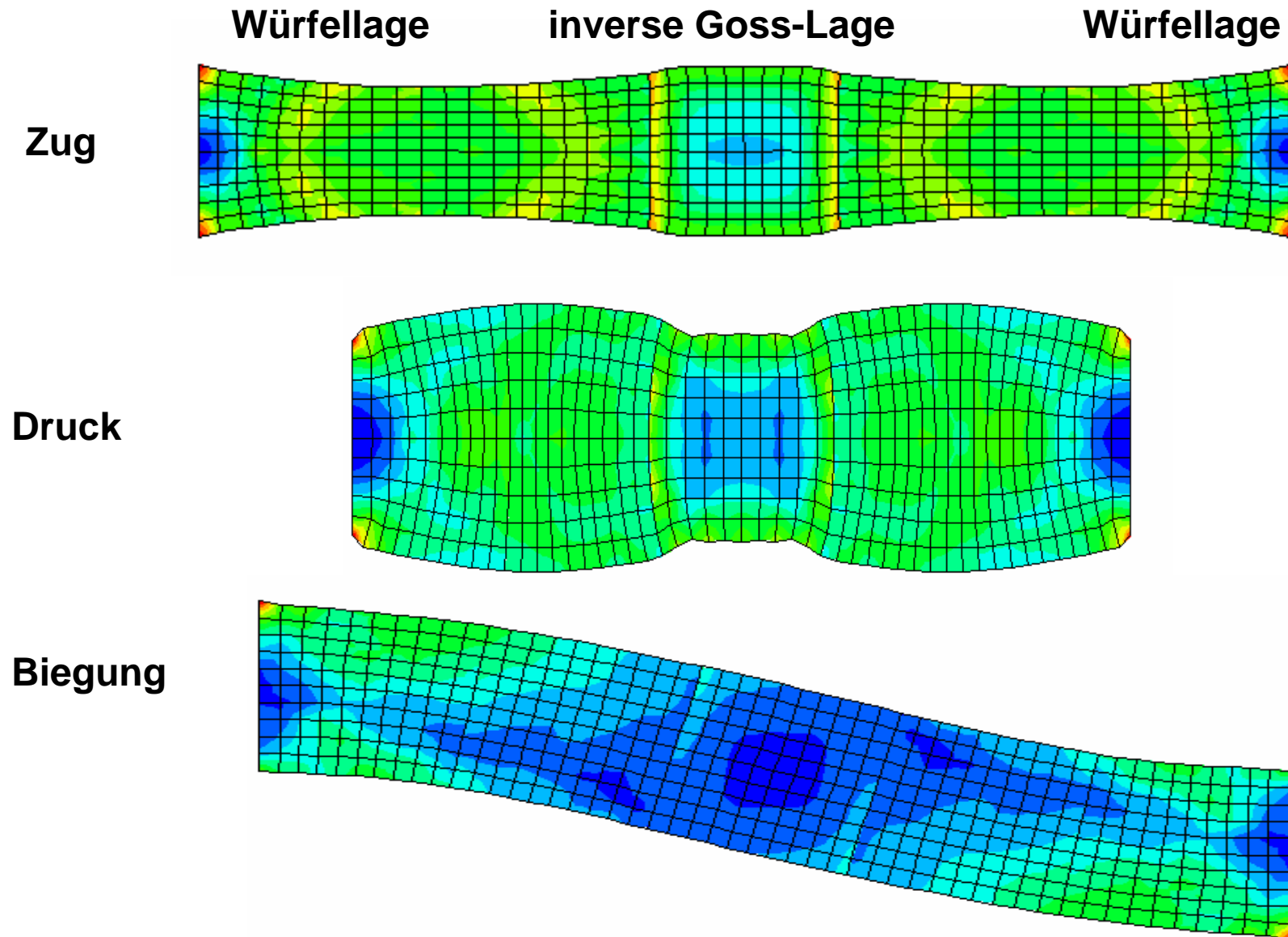
# Kristallmechanik der Rauheit

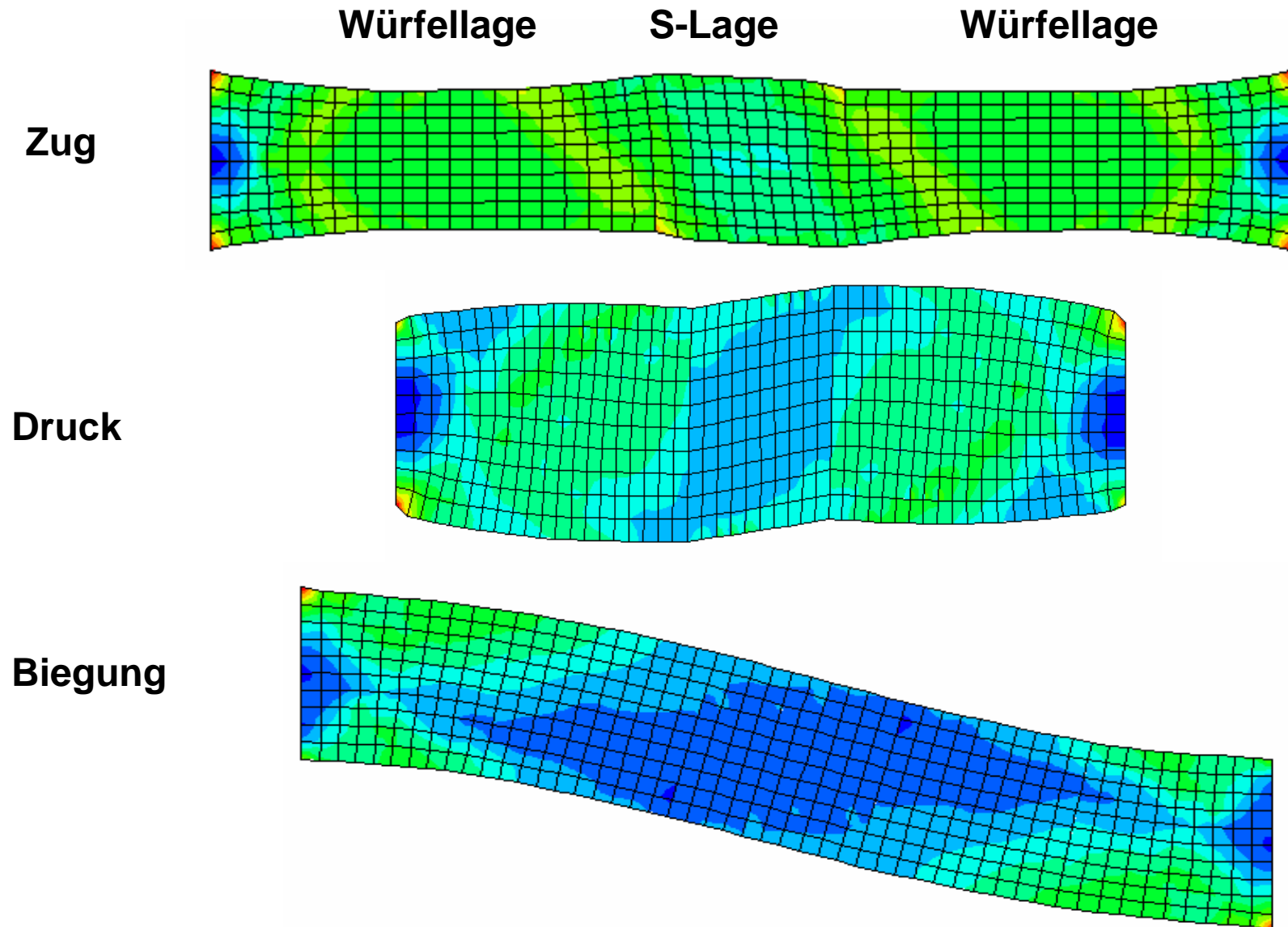






# Kristallmechanik der Rauheit







Einleitung

Grundlagen der Reibung

Experimente

Theorien zur Oberflächenmechanik

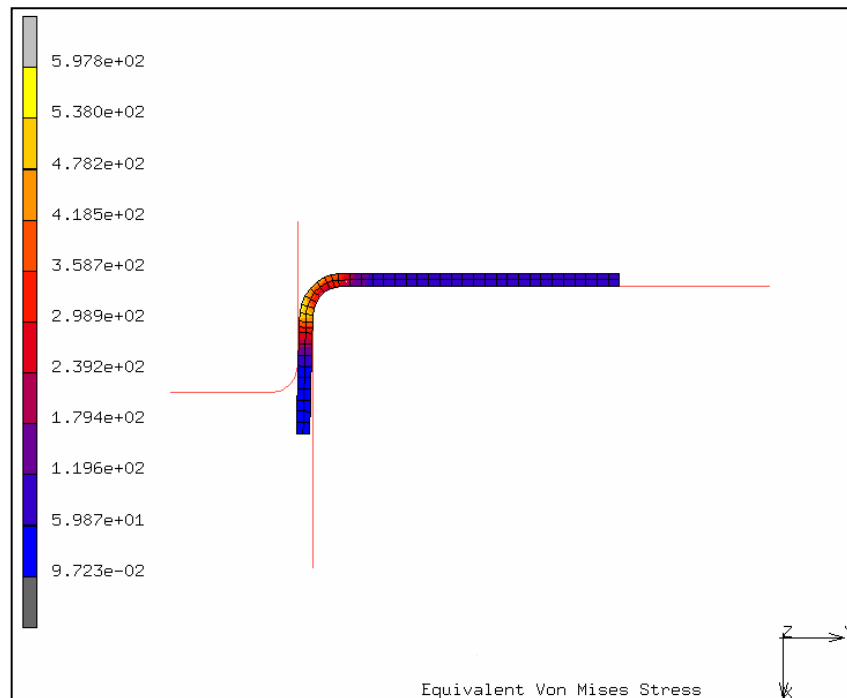
Kristallmechanik

# **FE Simulationen zur Rückfederung**

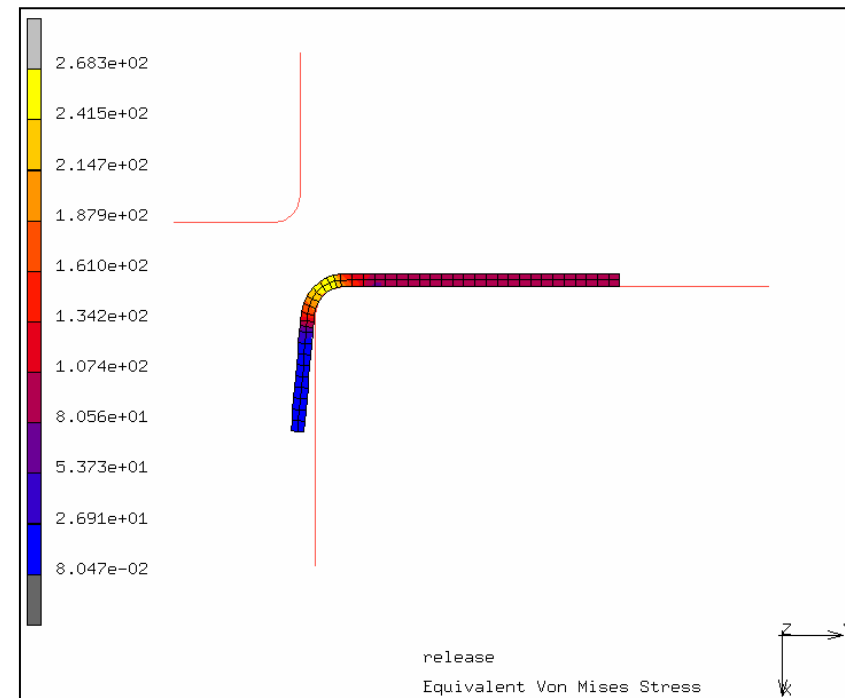
Reibgesetze für die Blechumformung



## einfache Biegung gerechnet mit Coulomb und unterschiedlicher Reibzahl



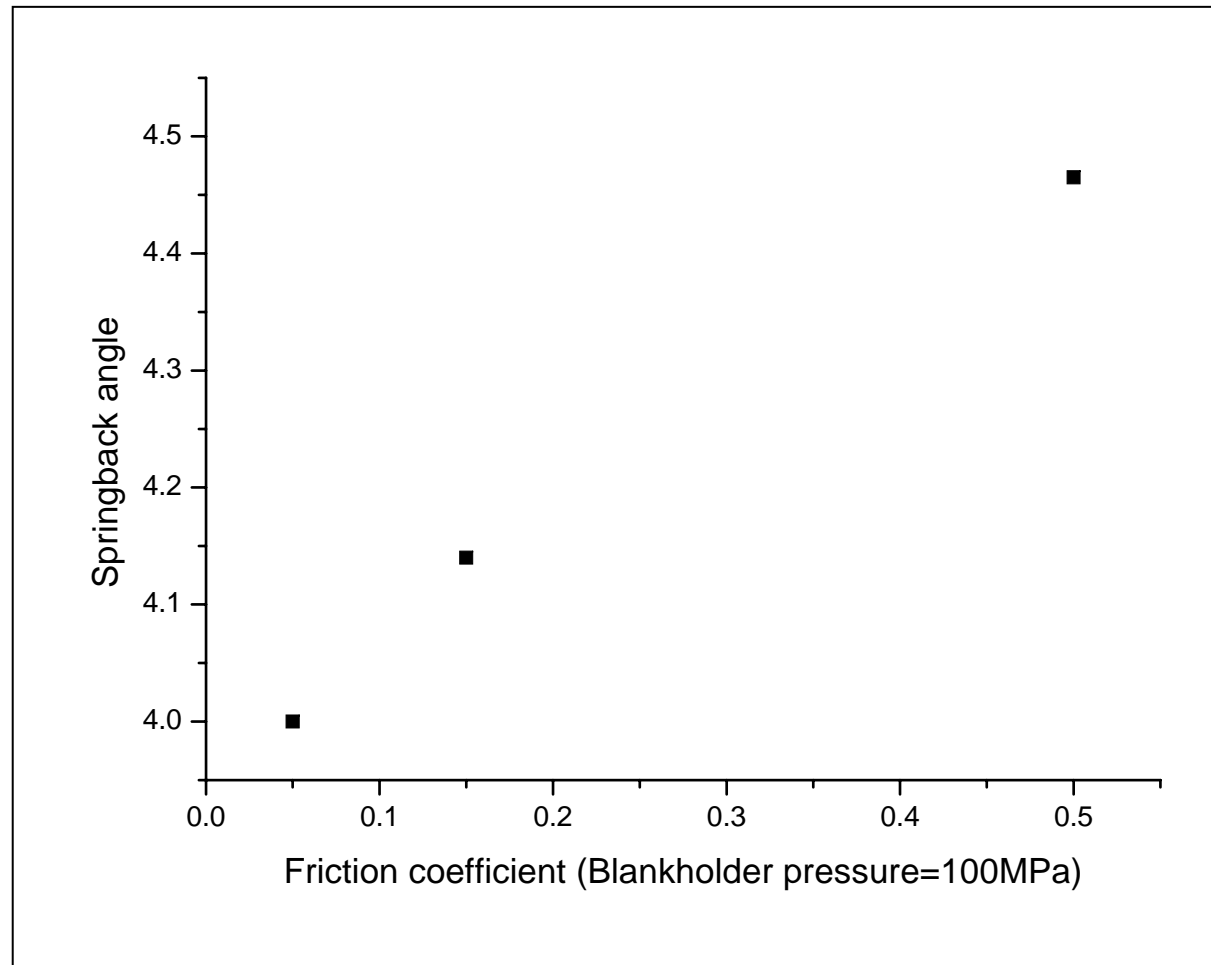
(a) bending to 90°



(b) springback

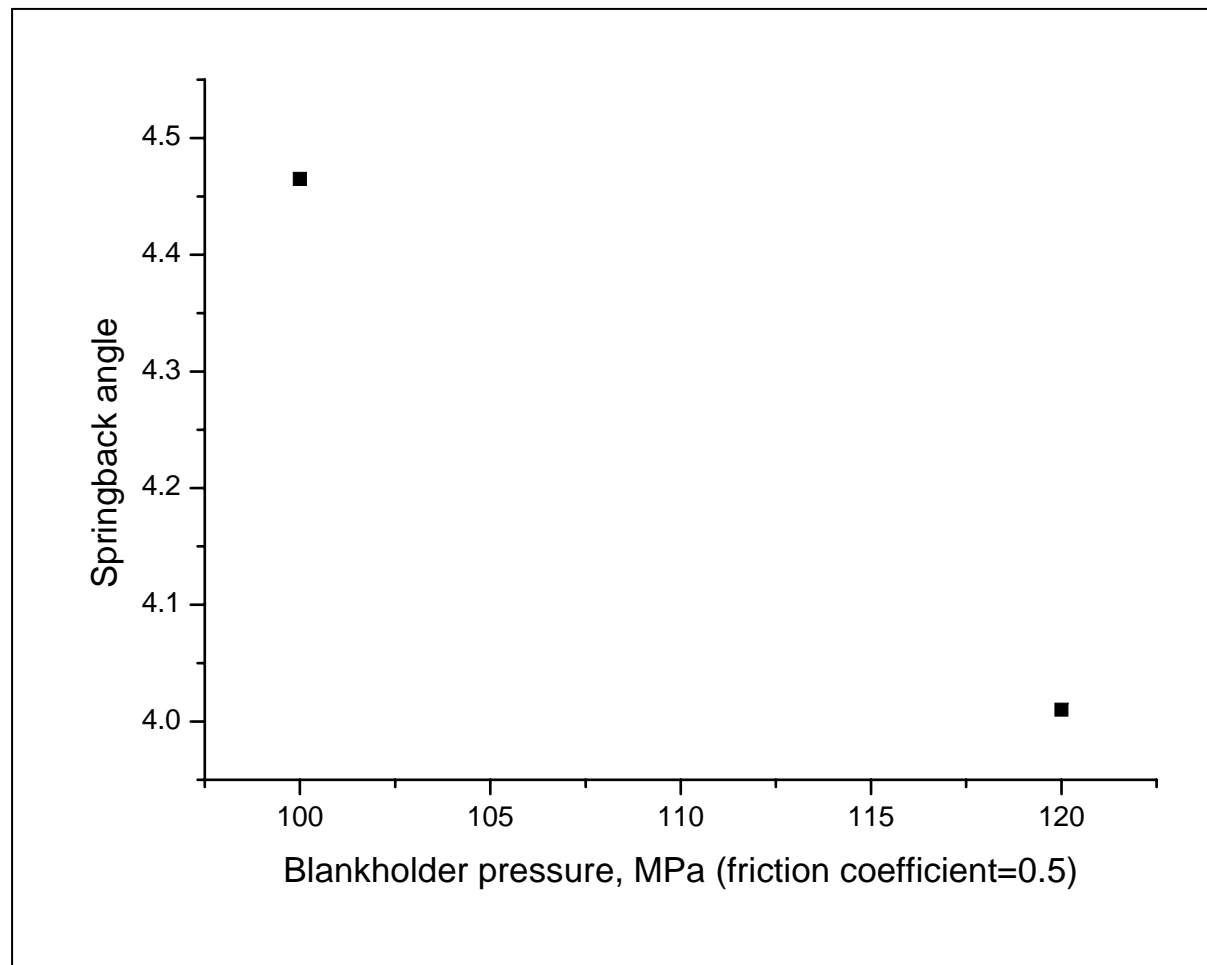


## einfache Biegung gerechnet mit Coulomb und unterschiedlicher Reibzahl



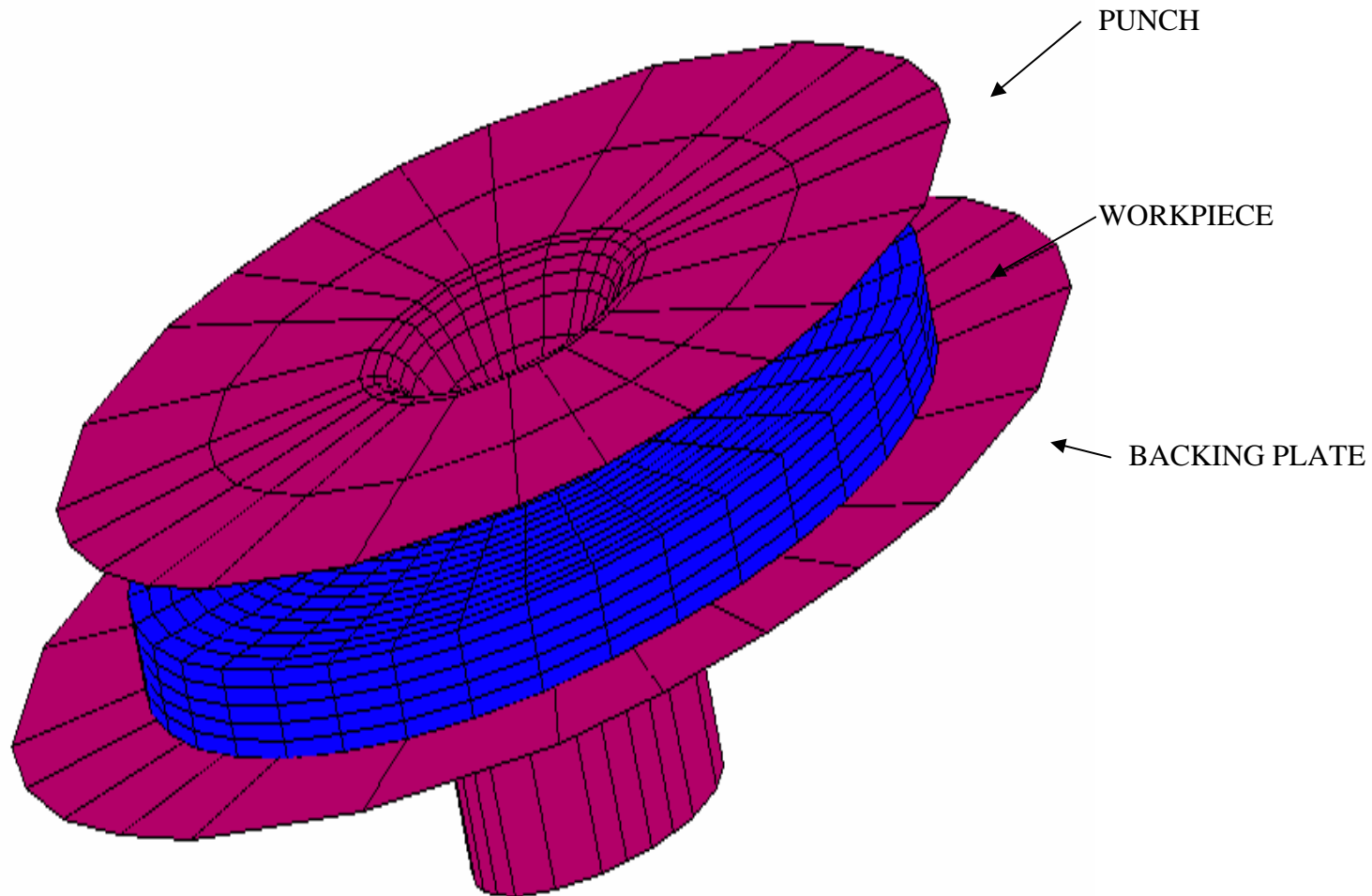


## einfache Biegung gerechnet mit Coulomb und unterschiedlicher Reibzahl





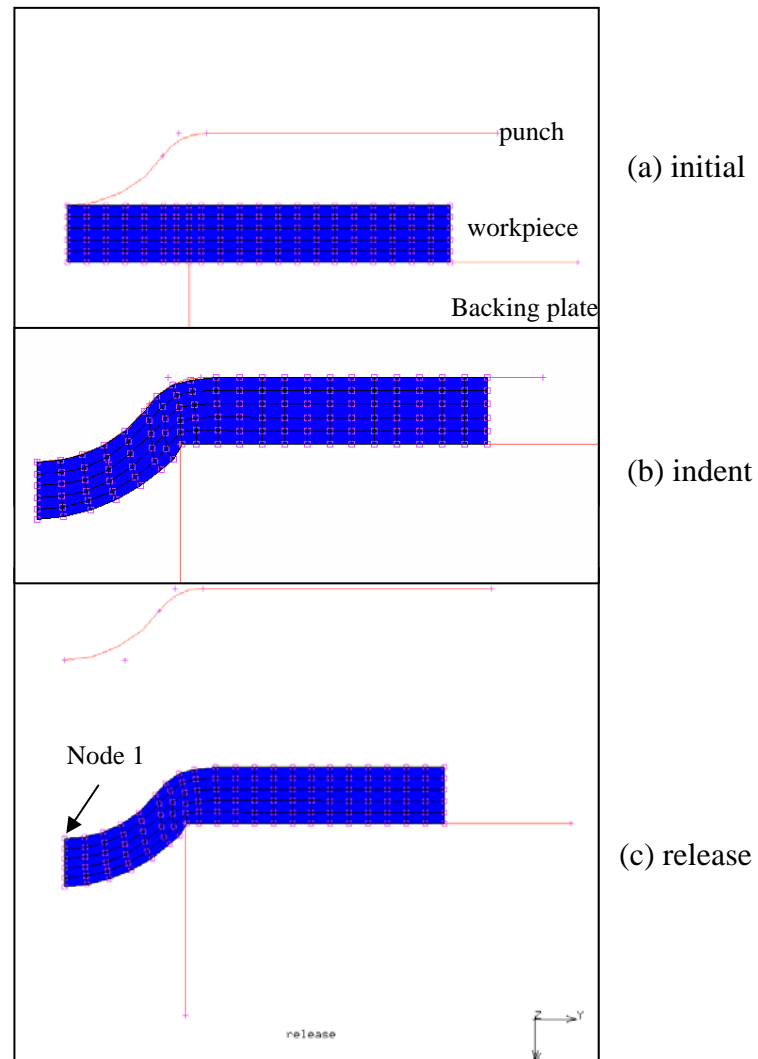
## Ziehen



gerechnet mit Coulomb und unterschiedlicher Reibzahl



## Ziehen

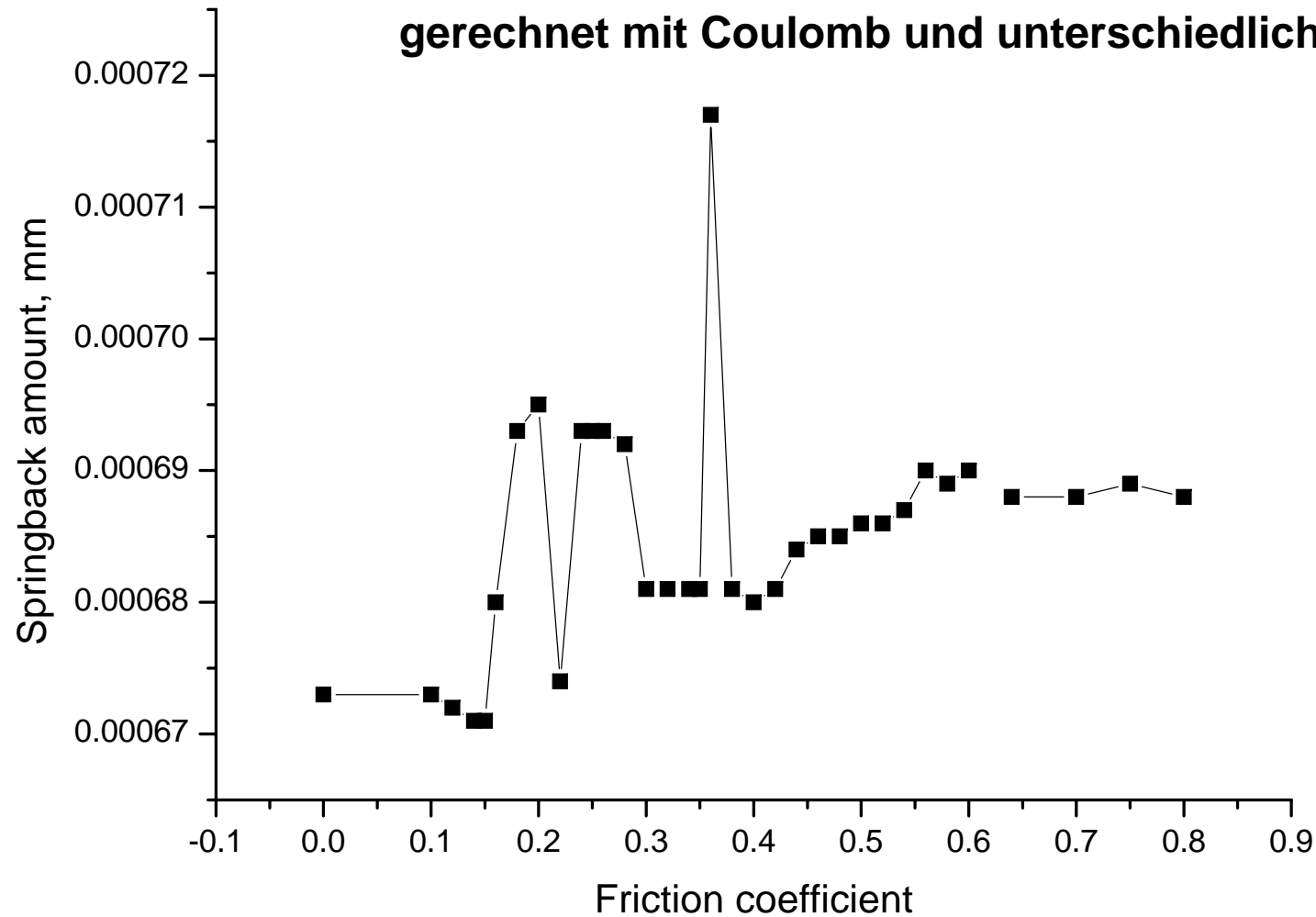


gerechnet mit Coulomb und unterschiedlicher Reibzahl



## Ziehen

gerechnet mit Coulomb und unterschiedlicher Reibzahl





## **Statement:**

Die Entwicklung eines für *alle Umformfälle* geeigneten *physikalisch* basierten Reibgesetzes ist derzeit ein zu ehrgeiziges Ziel, da die beteiligten Einzelprozesse zu komplex und zu schwer meßtechnisch zu verifizieren sind

## **Folgerung:**

Grundlagenverständnis verbessern

Meßtechnik verbessern

empirisches Reibgesetz gezielt für die Blechumformung entwickeln



**empirischer Ansatz (z.B. nach Ansatz von Yu und Schmoekel)**

$$\mu = c_0 + \left( c_1 \exp(-c_2 \sigma_n) + c_3 \exp(-c_4 \sigma_n^2) \right) (c_5 + c_6 \exp(-c_7 u))$$

$c_i$ : empirische Koeffizienten     $\sigma_n$ : Kontaktnormalspannung     $u$ : Gleitgeschwindigkeit

**Ergänzung für  $c_0$  nach Raabe und Sachtleber**

$$c_0 = f(\varepsilon_{vM}, d, M)$$

$\varepsilon_{vM}$ : platische von Mises Gesamtdehnung     $d$ : Korngröße     $M$ : Taylorfaktor

**Konstitutive Beschreibung der Änderung  
der Oberflächenrauheit im Verlauf der Blechumformung**