

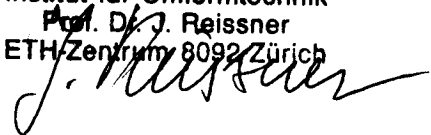
Diss. ETH Nr. 9465

Beitrag zur Beurteilung des  
Einflusses der  
Werkstückoberfläche auf die  
Reibung während der  
Umformung

Abhandlung zur Erlangung des Titels  
Doktor der Technischen Wissenschaften  
der  
Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

Zürich, 16.7.1991

Institut für Umformtechnik  
Prof. Dr. J. Reissner  
ETH-Zentrum 8092 Zürich



vorgelegt von  
Beat Meier  
Dipl. Masch. Ing. ETH  
geboren am 14.10.1961

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. J. Reissner, Referent  
Prof. Dr. E. Freitag, Korreferent



## **KURZFASSUNG:**

Blech-Hohlteile werden unter Einsatz des Streck- und Tiefziehverfahrens durch plastische Umformung aus ebenen Platinen hergestellt. Bei diesen Umformverfahren hat die an den Werkstückoberflächen auftretende Reibung einen entscheidenden Einfluss auf den Werkstofffluss und damit auf das Werkstückversagen. Ein ungünstiges Reibverhalten kann zudem zu unerwünschten abrasiven Erscheinungen sowohl am Werkstück als auch am Werkzeug führen.

Als wichtige Einflussgrösse erweist sich dabei die Beschaffenheit der Blechoberflächen. Die Optimierung der Reibeigenschaften dieser Oberflächen stellt deshalb eine wichtige Zielgrösse bei der Optimierung eines Umformprozesses dar.

Die gezielte Optimierung der Reibeigenschaften eines Blechwerkstoffes war bisher nicht möglich, da weder geeignete Kennwerte zur Beschreibung der 3-D-Oberfläche noch ausreichende Kenntnisse über den Einfluss des Umformprozesses auf das Reibverhalten vorlagen.

In der vorliegenden Arbeit werden Grundlagen zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen der Oberflächenstruktur und des Reibverhaltens erarbeitet, um die Optimierung von Blechoberflächen zu ermöglichen.

Die komplexen Oberflächenstrukturen werden mit Hilfe numerischer Methoden im Rechner nachsimuliert. Diese Vorgehensweise ermöglicht sowohl die Beschreibung von Realstrukturen als auch den Entwurf von völlig neuen Oberflächen. Darüber hinaus bildet sie die Grundlage, zur Untersuchung der Wandlung der Strukturen während des Reibvorganges.

Um den funktionalen Zusammenhang zwischen der Oberflächenstruktur und der Reibung beschreiben zu können, werden neue reiborientierte Kenngrössen eingeführt. Diese berücksichtigen die Dreidimensionalität der Oberflächenstruktur und die Kontaktmechanismen, welche die Reibung entscheidend beeinflussen.

In einem zweiten Schritt werden die quantitativen Reibwerte mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen den einzelnen Oberflächentypen zugeordnet. Dabei wird die Reibung unter verschiedenen Umformbedingungen erfasst. Als wichtig und bisher unbekannt, wird die Änderung des Reibverhaltens in Abhängigkeit der plastischen Dehnung, der Rela-

tivgeschwindigkeit und des variablen Anpressdruckes bestimmt. Die Rückkopplung dieser Resultate mit den Oberflächenstrukturen über die reiborientierten Kennwerte eröffnet die Möglichkeit zur Optimierung der Oberfläche. Sie erlaubt den gezielten Entwurf neuer Oberflächenstrukturen und trägt somit zum Einsatz der CIM-Technologie in einem neuen Anwendungsgebiet bei.

## **SUMMARY**

Stretch and deep drawing processes are employed to plastically form hollow sheet parts, starting from planar blanks. In these forming processes the friction arising at the surface of the workpiece has a decisive effect on the material flow and thereby on the failure of the workpiece. In addition, unfavourable frictional behaviour can lead to undesirable abrasive effects, both on the workpiece and on the tool.

In this context the condition of the sheet surface is seen to be an important variable. For this reason the optimisation of the frictional properties of these surfaces constitutes a major target in the optimisation of the forming process.

Until now it has not been possible to make a specific optimisation of the frictional properties of a sheet material, since there were neither suitable characteristic values to describe the 3D surface topography nor was there sufficient information concerning the effect of the forming process on the frictional behaviour.

In the present work basic considerations for the description of the relationship between the surface structure and the frictional behaviour will be determined in order to permit the optimisation of the sheet surface.

Numerical methods will be used for the computer simulation of the complex surface structures. This procedure permits both the description of actual structures and the proposal of completely new surfaces. In addition, it provides the basic facility to investigate the alteration of the structures during the forming process.

New friction-related characteristic values are introduced in order to describe the functional relationship between the surface structure and the frictional behaviour. These take into account the three-dimensional nature of the surface structure and the contact mechanisms, which have a decisive effect on the frictional process.

In a second step experimental investigations are performed to permit assignment of the values of the coefficient of friction to the different surface types. In this case, the friction is determined under various forming conditions. Points which are important, but which were as yet unknown, are here the determination of the alteration of the frictional behaviour as a function of the plastic strain, the relative speed and the variable contact pressure.

The feedback of these results, along with the surface structures, provides, through the friction-related characteristic values, the possibility of optimising the surface. This permits the specific proposal of new surface structures and hence contributes to the use of the CIM technology in a new field of application

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b> .....	5
<b>1 Einleitung</b> .....	8
1.1 Stand der Kenntnisse .....	9
1.1.1 Mechanismen im Reibkontakt.....	11
1.1.1.1 Makroskopisches Grundreibmodell.....	11
1.1.1.2 Mikroskopische Reibmodelle.....	12
1.1.1.3 Reib- und Adhäsionsmechanismen im Reibkontakt.....	12
1.1.1.3.1 Der Aufbau technischer metallener Oberflächen.....	13
1.1.1.3.2 Wechselwirkungen.....	14
1.1.2 Rauhe Oberflächen.....	18
1.1.2.1 Beschreibung durch genormte Kennwerte.....	18
1.1.2.2 Dreidimensionale Oberflächenbeschreibung.....	20
1.2 Zielsetzung .....	23
<b>2 Reiborientierte Oberflächenbeschreibung</b> .....	25
2.1 Simulation von Oberflächenstrukturen .....	26
2.1.1 Rillige Oberflächenstrukturen .....	27
2.1.2 Oberflächenstruktur mit zufallsverteilten Rauheitskonturen .....	29
2.1.3 Muldige Oberflächenstrukturen.....	30
2.2 Oberflächenspezifische Reibeinflüsse.....	32
2.3 Reibungsbezogene Oberflächenbeschreibung durch Kennwerte .....	34
2.3.1 Flächentraganteil.....	35
2.3.2 Wellenverhältnis in Bewegungsrichtung .....	38
2.3.3 Reziproker Benetzungsdurchmesser .....	38
2.3.4 Leervolumen.....	39
2.3.5 Ungeschmierte Reiblänge.....	40
<b>3 Kennwertverhalten unterschiedlicher Oberflächentypen</b> .....	42
3.1 Kennwerte der Ausgangsoberflächen .....	42
3.2 Kennwertänderung bei der Abflachung .....	44
3.2 Kennwertänderung bei der Abflachung .....	44
3.2.1 Flächentraganteil.....	45
3.2.2 Leervolumen.....	46
3.2.3 Reziproker Benetzungsdurchmesser .....	50
3.2.4 Ungeschmierte Reiblänge.....	51
3.3 Kennwertbeurteilung zur Optimierung der Oberfläche.....	58
3.3.1 Ungeschmierte Reiblänge zu Flächentraganteil.....	62

3.3.2	Reziproker Benetzungsdurchmesser zu Flächentraganteil .....	63
3.3.3	Leervolumen zu Flächentraganteil.....	64
3.3.4	Ungeschmierte Reiblänge zu reziprokem Benetzungsdurchmesser.....	66
3.3.5	Ungeschmierte Reiblänge zu Leervolumen.....	67
3.4	Folgerungen aus den definierten Oberflächenkennwerten .....	68
<b>4</b>	<b>Streifenziehversuch mit Umlenkung</b> .....	<b>70</b>
4.1	Versuchsaufbau.....	70
4.2	Untersuchtes Reibsystem .....	73
4.3	Systemkomponenten .....	74
4.3.1	Werkstück .....	74
4.3.2	Werkzeug .....	77
4.3.3	Zwischenstoff.....	78
<b>5</b>	<b>Reibung an realen Oberflächen</b> .....	<b>82</b>
5.1	Reibverhalten.....	82
5.1.1	Ausgangsoberflächen .....	83
5.1.2	Oberflächen während der Umformung.....	85
5.1.2.1	Rillig gleichgerichtete Oberflächenstruktur.....	87
5.1.2.2	Rillig sich kreuzende Oberflächenstruktur.....	88
5.1.2.3	Muldige Oberflächenstruktur .....	90
5.2	Übergangsbereich zum Adhäsionsverhalten .....	92
5.3	Adhäsionsverhalten.....	93
<b>6</b>	<b>Folgerungen aus den Untersuchungen unterschiedlicher Rauheitsstrukturen</b> .....	<b>101</b>
6.1	Optimierung des Reibverhaltens .....	101
6.2	Optimierung des Adhäsionsverhaltens .....	103
6.3	Einfluss unterschiedlicher Grundwerkstoffe .....	104
6.4	Optimierung von Oberflächenstrukturen .....	105
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>108</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>111</b>
8.1	Datenverarbeitung.....	111
8.2	Versuchskomponenten .....	113
8.2.1	Versuchswerkstoff.....	113
8.2.2	Zwischenstoff.....	123
8.2.2.1	Mineralöl.....	123
8.2.2.2	Emulsion.....	123
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>125</b>

## Nomenklatur

### Allgemeine Zeichen

A	Fläche
$A_a$	nominelle Kontaktfläche
$A_c$	Konturenfläche
$A_r$	reale Kontaktfläche
B	Biegekraft
b	Konstante
c	Spezifische Wärme einer Flüssigkeit
$c_o$	oberer Cut-off
$c_u$	unterer Cut-off
F	Kraft
f	Funktion
h	Dicke
$l_{x,y,z}$	Länge
m	Knotenzahl in y-Richtung
N	Normalkraft
$N_{Adh}$	Riefenzahl
n	Knotenzahl in x-Richtung
$n_{x,y,z}$	Rillenzahl
$n_{p,xyz}$	Muldenzahl
p	Druck
R	Reibkraft
$R_a$	Mittenrauhwert
$R_{3z}$	Gemittelte Rauhtiefe
r..	Rauheit
$r_a(\underline{x})$	Rauheitsfunktion
$R_{Adh}$	Riefenfaktor
$R_b$	Riefenbreitenfaktor
$R_g$	Riefengeometriefaktor
$S_m$	Mittlerer Rillenabstand
$S_r$	ungeschmierte Reiblänge
s	Blechdicke
T	Temperatur
$T_2$	Spitzenzahl
$t_a$	Flächentraganteil
t	Zeit
U	Umfang
V	Volumen



$v_{..}$	Geschwindigkeit (Indizes: Bedeutung / Ort und Richtung)
$x, y, z$	karthesische Koordinaten
$XV_r$	Leervolumen
$\varepsilon_{..}$	Dehnung (Index: Richtung)
$\varepsilon_f$	Fahrdehnung
$\varepsilon_v$	Vordehnung
$\Psi$	Plastizitätsindex
$\gamma$	Grenzflächenenergie
$\eta$	Viskosität
$\varphi$	Winkel
$\lambda$	Wärmeleitkoeffizient
$\lambda_\alpha$	Wellenverhältnis in Bewegungsrichtung
$\emptyset$	Durchmesser
$\emptyset_H$	Hydraulischer Durchmesser
$\emptyset_B$	Reziproker Benetzungsdurchmesser
$\pi$	Kreiskonstante (=3.14159..)
$\rho$	Dichte
$\sigma_{..}$	Spannung (Indizes: Bedeutung / Ort und Richtung)
$\tau$	Schubspannung
$\mu$	Reibzahl
$\bar{\mu}$	Reibzahl nach Coulomb
$\Delta$	relativ

### Besondere Zeichen und Indizes

..Adh	Adhäsion
..Korn	Korn
..krit	Kritisch
..lokal	lokal
..max	maximal
..mech	mechanisch
..min	minimal
..mol	molekular
..n	Normal
..o	Ausgangszustand
..p	plastisch

..pr	Prozess
..Reib	Reibung
..rel	Relativ
..SG	Rückhalt
..St	Stempelrundung
..SZ	Zug
..tot	Gesamt
..Umg	Umgebung
..v	Vergleich
..Wst	Werkstück
..Wz	Werkzeug
..x, y, z	karthesische Koordinatenrichtungen
..Zr	Ziehringrundung
..Zwst	Zwischenstoff
—	Mittelwert
→	Vektor

### **Abkürzungen**

kfz	kubisch flächenzentrierte Gitterstruktur
krz	kubisch raumzentrierte Gitterstruktur
hex	hexagonale Gitterstruktur
Wst	Werkstück
Wz	Werkzeug
Zwst	Zwischenstoff

# 1 Einleitung

Dünnwandige Hohlteile werden durch Streckziehen und Tiefziehen aus ebenen Blechwerkstoffen hergestellt.

Der plastische Formgebungsvorgang erfolgt dabei unter grossen plastischen Deformationen aber auch unter grossen relativen Verschiebungen zwischen Werkstück und Werkzeug. Aus diesem Grund ist für den Umformvorgang sowohl das duktile Verhalten des Werkstoffes als auch das Reib- und Adhäsionsverhalten der Blechoberfläche von grosser Bedeutung.

Während der Grundwerkstoff bereits Grundlage vieler Untersuchungen war, wurde die raue Oberfläche im Bereich der Umformtechnik selten bei der Umformung berücksichtigt.

Die Oberflächenstruktur des Bleches muss aus der Sicht des Produktionsprozesses verschiedene Aufgaben erfüllen:

- *Optimales Reibverhalten zur Verbesserung der Umformigenschaften,*
- *Minimierung des Verschleisses durch die Verhinderung von Stoffübertrag im Reibkontakt durch:*
  - *Schmierstofftransport in die Umformzone durch Rauigkeitstäler,*
  - *Verbesserung der Notschmiereigenschaften durch Mikroschmiertaschen,*
- *Verbesserung der Hafteigenschaften von Lackschichten.*

Die Reibungs- und Adhäsionsverhältnisse, welche sich bei der Umformung des Blechwerkstoffes einstellen, sind einerseits von der Oberflächenfeingestalt im Ausgangszustand, das heisst im unverformten Zustand, und deren Veränderung während der Umformung abhängig, aber auch von den Eigenschaften des umgeformten Werkstoffes. Zusätzlich wird das Umformverhalten der Bleche durch die Oberflächengestalt des Werkzeuges und die Eigenschaften des Zwischenstoffes beeinflusst.

Die chemischen und physikalischen Vorgänge im Reibkontakt an realen Oberflächen sind so komplex, dass eine exakte quantitative Aussage über das Reibverhalten der Blechwerkstoffe heute nicht möglich ist.

## 1.1 Stand der Kenntnisse

Das Umformverhalten realer Werkstoffe mit rauhen Oberflächen stellt einen komplexen Zusammenhang verschiedener Einflussgrößen dar. Eine dieser Einflussgrößen ist die Reibung. Die Problematik der Optimierung des Umformverhaltens bezüglich Reibung lässt sich in die beiden Schwerpunktthemen

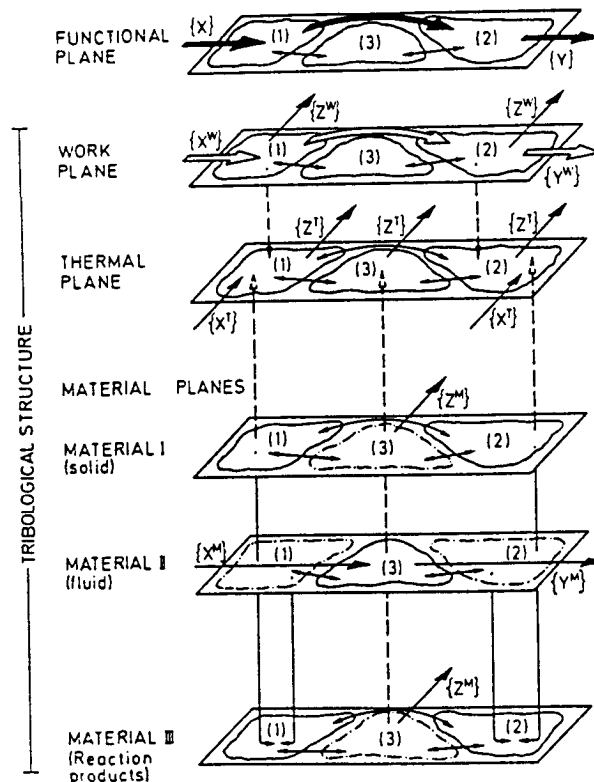
- *Reibverhalten*
- *Adhäsionsverhalten*

aufteilen.

Die bisher durchgeführten Reibuntersuchungen hatten verschiedene Zielrichtungen. Man kann hauptsächlich folgende Prioritäten erkennen:

- *Chemische Einflussgrößen,*  
*Hierbei wird besonders der Einfluss des Schmierstoffes, speziell der Additive untersucht. Durch Variation dieser Komponente wird in einem definierten Reibsystem deren Einfluss analysiert.*
- *Strömungsmechanische Behandlung*  
*Bei dieser Betrachtungsweise ist der Einfluss des Schmierstoffes in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zwischen  $W_z$  und  $W_{st}$  entscheidend.*
- *Phänomenologische Behandlung*  
*Durch die Analyse der sich in der Kontaktzone abspielenden Vorgänge werden Erfahrungen über Mechanismen, die die Reibung und den Verschleiss prägen, gesammelt und ausgewertet.*

Ganzheitliche Betrachtungsweisen des Reibsystemes sind wegen der Interdependenz und der Vielschichtigkeit sowie der Zahl der ungelösten Probleme komplex und wurden z. B. von Czichos [1978, 1982, 1985] und Boulding [1956] bearbeitet. Nach Czichos [1978] soll das mehrschichtige Problem systematisch in Teilprobleme aufgeteilt werden.



**Bild 1:** Konzeptebenen von Parametern und Prozesse im Reibsystem nach Czichos [1978]. X bedeutet Eingangsgrösse, Y Ausgangsgrösse und Z Verlust des Reibsystemes.

Das komplexe, nichtlineare Problem wird hierbei nach Boulding [1956] hierarchisch nach folgenden Regeln in Systemen geordnet:

- Die Systeme werden in Klassen verschiedener Komplexitätslevels eingeteilt.
- Alle logischen und empirischen Gesetze, gültig für tiefe Levels, sind auch auf alle höheren Levels anwendbar.
- Je höher der Level, desto grösser die Anzahl unbekannter Elemente und Gesetze, die das aktuell betrachtete System beschreiben.

Eine Aufteilung in physikalische Elementarsysteme, wie sie von Czichos [1982] und Boulding [1956] theoretisch durchgeführt wurde, ist sinnvoll, doch die Voraussetzungen für die Quantifizierung der Mikroeffekte sind nicht gegeben. Wie nachfolgend beschrieben wird, fehlen dazu physikalische wie auch chemische Grundlagen.

Physikalisch betrachtet, entstehen Reibschubspannungen durch elemen-

tare Wechselwirkungen an den Gleitflächen [Israelachvili 1980, 1985]. Da jedoch die dabei ablaufenden Mechanismen, aufbauend auf Atom- und Molekularstrukturen, nicht theoretisch berechnet oder gemessen werden können, ist die Quantifizierung und daher auch die mathematisch exakte Formulierung der Reibschubspannung nicht möglich. Im weiteren wirken die Mechanismen an unregelmässigen Oberflächenstrukturen mit Rauheiten in der Grössenordnung von  $10^{-6}$  m, was die Quantifizierung der Reibkraft durch elementare Wechselwirkungen zusätzlich erschwert.

Die Schwierigkeit bei der physikalisch exakten Formulierung der Reibung liegt somit bei der

- *Quantifizierung der Wechselwirkungen*
- und der
- *Beschreibung der Oberflächenstrukturen.*

### 1.1.1 Mechanismen im Reibkontakt

Im allgemeinen werden makroskopische und mikroskopische Reibmechanismen unterschieden.

Während in der realen Umformung eines Teiles Wirkbereiche in der Grössenordnung von  $10^{-3}$  m<sup>2</sup> interessieren, müssen bei der Betrachtung der mikroskopischen (realen) Reibsysteme Wirkbereiche von  $10^{-6}$  m<sup>2</sup> untersucht werden.

#### 1.1.1.1 Makroskopisches Grundreibmodell

*Coulomb* erkannte, dass die Rauigkeit der Oberfläche einen Einfluss auf das Reibverhalten der Reibpaarung ausübt. Auf dieser Basis formulierte er [1785] ein Reibgesetz, welches immer noch die Grundlage von makroskopischen Modellen darstellt. Das Reibmodell ist in der Form

$$\mu = \frac{F_{Reib}}{F_N} \quad (1.1)$$

definiert, wobei  $F_{Reib}$  die Reibkraft und  $F_N$  die auf die Fläche normal wirkende (Anpress-) Druckkraft definiert.

Bei Blechwerkstoffen, welche plastisch umgeformt werden und bei denen sich somit die Oberflächenstruktur ständig ändert, ist der Reibkoeffizient nicht konstant. Er hängt von zahlreichen Parametern ab; die wichtigsten

sind in der untenstehenden Formel aufgeführt:

$$\mu = f ( Wz, Wst, Zwst, \epsilon_{ij}, v_{rel}, T, \text{Oberflächen, Umformung} ) \quad (1.2)$$

Andere allgemeingültige makroskopische Reibmodelle existieren nicht.

#### 1.1.1.2 Mikroskopische Reibmodelle

Im Reibkontakt am Realteil treten folgende Gleitpartner auf:

- Werkzeug <-> Werkstück,
- Werkzeug <-> Zwischenstoff und
- Werkstück <-> Zwischenstoff.

Dabei treten als mögliche Wechselbeziehungen die in der Literatur gebräuchlichen Reibarten

- Zwischenstoffgleiten,
- Trockenreibung und
- Mischreibung

auf.

Entscheidend für die oben beschriebenen Reibarten ist die Dicke der Zwischenstoffschicht, die Werkzeug und Werkstück trennt, sowie die Grösse der lokalen Schubspannungen. Die Schichtdicke ist stark von der Rauheit der Kontaktflächen abhängig und ist wie die Höhe der lokalen Schubspannungen nicht bekannt. Aus diesem Grund können mikroskopische Grundgleichungen zur allgemeinen Quantifizierung der Reibung im makroskopischen Ausmass nicht verwendet werden.

#### 1.1.1.3 Reib- und Adhäsionsmechanismen im Reibkontakt

Die Kontaktwechselwirkungen, die bei der Trocken- und Mischreibung sowie beim Zwischenstoffgleiten zur Entstehung der Reibkraft führen, sind:

- *die Ausbildung adhäsiver Bindungen (molekulare Wechselwirkung) sowie*
- *elastische und plastische Deformationen der Oberflächenschichten (mechanische Wechselwirkung).*

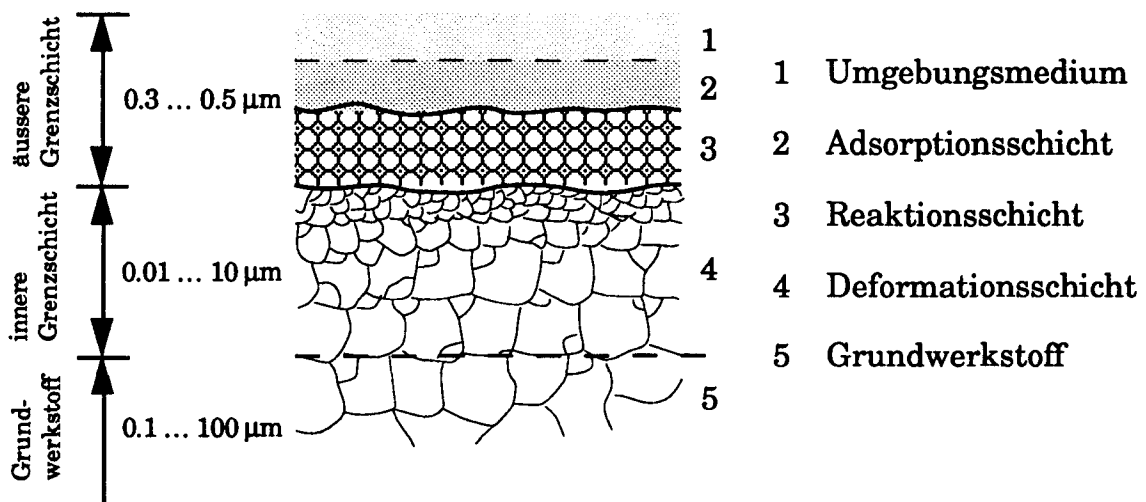
Die Ausbildung der Kontaktwechselwirkungen bei Festkörperkontakt wird neben der Rauigkeit der Oberfläche, welche später beschrieben

wird, durch den Aufbau der Kontaktgrenzschicht bestimmt. Aus diesem Grunde wird entsprechend dem Aufbau der technischen Oberfläche auch von Grenzschichtreibung gesprochen.

#### 1.1.1.3.1 Der Aufbau technischer metallener Oberflächen

Technische metallene Oberflächen, wie sie bereits von *Schmaltz*, [1936] beschrieben wurden, sind mehrschichtig aus einer äusseren und einer inneren Grenzschicht aufgebaut. Durch die Wechselwirkung mit dem Umgebungsmedium, z. B. Luft oder aggressiven Gasen, bzw. dem Zwischenstoff (man spricht von tribochemischen Reaktionen) baut sich an den Reibflächen die *äussere Grenzschicht* auf. Diese Schicht wird bei Anwesenheit von flüssigen Schmierstoffen durch eine adsorbierte Flüssigkeitsschicht abgeschlossen, die, je nach Reaktivität des Grundwerkstoffes, durch Physisorption über van-der-Waalssche Bindungen oder eine festere Chemisorption mit kovalenten oder ionischen Bindungsanteilen erfolgt.

Abhängig von der mechanischen Beanspruchung bildet sich eine *innere Grenzschicht* aus, die praktisch dieselbe chemische Zusammensetzung wie der Grundwerkstoff aufweist. Die mechanischen wie auch die metallurgischen Eigenschaften sind jedoch wegen der gestörten Gitterstruktur, wodurch vermehrt Eigenspannungen auftreten, unterschiedlich.



**Bild 2:** Grenzschichtaufbau eines tribomechanisch beanspruchten metallischen Werkstoffes nach *Wuttke* [1988]

Die *äussere Grenzschicht* bewirkt in erster Linie eine Trennung der Grundwerkstoffe der Gleitpartner. Erst die Zerstörung dieser Schicht führt zu adhäsiven Wechselwirkungen der Grundwerkstoffe. In den meisten Fällen bestimmen die mechanischen Eigenschaften der äusse-



ren Grenzschicht, wie Härte und Schubfestigkeit, aber auch die Adhäsionsneigung sowie Haftfestigkeit zum Grundwerkstoff die Art und die Grösse der Kontaktwechselwirkung.

Der komplizierte Aufbau der Grenzschicht erschwert es, verlässliche Werkstoffkenngrössen zu erhalten, ohne welche jedoch die Quantifizierung des Reibanteiles nicht möglich ist. Schwierigkeiten ergeben sich darüber hinaus, wenn Aussagen über die Kontaktwechselwirkung, die das elastische und plastische Verhalten der oberflächennahen Werkstoffbereiche einschliesst, und auch die Kenntnis der Art der Wechselwirkung (molekular oder mechanisch) erforderlich. Diese hängen neben der Ausbildung der Grenzschichten vor allem von der Mikrogeometrie der Oberflächen ab.

Die Schichtbildung kann je nach vorliegenden Bedingungen von monomolekularen Chemisorptionsschichten über Anlaufschichten ( $h < 0,1 \mu\text{m}$ ) bis zu Zunderschichten ( $h > 1 \mu\text{m}$ ) reichen. Die Einflussfaktoren sind sehr mannigfaltig und untereinander verknüpft. Folgende tribologischen Faktoren sind nach *Wuttke [1987]* bei der Bildung von Reaktionsschichten wesentlich:

- *Reibungswärme,*
- *Entfernung von Schutzschichten,*
- *Erzeugung frischer, reaktionsbereiter Oberflächen,*
- *Zunahme der effektiven Oberfläche,*
- *schnellerer Transport der reagierenden Partikel und*
- *Bildung von Gitterdefekten durch plastische Deformation.*

In Reibsystemen, bei denen Oberflächenveränderungen auftreten, wie dies in der Umformtechnik der Fall ist, muss zudem davon ausgegangen werden, dass ständig chemische Reaktionen ablaufen und diese auf die Ausbildung der Grenzschicht rückwirken.

#### 1. 1. 1. 3. 2 Wechselwirkungen

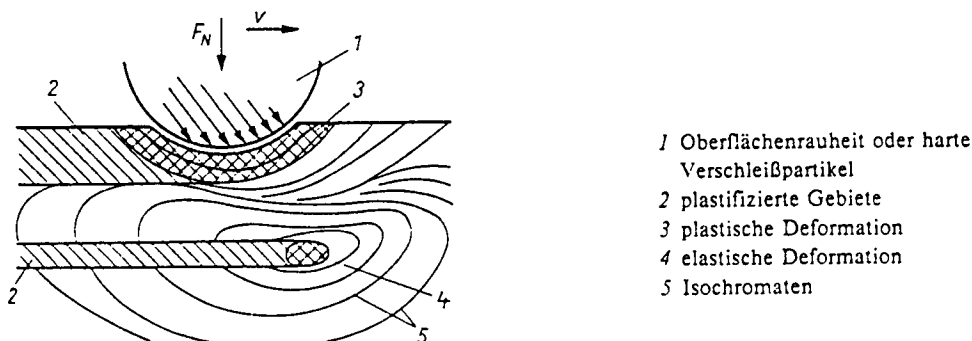
Die molekularen Wechselwirkungen erfolgen in dünnen Oberflächenschichten in Bereichen bis etwa 10 nm, die mechanischen in Bereichen bis 30  $\mu\text{m}$ . Für den Gleitvorgang ist die Scherfestigkeit der Reibverbindung massgebend. Da jedoch im realen Tribosystem unterschiedliche Reibzustände auftreten, ist ihr jeweiliger Anteil an allen Reibvorgängen für den makroskopisch gemittelten Reibbeiwert entscheidend. Ist die Scherfestigkeit eines Reibkörpers kleiner als die Summe der lokal ausgebildeten Wechselwirkung, so kommt es zur Abscherung im weicheren

Grundkörper, d. h. zu einem Stoffübertrag.

Die Wechselwirkung ist nach *Wuttke [1987]* ein zusammengesetzter Prozess mit den drei folgenden möglichen Teilschritten:

- Ausbildung einer realen Kontaktfläche metallischer Berührung
  - *plastische Deformation*
  - *Aufreissen der Grenzschicht*
  - *Versetzungsreaktion, Erhöhung der Leerstellenkonzentration*
- Aufbau molekularer Bindungen
  - *Ladungsumlagerung*
  - *Diffusionsprozesse*
- Abscherung im Gebiet geringster Festigkeit

Bei der **mechanischen Wechselwirkung** dringen die Oberflächenuneben- oder -rauheiten des härteren Körpers in den weicheren ein, drücken einander platt oder durchdringen sich gegenseitig. Das bedeutet, dass die Oberflächenbereiche elastisch oder plastisch deformiert werden und eine Werkstoffverdrängung stattfindet.



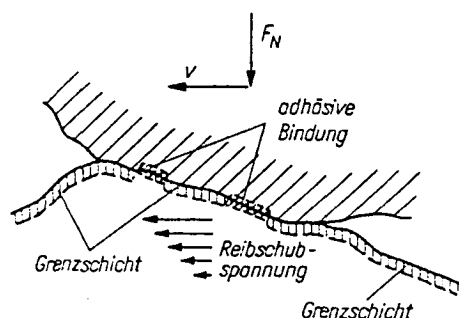
**Bild 3:** Modell einer Mikrokontaktstelle bei mechanischer Wechselwirkung nach *Wuttke [1987]*

Dies führt lokal zu sehr komplizierten Spannungs- und Deformationszuständen, zu deren Beschreibung dreidimensionale Kollisionsbetrachtungen oder stochastische Methoden notwendig sind. Welcher Bereich elastisch oder plastisch deformiert wird, hängt vom lokalen Spannungsfeld und dem lokalen Festigkeitsverhalten der Werkstoffe ab. Zur Entscheidung, welcher dieser beiden Zustände lokal auftritt, wurden eine ganze Reihe von Arbeiten, vor allem im Hinblick auf Verschleissuntersuchungen, durchgeführt. Von *Greenwood und Williamson [1966]* wurde ein Plastizitätsindex  $\psi$  definiert, ähnlich wie auch von *Kragelskij [1960]*. Andere stützen sich auf die Mikrohärtigkeit des Werkstoffes [*Bückel 1965, Habig 1980*].

Der Umfang der Oberflächendeformation wie auch deren Wirkungsweise hängt in starkem Masse vom Grundwerkstoff (Al, Fe, Cu etc.), der Ausbildung der Oxidschichten sowie der Art des Zwischenstoffes ab. Hierzu wurden verschiedene Theorien formuliert. Von *Rabinovicz* [1965], *Kragelskij* [1973] wurden zur analytischen Erfassung des Anteiles der mechanischen Wechselwirkung an der Reibung die Parameter der Oberflächentopographie und das Festigkeitsverhalten des Grundwerkstoffes verbunden. Von *Prager, Hodge* [1954] sowie *Suh* und *Sin* [1981] wurden mit Hilfe der Gleitlinientheorie ebenfalls Betrachtungen von Kontaktwechselwirkungen durchgeführt.

Die Übertragung der obige Berechnungsmöglichkeiten des mechanischen Anteiles  $\mu_{\text{mech}}$  auf reale technische Reibsysteme ist jedoch nicht möglich, da die geometrischen Kontaktbedingungen während des Gleitens und das Festigkeitsverhalten der oberflächennahen Werkstoffbereiche nicht bekannt sind.

Unter **molekularer Wechselwirkung** oder **Adhäsion** wird nach *Wuttke*, [1987] die Ausbildung aller Formen der molekularen Bindungen zwischen sich berührenden Oberflächenbereichen verstanden. Demzufolge umfasst Adhäsion im weiteren Sinne die Kohäsion zwischen gleichartigen Metallen, die Adhäsion zwischen unterschiedlichen Metallen sowie die Ausbildung von Zwischenschichten fester Lösungen, intermetallischer Verbindungen, chemischer Verbindungen oder anderer heterogene Strukturen.



**Bild 4:** Modell einer Mikrokontaktstelle bei molekularer Wechselwirkung nach *Wuttke* [1987]

Der Zusammenhang zwischen Umformvermögen und Adhäsionsverhalten wurde von *Buckley* [1968, 1981], untersucht. Er zeigte, dass die zur Betätigung der Gleitungen notwendige Schubspannung von der Kristallstruktur, das heisst von der unterschiedlichen Anzahl von aktivierbaren Gleitsystemen bei Ein- und Polykristallen abhängt. Die erforderliche

Schubspannung nimmt von kfz- über krz- zu hex-Kristallen ab.

Wird die Oberfläche plastisch deformiert, so bilden sich freie metallische Oberflächen. Durch diese freigestellten Bindungsmöglichkeiten wird die Oberflächenenergie stark erhöht. Durch physikalische oder chemische Adsorption muss diese Energie abgebaut werden, sonst kommt es zum Aufbau adhäsiver Bindungen zum Gegenkörper. Die Änderung der Oberflächenenergie je Flächeneinheit  $\Delta\gamma$  ergibt sich aus der Differenz von Oberflächenenergie der kontaktierenden Festkörper  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  und der Grenzflächenenergie  $\gamma_{12}$ :

$$\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (4.1)$$

Die Oberflächenenergie fester Körper ist nach *Tabor [1979]* jedoch schwer messbar und die quantitative Übereinstimmung von gemessenen und gerechneten Werten gering.

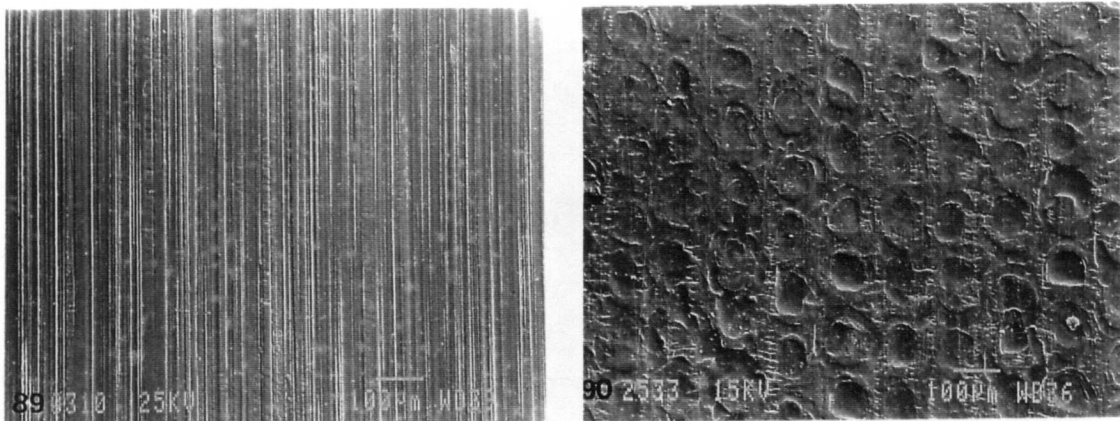
Die Adhäsionsmechanismen treten an realen Kontaktflächen beliebiger Metallpaarungen auf. Die zur Klärung der verschiedenen Adhäsionsmechanismen herangezogenen Phänomene wie gegenseitige Löslichkeit, Diffusionsprozesse, Elektronenkonfiguration, Realstruktur in den Oberflächenschichten (Versetzungstheorie der Adhäsion) komplizieren die Quantifizierung der molekularen Wechselwirkung derart, dass die Berechnung des molekularen Anteils  $\mu_{\text{mol}}$  zur Zeit noch nicht möglich ist.

Grossen Einfluss auf die Ausbildung der oben beschriebenen Phänomene hat dabei die lokal an der rauhen Oberfläche herrschende Temperatur [*Kaffanke 1973, Tabor 1979*]. Während die Gesamtwerkstücktemperatur beim Kaltumformprozess etwa 60 Grad erreicht, erreichen die lokalen Temperaturspitzen die Funkentemperatur. Diese hohen Temperaturen ermöglichen den Einsatz von künstlich erzeugten Additiven, deren Aktivierung erst weit oberhalb der Raumtemperatur einsetzt. Dagegen darf sich der Zwischenstoff bei diesen Temperaturen nicht zersetzen oder sich chemisch so verändern, dass die Schmier- respektive Trennwirkung nachlässt. Diese komplizierten Anforderungen an den Zwischenstoff, welcher zusammen mit den lokalen Beanspruchungen und der Zusammensetzung der Werkstück- und Werkzeugwerkstoffe den Aufbau der Grenzschicht bestimmen, führen dazu, dass kein einzelner optimaler Zwischenstoff existiert. Die Wahl des Zwischenstoffes erfolgt in der Praxis rein empirisch, da meist weder der exakte chemische Aufbau des Zwischenstoffes noch die im Reibkontakt induzierten Reaktionsprodukte bekannt sind [*Dowson 1977, Giessner 1977, Azushima 1987*]. Im weiteren existieren keine dem Umformvorgang ähnlichen, genormten Zwischenstofftestverfahren.

### 1.1.2 Rauhe Oberflächen

Für das Reibverhalten realer Bleche ist die Rauheit der Oberfläche entscheidend, wie *Dubbel [1981]*, *Noppen [1981, 1985]* und *Balbach [1988]* zeigten. Die Rauheiten der Reibflächen bestimmen die Geometrie der Mikrokontaktflächen und damit die Art und Grösse der an der Grenzschicht ablaufenden Wechselwirkungen.

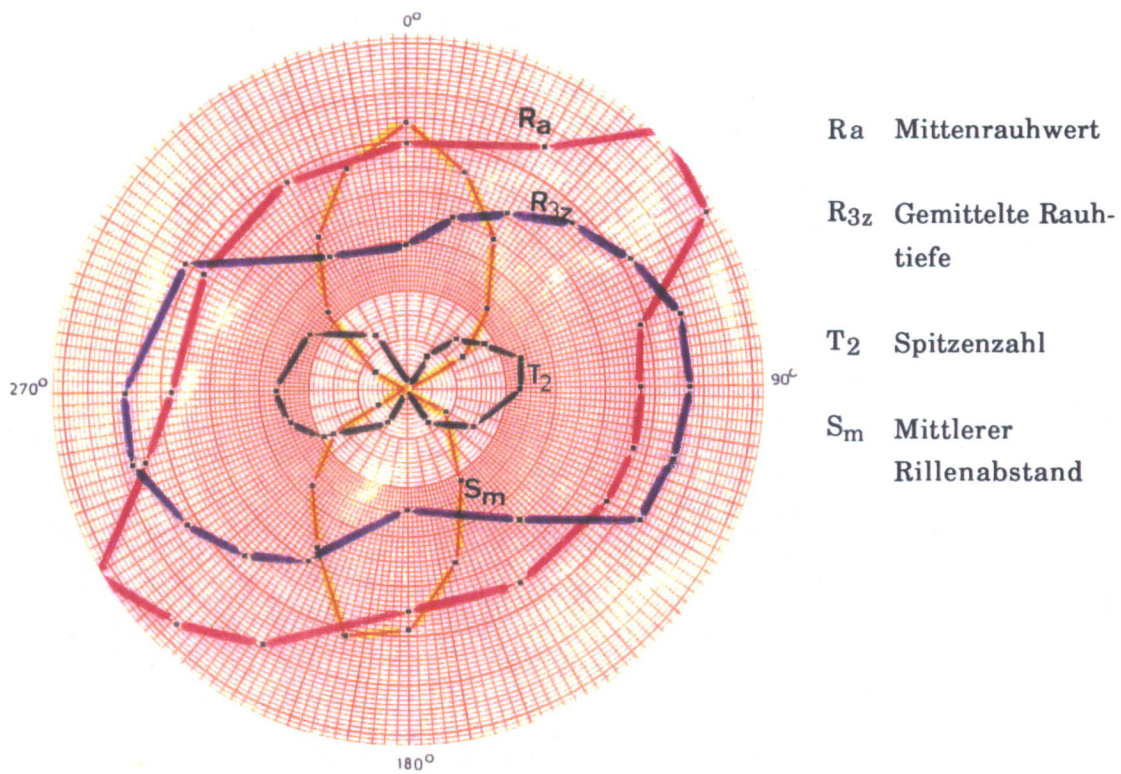
Die folgenden Bilder zeigen Oberflächenstrukturen von neu entwickelten Blechwerkstoffen für die plastische Umformung.



**Bild 5:** Rasterlektromikroskop-Aufnahme (REM) von realen Aluminiumblechoberflächen. Die Walze zur Erzeugung der linken Oberfläche wurde durch Schleifen, diejenige der rechten durch Laserpulsen erzeugt.

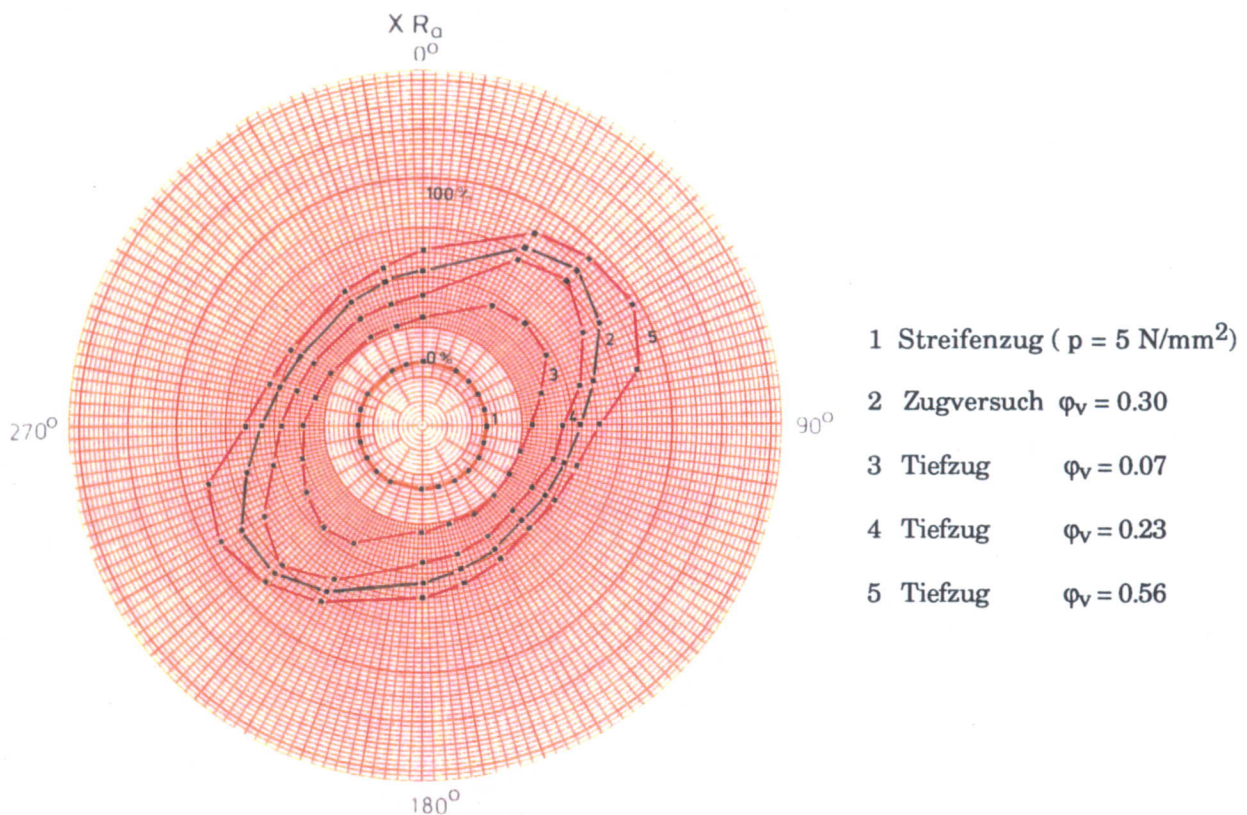
#### 1.1.2.1 Beschreibung durch genormte Kennwerte

Die bekannten, in DIN-4762, DIN-4786 und DIN-4776 beschriebenen, genormten Kennwerte werden im Tastschnittverfahren, wie es in DIN-4774 dargestellt wird, ermittelt. Neben den bekannten, von *Brendel [1978]*, *Thomas [1982]* u. a. beschriebenen Nachteilen dieses Verfahrens erschwert die linienhafte, vertikale Betrachtungsweise den Vergleich mit der realen Gleitfläche [*Bodschwina, 1988*]. Im weiteren zeigte *Streidl [1988]* in seiner Arbeit deutlich, dass die Grössen der mit dem Tastschnittverfahren ermittelten Oberflächenkennwerte stark vom Winkel zwischen der Messrichtung und der Walzrichtung abhängen.



**Bild 6:** Abhängigkeit verschiedener Oberflächenkennwerte vom Messwinkel, dargestellt in Polarkoordinaten nach *Streidl* [1988]. Tiefzug:  $\varphi_v=0.45$ , Werkstoff St1405

Die dargestellten Kurvenverläufe zeigen deutlich die Richtungsabhängigkeit realer Blechoberflächen. Im Fall einer isotropen Oberfläche wäre die Kurve kreisförmig. *Streidl* zeigt in seiner Arbeit weiter, wie im nächsten Bild dargestellt, dass die Richtungsabhängigkeit der Oberflächen durch die Deformation, vor allem aber durch das Verhältnis der Dehnungen  $\epsilon_1/\epsilon_2$  des Werkstoffes beeinflusst wird.



**Bild 7:** Veränderung der relativen Mittenrauheit  $xR_a$  in Abhängigkeit vom Umformungszustand und der Messrichtung, dargestellt in Polarkoordinaten nach *Streidl [1988]*, Werkstoff St1405

Die oben ermittelte Richtungsabhängigkeit der Kennwerte verdeutlicht die Problematik und Unzulänglichkeit der linienhaften Betrachtungsweise rauher Oberflächen. Es wird sofort klar, dass auf der Grundlage dieser im Tastschnittverfahren ermittelten Kennwerte unterschiedliche Aussagen über die Oberflächenbeschaffenheit und damit keine allgemein gültigen Aussagen über das Reibverhalten realer Oberflächen gemacht werden können. Dies wird durch eigene Versuche wie auch Untersuchungen von *Fronzek [1988]* bestätigt. Die Tastschnitte ermöglichen einzig anschauliche und teilweise semi-quantitative Vergleiche unterschiedlicher Rauheiten [*Pfeifer, 1987*].

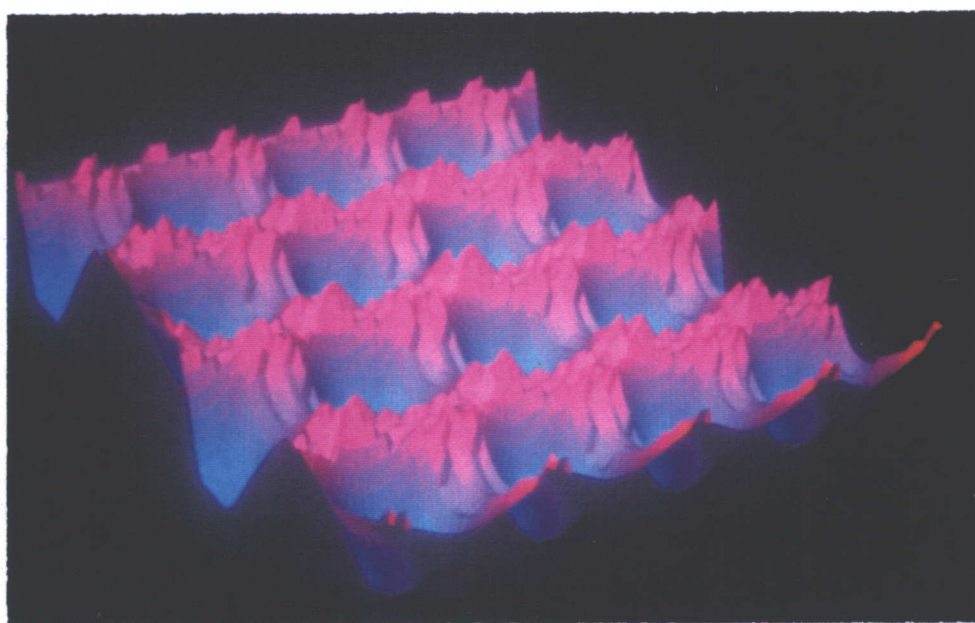
### 1.1.2.2 Dreidimensionale Oberflächenbeschreibung

Zur Bewertung des Reibverhaltens von Rauheiten ist nicht eine einzelne Schnittlinie, sondern die Struktur der dreidimensionalen Reibfläche entscheidend.

## 2.1 Simulation von Oberflächenstrukturen

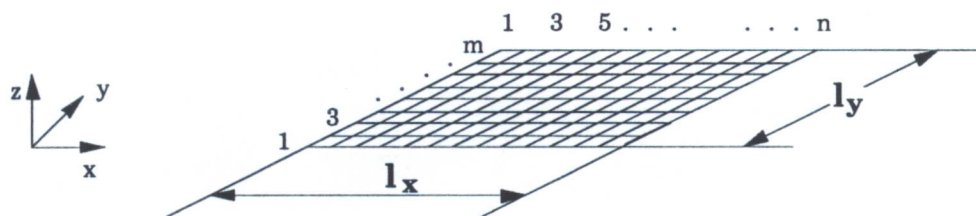
Wie bereits beschrieben, existiert heute keine geeignete Beschreibung der Oberfläche, welche eine Optimierung dieser Oberflächenstrukturen ermöglichen würde.

Um das Reibverhalten von bestehenden wie auch neuentwickelter Oberflächenstrukturen zu beurteilen und die Abhängigkeit der Oberflächenparameter von der Oberflächencharakteristik und deren Veränderung bestimmen zu können, wurde ein Simulationsprogramm erstellt. Mit diesem ist es möglich, unterschiedliche Oberflächentypen zu simulieren und beliebige Oberflächenkennwerte zu ermitteln.



**Bild 14:** Beispiel einer simulierten Blechoberfläche

Eine mögliche, für numerische Auswertungen geeignete Oberflächenbeschreibung erfolgt durch eine Netzstruktur.



**Bild 15:** Netzstruktur zur Oberflächenbeschreibung



Zur Analyse metallischer Oberflächen existieren eine Vielzahl von Methoden, welche von *Kienzle [1967]*, *Kragelskij [1971]*, *Buckly [1981]*, *Schey [1983]* u.a. übersichtlich beschrieben wurden.

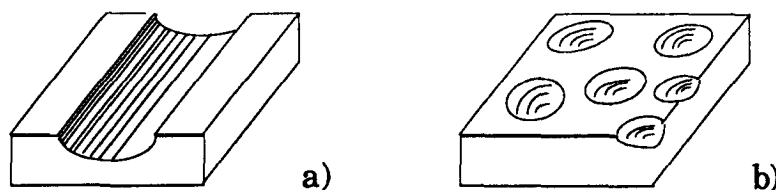
Zur Quantifizierung der dreidimensionalen Oberflächenstrukturen werden heute optische Messverfahren, zum Beispiel, die Laserfokussierung, die Interferenzmessung und das konvokale Lichtmikroskop verwendet. Mit ihnen können, in Kombination mit moderner Computertechnologie, beliebige Rauheiten digitalisiert und als Basis weiterer Oberflächenbeschreibungen verwendet werden. Diese optischen Messgeräte ermöglichen diskrete digitale Abbilder mit hoher Auflösung und Genauigkeit.

Zur mathematischen Beschreibung der dreidimensionalen Strukturen wurden von *Whithouse [1978, 1982]*, *Staufert [1979, 1980]*, *Müller [1975, 1985]* u.a. Ansätze formuliert, um mit Hilfe von statistischen Modellen und durch Zufallsfunktionen die Oberflächen modellieren zu können. *Shin [1979]* benutzte Funktionen, um abrasiv beanspruchte Oberflächen, approximieren zu können. *Jürgen [1990]* beschreibt Rauigkeiten durch Fraktale. Mit diesen Ansätzen ist die Modellierung der realen Oberflächenstrukturen nur begrenzt möglich, sehr aufwendig und daher für die Untersuchung des Reibverhaltens nicht verwendbar.

In Form eines Kennwertes existiert nur der nach DIN-4765 genormte Flächentraganteil, welcher später auch verwendet wird. Die exakte, für weitere Auswertungen anwendbare Beschreibung der Rauheiten  $r_a(\underline{x})$  ist noch nicht bekannt.

Zur qualitativen Beschreibung von Oberflächen wurden die Normen DIN-4761 respektive VSM-58070 eingeführt. Dabei werden die technischen Oberflächen nach markanten geometrischen Gesichtspunkten geordnet. Um dies zu erreichen, werden die rauhen Oberflächen durch Geometrielemente idealisiert beschrieben.

Das wichtigste Merkmal zur Typologisierung der in der Umformtechnik eingesetzten Blechoberflächen ist die Unterscheidung von rilligen und nichtrilligen Oberflächenstrukturen.



**Bild 8, 9:** Primäre Charakteristik zur Beurteilung rauher Oberflächen nach VSM-58070. Bild a) zeigt eine rillige Oberfläche, Bild b) eine nichtrillige Oberfläche.

Durch die Definition weiterer Merkmale wird die Beschreibung der Oberflächenmikrogeometrie hierarchisch weiter verfeinert:

Oberflächentyp	-> Varianten
• rillig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geordnet, gleichgerichtet</li> <li>• geordnet, sich kreuzend</li> <li>• ungeordnet</li> <li>• spezieller Verlauf</li> </ul>
• nichtrillig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• muldig</li> <li>• kuppig</li> <li>• gewellt</li> <li>• schuppig</li> </ul>

**Bild 10:** Weitere Unterscheidungsmerkmale der Oberflächen nach VSM-58070

Begründet durch den Herstellungsprozess der Walzenrauheit, werden in der Umformtechnik vor allem rillige, nichtrillige, muldige und kuppige Oberflächen verwendet.

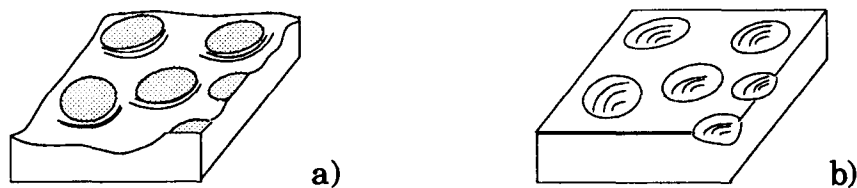
Bei der Bearbeitung der Walzen durch Schleifen, Drehen etc. entstehen **rillige Oberflächen**. Dabei wird zwischen dreieckigen, spitzkämmigen, rundkämmigen und welligen Rillenformen unterschieden.



**Bild 11:** Rillenformen verschiedener Oberflächengeometrien im Schnitt

Bei den in der Umformtechnik gebräuchlichen Blechen mit rilliger Struktur sind die Rillen im allgemeinen gerade und verlaufen gleichgerichtet oder sich kreuzend. Die Rillen sind oft unterbrochen und bezüglich Rillenabstand und -breite unregelmässig. Die Oberflächen mit parallelen Rillenkämmen haben meist einen hohen periodischen Anteil, und die Tiefe der Rillen ist gleichmässig und gleichbleibend.

Die **nichtrilligen Oberflächen** haben eine regelmässige oder unregelmässige Erscheinungsform. Durch Laserpulslen, Erodieren, Strahlen werden nichtrillige Oberflächenformen erzeugt, welche ein kuppiges oder muldiges Erscheinungsbild aufweisen.



**Bild 12, 13:** Sekundäre Merkmale zur Beurteilung rauher Oberflächen nach VSM-58070. Bild a) kuppige und b) muldige Oberflächenstruktur

Die Einteilung und Klassierung der technischen Oberflächen nach markanten geometrischen Merkmalen entspricht nur einer qualitativen, jedoch anschaulichen Beschreibung der Rauheit. Die Typologisierung eignet sich darum als Grundlage der weiteren reibtechnischen Überlegungen. Weitere Vorteile, welche sich durch die Oberflächentypologisierung ergeben, werden während der Diskussion der Kennwerte erläutert.

## 1.2 Zielsetzung

Einen wichtigen Parameter zur wirtschaftlich optimalen Produktion von Blech-Hohlteilen bildet das Reib- und Verschleissverhalten des Werkstückes. Daher soll durch die Optimierung der Oberflächenrauheit das Umformverhalten des Blechwerkstoffes verbessert werden.

Da das Reibverhalten nicht durch theoretische Modelle quantifiziert werden kann, müssen zur Optimierung der Werkstückoberflächen in Abhängigkeit von den Oberflächenparametern halbempirische Wege gefunden werden.

Die bisher zur Beschreibung der Blechoberflächen verwendeten Parameter zeigen weder eine Korrelation mit dem Reib- noch mit dem Verschleissverhalten. Dass kein direkter Zusammenhang zwischen den Rauheitskennwerten und dem Reibverhalten hergestellt werden konnte, war nicht entscheidend, solange die Oberflächenstruktur einen konstanten, nicht zu optimierenden Parameter darstellte. Soll die Oberflächenstruktur jedoch optimiert werden, so müssen neue, mit dem Reib- und Verschleissverhalten in Zusammenhang stehende Kennwerte eingeführt werden. Dabei ist der komplexe Einfluss unterschiedlicher Parameter wie der Oberflächenwandlung, der Relativgeschwindigkeit und der Spannung zu berücksichtigen.

Das Ziel besteht somit darin, zur Beschreibung realer Oberflächen geeignete, *reibungsorientierte Kennwerte* zu formulieren, welche die Optimierung rauher Oberflächen bezüglich Reib- und Verschleissverhalten

ermöglichen.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird dieses Verhalten verschiedener charakteristischer Oberflächentypen an Realstrukturen untersucht. Die Untersuchungen sollen, soweit möglich, die Korrelation zwischen den Oberflächenparametern und dem Reibverhalten - bei gleichem Werkstoff - aufzeigen.

## 2 Reiborientierte Oberflächenbeschreibung

Für die gesamte Reibkraft  $F_{\text{Reib}}$  im Reibkontakt gilt:

$$F_{\text{Reib}} = F_{\text{mol}} + F_{\text{mech}} \quad (2.1)$$

Der Anteil der jeweiligen Wechselwirkung an der gesamten Reibkraft  $F_{\text{Reib}}$  an Reibfläche hängt von den *Systemkomponenten*

- Werkstück (Wst),
- Werkzeug (Wz) und
- Zwischenstoff (Zwst),

den *Umformparametern*, wie

- Werkzeuggeometrie,
  - Stempelgeschwindigkeit,
  - Niederhalterkraft,
  - Werkzeugtemperatur
- u. a.,

sowie den während des Umformzyklus veränderlichen *Systemvariablen*,

$\varepsilon_{ij}^p(t)$	: Deformation,
$\sigma_{ij}(\underline{x}, t)$	: Spannung,
$v_{\text{rel}}(\underline{x}, t)$	: Relativgeschwindigkeit,
$T(\underline{x}, t)$	: Temperatur

und der Oberflächenwandlung

$r_a(\underline{x}, t)$	: Oberflächenwandlung
-------------------------	-----------------------

ab. Diese Parameter und Variablen bestimmen die im Tribokontakt ablaufenden chemischen und physikalischen Prozesse.

In der vorliegenden Arbeit werden vor allem Reibeinflüsse untersucht, welche durch die unterschiedliche Gestaltung der Oberfläche an einem Umformsystem hervorgerufen werden. Daraus folgt, dass eine grosse Anzahl der oben eingeführten Parameter, das heisst alle Systemkomponenten und Systemparameter, als konstant betrachtet werden können und die Oberflächenoptimierung nur bezüglich der Systemvariablen durchgeführt werden muss. Diese material- und umformspezifische Betrachtung vereinfacht die Optimierungsbetrachtungen erheblich.

Für die Simulation der Rauheit wurde eine Fläche der Grösse 1 mm \* 1 mm in  $n \cdot m$  (300 \* 300) Knotenpunkte aufgeteilt. Jedem Knotenpunkt  $x, y$  wurde eine bestimmte  $z$ -Koordinate zugewiesen. Durch die Wahl unterschiedlicher Funktionen  $z=f(x,y)$ , zum Beispiel

- Random
- Sinus
- $e^{-(x-x_0)^2}$

und ihrer Superposition, können beliebige Profile generiert werden. Als zusätzliche Parameter werden ein oberer und ein unterer Cut-off eingeführt, welche die Wahl unterschiedlicher Kurvenbereiche zur Modellierung der gesamten Rauheit  $r_a(\underline{x})$  ermöglichen.

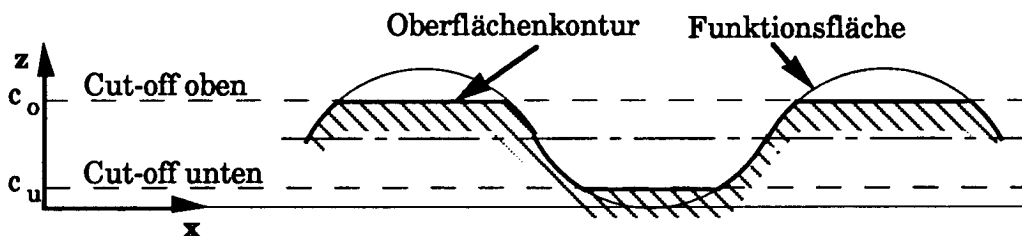


Bild 16: Durch zwei Cut-offs begrenzte simulierte Rauheit

Zur Beurteilung der Oberflächen ist man somit nicht auf Versuche angewiesen. Die Bilder der simulierten Oberflächen zeigen Ausschnitte von vorgängig typologisierten und in den Versuchen untersuchten Oberflächencharakteristiken. Die technischen Daten der simulierten Oberflächen sind:

Fläche	1	mm <sup>2</sup>
Rauhtiefe $r_{max}$	0.2 + 10	$\mu m$
Netz	90'000	Punkte

### 2.1.1 Rillige Oberflächenstrukturen

Der Modellierung der rillig sich kreuzenden Oberfläche mit einer maximalen Rauhtiefe  $t_{max}$  wurde eine Sinus-Funktion zu Grunde gelegt.

Die Sinus-Funktion hat einen Wertebereich von -1 bis +1. Durch die Wahl des oberen Cut-off  $c_o$  und des unteren Cut-off  $c_u$ , wird der Ausschnitt der betrachteten Funktion festgelegt, wobei gilt:

$$-1 < c_u < c_o < +1 \quad (2.2)$$

Nach der Berechnung der x- und y- Koordinaten der Knotenpunkte der Netzstruktur wird durch die beiden Formeln

$$z_r(x,y) = \text{Minimum} \{ \sin(f_x * n_x * x), \sin(f_y * n_y * y), c_o \} \quad (2.3)$$

$$z(x,y) = \text{Maximum} \{ z_r(x, y), c_u \} \quad (2.4)$$

der entsprechende z-Wert bestimmt.  $n_x$  gibt dabei die Anzahl der Rillen in x-Richtung und  $n_y$  die Anzahl in y-Richtung.  $f_x$  und  $f_y$  sind die Umrechnungsfaktoren der Rillenzahlen auf die Seitenlänge der simulierten Fläche, es gilt:

$$f_x = 2 * \pi / l_x \quad \text{resp.} \quad f_y = 2 * \pi / l_y \quad (2.5)$$

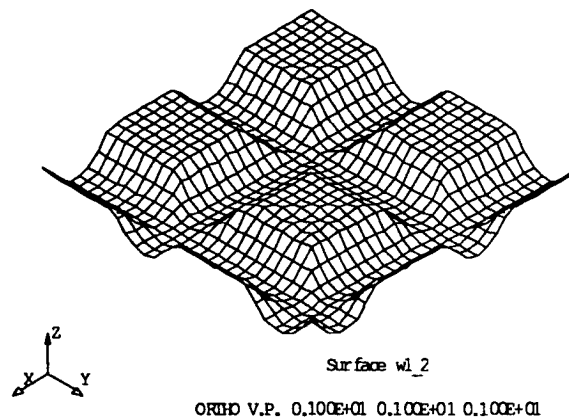
Ist der z-Wert eines Knotenpunktes grösser als der obere Cut-off  $c_o$  oder kleiner als der untere Cut-off  $c_u$ , so wird dem z-Wert der Wert des entsprechenden Cut-off zugeordnet und der betrachtete Teil der Funktion bestimmt. Durch die Normierung der z-Werte und der Multiplikation mit der maximalen Rauhtiefe  $r_{max}$  wird die z-Koordinate des Knotenpunktes  $n_o$  aus der Formel

$$z(n_o) = (z(x,y) - c_u) * r_{max} / \Delta cutoff \quad (2.6)$$

errechnet, wobei:

$$\Delta cutoff = c_o - c_u \quad (2.7)$$

Das folgende Bild zeigt einen Ausschnitt aus dieser so modellierten rillig sich kreuzenden Oberflächenstruktur.



**Bild 17:** Simulierte rillig sich kreuzend Oberfläche, dargestellt mit 30 \* 30 Netzlinien

Da die Oberflächenstruktur anisotrop ist und sich die Geometriemerkmale periodisch wiederholen, ist es zulässig, nur einen repräsentativen Ausschnitt der realen Oberfläche zur Ermittlung der Kennwerte zu verwenden.

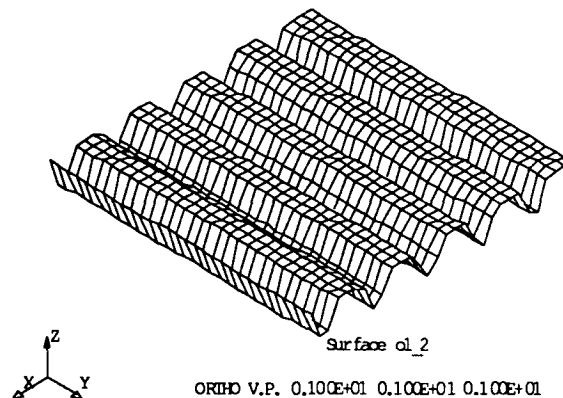
Liegt die Rillenstruktur nur längs einer Richtung vor, so wird

$$n_y = 0 \quad (2.8)$$

gesetzt. Die Formel ( 2.3 ) wird dabei reduziert zur Form

$$z_r(x,y) = \text{Minimum} \{ \sin( f_x * n_x * x), c_0 \} \quad (2.9)$$

Die weitere Berechnung erfolgt wie oben beschrieben. Die resultierende, rillig gleichgerichtete Rauheit ist im folgenden Bild dargestellt.

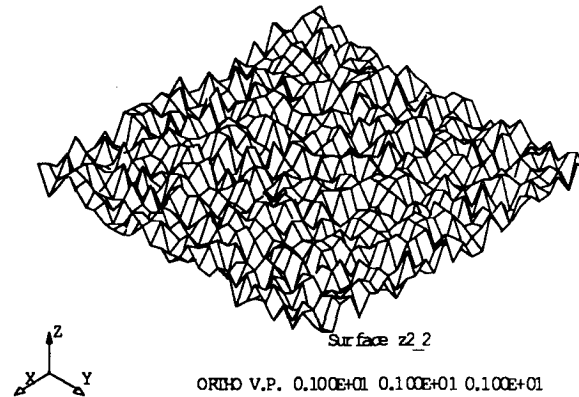


**Bild 18:** Rillig gleichgerichtete, sich nicht kreuzende Oberfläche, dargestellt mit 30 \* 30 Netzlinien

### 2.1.2 Oberflächenstruktur mit zufallsverteilten Rauheitskonturen

Bei der Modellierung einer Oberfläche mit zufallsverteilter Rauheitsstruktur ("random"-Oberfläche) wurden die z-Koordinaten der Knotenpunkte mit Hilfe eines Zufallsgenerators erzeugt. Durch die Wahl eines Wertebereiches von 0 bis +1 und die Limitierung des z-Wertes durch einen unteren und oberen Cut-off errechnen sich die z-Koordinaten entsprechend der Formel ( 2.6 ). Die dabei entstehende Struktur zeigt das folgende Bild.





**Bild 19:** Zufallsverteilte, "random" Oberfläche, dargestellt mit 30 \* 30 Netzlinien

### 2.1.3 Muldige Oberflächenstrukturen

Da neben der Oberflächencharakteristik der Einfluss der Konturgeometrie auf das Oberflächenverhalten interessiert, wurde bei den beiden folgenden muldigen Oberflächen die Form der Rauheit variiert. Die Flankenform der ersteren wurde durch eine Exponentialfunktion mit einem Wertebereich von -1 bis 0 modelliert. Dabei wird, neben der maximalen Rauhtiefe  $r_{\max}$  und den beiden Cut-offs  $c_0$  und  $c_u$ , der Muldendurchmesser  $d_p$  festgelegt. Aus dem Abstand der Muldenmitten  $dp_x$  in x- und  $dp_y$  in y-Richtung werden die Koordinaten der Muldenmitten  $x_p(n_p)$  und  $y_p(n_p)$  bestimmt. Der z-Wert der Knotenpunkte x, y der Rauheit errechnet sich dabei, beginnend am tiefsten Punkt, aus:

$$dz = -e \{ -(x - x_p(n_p))^2 - (y - y_p(n_p))^2 \} / p_0 \quad (2.10)$$

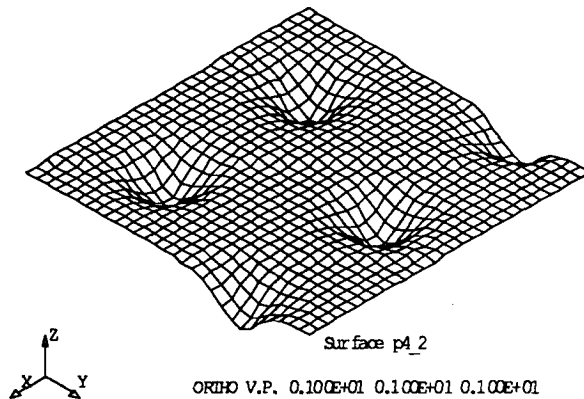
Der Faktor  $p_0$  wird durch die Beziehung

$$p_0 = - (dp_x dp_y / 2)^2 / \log(-c_0) \quad (2.11)$$

so bestimmt, dass mit  $d_p = 1$  die z-Koordinate gerade dem oberen Cut-off  $c_0$  entspricht. Dies ermöglicht die beliebige Variation der Rauhtiefe, ohne dass sich die Mulden überschneiden.

$$z(x, y) = z(x, y) + \sum_{1}^n \sum_{1}^m dz \quad (2.12)$$

Aus dem normierten z-Wert  $z(x, y)$  wird die z-Koordinate des Knotenpunktes  $z(n_0)$  nach der oben verwendeten Formel ( 2.6 ) ermittelt. Die so erzeugte Struktur zeigt folgendes Bild.

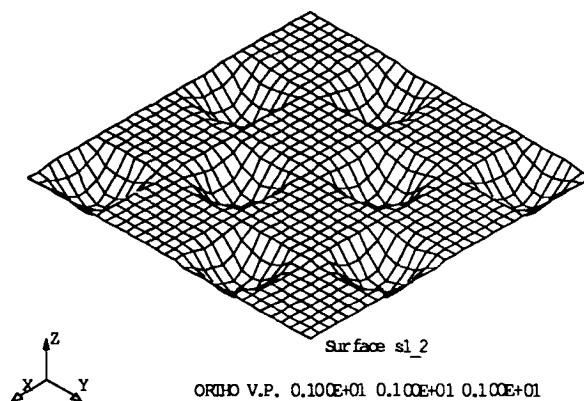


**Bild 20:** Muldige Oberfläche mit Flankenform nach exponentiellem Ansatz, dargestellt mit 30 \* 30 Netzlinien

Die muldige Oberflächencharakteristik mit einer sinusförmigen Flankenform wurde analog der rilligen Oberflächen erzeugt, wobei der z-Wert durch die Formel

$$z(x,y) = \{ \sin(f_x * n_x * x) * \sin(f_y * n_y * y) \} \quad (2.13)$$

berechnet wird. Daraus resultiert die folgende Oberfläche.



**Bild 21:** Oberflächentyp: Muldig,  $Flankenform = f(\sin(z))$

Die Dimensionen der simulierten Oberflächenstrukturen entsprechen denjenigen der bei den Versuchen verwendeten Bleche. Diese Übereinstimmung ermöglicht den Vergleich der simulierten und der realen Oberflächen bei den reibtechnischen Betrachtungen. Um die Kennwerte der unterschiedlichen Oberflächentypen vergleichen zu können, wurde bei obigen Bildern eine einheitliche Rauhtiefe von 2 µm gewählt.

## 2.2 Oberflächenspezifische Reibeinflüsse

Grundsätzlich gilt, dass das Reibverhalten des Reibsystems während jedem Umformzyklus gleich sein soll, um die Reproduzierbarkeit des Umformteiles zu gewährleisten.

Im Hinblick auf die Oberfläche existieren dabei folgende zwei Aspekte:

- Die durch den Kontakt des reaktiven Grundwerkstoffes mit der Grenzschicht des Gegenkörpers oder mit dessen Grundwerkstoff ausgelösten Adhäsionserscheinungen sind zu vermeiden, um lange Standzeiten zu ermöglichen und die Reproduzierbarkeit des Umformprozesses zu gewährleisten.
- Das *Reibverhalten* so zu verbessern, dass dadurch die optimale Umformbarkeit des Werkstoffes und damit die bestmögliche Materialausnutzung resultiert.

Das Versagen der Grenzschicht, welches zu adhäsiven Wechselwirkungen respektive zur Veränderung der Oberflächeneigenschaft und -geometrie führt, tritt auf, wenn

- *die Grenzschicht versagt und/oder*
- *die Bildung neuer Grenzschichten verhindert wird.*

Mögliche Gründe für das Versagen der Grenzschicht sind:

- *Zu hohe Flächenpressung an der Grenzschicht, da*
  - *die lokalen Schubspannungen zu hoch sind*
  - *Rauheitsspitzen die Grenzschicht durchstossen*
- *Das Abscheren der Rauheitsspitzen wegen zu grossen mechanischen Wechselwirkungen*
- *Oberflächenvergrößerung durch die plastische Deformation des Grundwerkstoffes oder der Rauheit.*

Die letztgenannte Oberflächenvergrößerung bedingt, dass die Grenzschicht stets neu gebildet werden muss. Die folgenden beiden Mechanismen können dem entgegenwirken:

- *der Zwischenstoff zur Neubildung fehlt,*
- *die Reaktivität des Zwischenstoffes in der Reibkontaktzone reicht nicht mehr aus, um diese zu bilden.*

Die Optimierung des Reibverhaltens ist nicht gleichzusetzen mit der Minimierung des Reibbeiwertes. Der optimale Reibbeiwert wird durch die Reibzone am Umformteil bestimmt. Während beim Tiefziehen in der Ziehringrundung eine tiefer und in der Stempelrundung ein hoher Reib-

beiwert gefordert ist, muss zur Erzielung der maximalen Polhöhe beim Streckziehen der Reibbeiwert sowohl in der Ziehring- als auch der Stempelrundung möglichst klein sein.

Im Bezug auf die beiden Arten der Wechselwirkung gilt näherungsweise:

- *molekulare Wechselwirkungen induzieren kleine,*
- *mechanische Wechselwirkungen grosse*

Reibschubspannungen.

Die Grösse der Wechselwirkungen wird dabei massgeblich durch die Rauheit im Reibkontakt bestimmt.

Bei glatten Oberflächen treten, solange die Grenzschicht nicht versagt, in Verschieberichtung nur Spannungen als Folge molekularer Wechselwirkungen auf. In Bezug auf die Reibwirkung gilt dasselbe, wenn die Oberflächen von Werkzeug und Werkstück durch den Zwischenstoff vollständig voneinander getrennt werden, z. B. als Folge dicker Schmierfilme und Makroschmiertaschen [Witthüser 1980] oder hochviskoser Zwischenstoffe (Lack, Ziehfolie etc.). Die auftretenden Reibschubspannungen sind in diesem Fall klein und hängen von der Art der Grenzschicht wie auch der Zwischenstoffschicht ab. Das Reibverhalten wird somit durch die Geometrie und die Eigenschaften der Zwischenstoffschicht bestimmt. In diesem Fall hat die Rauheit keinen Einfluss auf das Reibverhalten.

Sind die Rauhtiefen in der Grössenordnung der Zwischenstoffschicht und ist der Zwischenstoff niedrigviskos, treten neben den Effekten an glatten Flächen zusätzlich Kontaktwechselwirkungen zwischen den Rauheiten von Werkzeug und Werkstück auf. Einzelne Rauheiten des Werkzeuges und des Werkstückes kollidieren, was zu Reibschubspannungen als Folge molekularer wie auch mechanischer Wechselwirkungen führt. Die Anzahl der direkten Kontaktflächen ist von der Welligkeit der beiden Gegenkörper abhängig. Ein Mass für die Häufigkeit der Kollisionen bildet z.B. der nach DIN-4762 genormte mittlere Spitzenabstand  $S_m$  der Rauheiten. Da die lokalen Kontaktflächen von Werkstück und Werkzeug sehr klein sind, entstehen an den Kontaktstellen hohe lokale Spannungsspitzen. Befindet sich dabei der Grundwerkstoff im plastischen Zustand, so genügen bereits kleinste Druckspannungen an Mikrokontaktflächen zur plastischen Deformation der Rauheiten. Diese Effekte führen, wie die REM-Aufnahmen zeigen, zur kontinuierlichen plastischen Deformation an den Kontaktflächen. Die Oberflächenmikrogeometrie wird laufend verändert. Die mechanischen Wechselwirkungen sind somit eine Folge des Reibzustandes, welcher sich aus der Rauheit der Kontaktpartner, aus der Schmierung und der Beanspruchung der Kontaktflächen im Reibkontakt

ableitet. Die Oberflächencharakteristik des Ausgangszustandes bleibt im Reibkontakt weitgehend erhalten. Die durch den Reibkontakt induzierten Oberflächenänderungen haben direkten Einfluss auf die Kennwerte der Werkstückrauheit. Durch die bei der Kollision induzierten Normal- und Schubspannungen werden die Rauheiten im allgemeinen geglättet, das heisst, die Oberfläche wird abgeflacht. Die Werkzeugoberfläche kann dabei näherungsweise als invariant betrachtet werden, da die Rauheit wegen ihrer Härte während eines Umformzyklus nicht verändert wird.

Entsprechend den mechanischen und molekularen Wechselwirkungen im Tribokontakt muss auch die Verformung des Umformteiles bei der Reibbeanspruchung berücksichtigt werden, da die plastische Verformung eine der wesentlichen Ursachen ist, die chemische Reaktionen bei äusseren und inneren Reibungsprozessen der Metalle auslösen [Mang 1983]. Die Zahl der Störstellen des Metallgitters steigt bei der Verformung stark an. Diese Störstellen sind durch freie Valenzkräfte chemisch besonders aktiv. Durch diese überschüssige freie Energie kann es, zu Bindungen mit anderen Stoffen kommen, die an normalen, sich nicht verformenden und tribomechanisch nicht beanspruchten Oberflächen nicht stattfinden. Kommt es z.B. zur Reaktion der Oberfläche mit Sauerstoff, so spricht man von Tribooxidation.

Als Folge der durch die Umformung erreichten plastischen Deformationen des Grundwerkstoffes sowie der durch die Normal- und Schubspannung induzierten Deformationen an den Kontaktflächen laufen immer chemische Reaktionen ab. Die durch den Zwischenstoff gebildeten, reibungs- und adhäsionsmindernden Grenzschichten müssen wegen den durch den Reibkontakt laufend zerstörten Oberflächenschichten und den durch die Deformation neu gebildeten Oberflächen kontinuierlich neu gebildet werden. Diese Neubildung der Grenzschicht kann wegen den dünnen, teilweise monomolekularen Zwischenstoffschichten nur erfolgen, wenn die Reaktionsfähigkeit dieser Zwischenstoffschicht während des gesamten Reibkontaktes der Mikrokontaktstellen erhalten bleibt, d. h. genügend reaktionsfähiger Zwischenstoff vorhanden ist und eine Benetzung der neugebildeten Oberflächen gewährleistet wird. Dies bedeutet, dass auch die veränderliche Reaktivität der Oberfläche bei der Oberflächenbeschreibung berücksichtigt werden muss.

### **2.3 Reibungsbezogene Oberflächenbeschreibung durch Kennwerte**

Zur Beschreibung des Reibverhaltens unterschiedlicher Oberflächen können auf Grund obiger Betrachtungen folgende Kennwerte für qualita-

tive und vergleichende Aussagen bei der Beurteilung von Tribosystemen und der Optimierung von Oberflächenstrukturen vorgeschlagen werden:

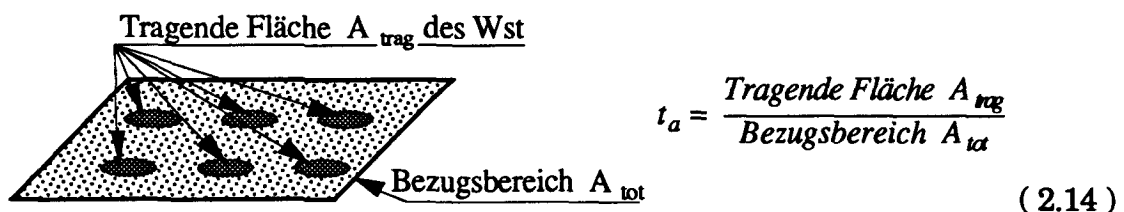
- *Flächentraganteil*
- *Benetzungsdurchmesser*
- *Wellenlänge*
- *Leervolumen*
- *Reiblänge*

Quantitative Aussagen werden erst möglich sein, wenn sowohl die mechanischen und molekularen Wechselwirkungen als auch die Mikrostrukturen exakt beschrieben werden können. Dies ist jedoch zur Zeit nicht der Fall. Darum sollen Oberflächen durch Vergleiche und die Vorgabe von Randbedingungen optimiert werden.

Der Rauheitstyp sowie die Grösse der Kennwerte werden durch den Herstellungsprozess der Bleche, das Walzen, bestimmt und können im Rahmen der technischen Herstellbarkeit variiert werden (Bearbeitung der Walzen durch Schleifen, Laserpulsen, Sandstrahlen, Erodieren etc.). Während des Umformprozesses sind diese Grössen jedoch nur von den Umformvariablen abhängig.

### 2.3.1 Flächentraganteil

Der *Flächentraganteil*  $t_a$  ist in Anlehnung an DIN-4765 das in Prozent ausgedrückte Verhältnis der beim Kontakt der Werkstückoberfläche mit der Werkzeuggegenfläche tragenden Fläche  $A_{\text{trag}}$  zur Bezugsfläche  $A_{\text{tot}}$ . An dieser Fläche tritt, abhängig von der lokalen Flächenpressung, Flüssigkeitsreibung, Grenzreibung oder Adhäsionsverschleiss auf.



**Bild 22:** Der Flächentraganteil  $t_a$  entspricht dem Anteil der metallischen tragenden Fläche in Bezug auf die Referenzfläche.

Bildet die Werkstückoberfläche keine Druckschmiertaschen aus, so wird bei ideal glattem Werkzeug die gesamte Normalkraft  $F_N$  durch die Mikrokontaktfläche  $A_{\text{trag}}$  aufgenommen. Für die maximal auftretende lokale

Flächenpressung gilt dann:

$$p_{local, max} = \frac{F_n}{A_{trag}} \quad (2.15)$$

Bildet die Oberfläche neben der tragenden Fläche  $A$  respektive  $A_{Trag}$  flächendeckend Druckschmiertaschen aus, so gilt für die gesamte Tribokontaktfläche  $A_{tot}$ :

$$A_{tot} = A_{zwst} + A_{trag} \quad (2.16)$$

Wird die Normalkraft gleichmässig auf der Tribokontaktfläche verteilt, so ist die minimale lokale Flächenpressung an den Mikrokontaktflächen:

$$p_{local, min} = \frac{F_n}{A_{tot}} \quad (2.17)$$

Diese Korrelation von  $A_{Zwst}$  und  $A_{Trag}$  gilt jedoch nur, wenn das Leervolumen der Rauigkeit vollständig durch Zwischenstoff ausgefüllt wird. Wegen der plastischen Deformation des gesamten Grundwerkstoffes und der damit zusammenhängenden Oberflächenvergrößerung sowie der Rauheitsänderung ist dies nicht immer gewährleistet. Die Abhängigkeit von Leervolumen, Rauhtiefe und Traganteil ist somit nicht allgemeingültig.

Aus dem Kennwert Flächentraganteil leiten sich folgende Betrachtungen ab:

- Der *Flächentraganteil* der Kontaktoberfläche ist ein Mass für die Höhe der lokalen Flächenpressung und damit die Beanspruchung der Zwischenstoff- resp. Grenzschicht. Bei der plastischen Deformation der Rauheitsspitzen ist die induzierte lokale Flächenpressung abhängig vom plastischen Verhalten des Grundwerkstoffes und der Charakteristik der Oberflächentopographie. Die Wirkung wie auch das Versagen der Zwischenstoffschicht hängt somit in hohem Masse vom Zwischenstoff (Viskosität, Grenzschichtbildung etc.) ab. Ist der Grundwerkstoff unterschiedlicher Reibpaarungen identisch, wird der Einfluss der unterschiedlichen chemischen Affinität der Grundwerkstoffe im Vergleich eliminiert, und die Abhängigkeit des Reibverhaltens reduziert sich auf die Oberflächencharakteristik.

Da der Grundwerkstoff in der betrachteten Reibzone im allgemeinen plastisch ist, genügen kleinste Druckspannungen, um die Konturen zu glätten, was REM-Aufnahmen bestätigen. Für das Reibverhalten ist somit

nicht die durch Formabweichungen entstandene Konturenfläche sondern die durch das Walzen und den Tribokontakt verfestigte, reale Kontaktfläche entscheidend.

Für das Reibverhalten, insbesondere das Versagen der Zwischenschicht, wie auch für das Verschleissverhalten ist der Flächentrageanteil, welcher durch die Summe der einzelnen Mikrokontaktflächen  $A_{r,i}$  gebildet wird, von entscheidender Bedeutung. Diese Grössen der einzelnen Mikrokontaktflächen hängen von der Oberflächentopographie, den Werkstoffkenngrössen der Reibpartner (unter Beachtung des Grenzschichtaufbaus) sowie von der lokalen Flächenpressung  $\sigma_{n,lokal}$  und bei Gleitbeanspruchung von der Reibschubspannung  $\tau_{lokal}$  ab.

Bei der Misch- wie auch der Festkörperreibung erfolgt der Kontakt der Reibpartner nur an diskreten Stellen, den realen *Kontaktflächen*  $A_r$ . Bei der Beschreibung der Kontaktflächen wird zwischen der *nominellen Kontaktfläche*  $A_a$  und der *realen Kontaktfläche*  $A_r$ , der Summe aller Mikrokontaktflächen, unterschieden. Die Berührungsbereiche, welche als Folge der Grobgestaltabweichung und der Welligkeit (nach DIN-4760 gilt: Wellenabstände:Tiefe = 100:1 bis 1000:1) gebildet werden, heissen *Konturflächen*  $A_c$ . Unter normalen Kontaktbedingungen ist die reale Kontaktfläche  $A_r$ , verglichen mit der nominellen Fläche, extrem klein (einige Prozent von  $A_a$ ).

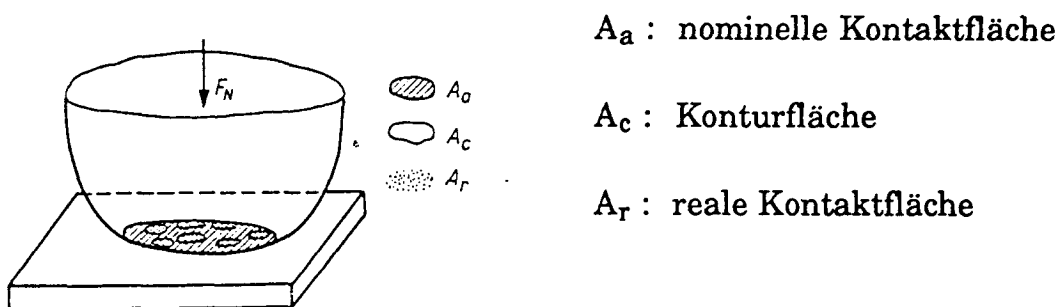


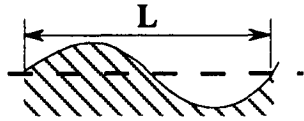
Bild 23: Veranschaulichung der drei Arten von Berührungsflächen

Die Art, Form und Grösse der Tribokontaktfläche ist zudem stark von der Wellenlänge respektive dem Wellenlängenverhältnis und den Rauheiten von Werkzeug und Werkstück abhängig. Dieses Wellenlängenverhältnis ist in Kombination mit der Rauhtiefe ein Mass für die Anzahl und Grösse der Mikrokontaktflächen im Reibkontakt.



### 2.3.2 Wellenverhältnis in Bewegungsrichtung

Das *Wellenverhältnis in Bewegungsrichtung*  $\lambda_\alpha$  entspricht dem Verhältnis der Wellenlänge der Rauheiten im Reibkontakt von Werkzeug und Werkstück. Massgebend ist dabei der Wert in Bewegungsrichtung.



$$\lambda_\alpha = \frac{L_{Wst}}{L_{Wz}} \quad (2.18)$$

**Bild 24:** Das Wellenverhältnis  $\lambda_\alpha$

Näherungsweise gilt dies auch für den in DIN-4762 beschriebenen mittleren Abstand der Profilunregelmässigkeiten  $S_m$ . Aus dem Kennwert leiten sich folgende Betrachtungen ab:

- Ist die Oberfläche rillig und das Wellenverhältnis der Rillen von Werkzeug und Werkstück  $\approx 1$ , so führt dies zu einer grossen Anzahl von direkten mechanischen Reibkontakten und ist somit ungünstig für das Reib- sowie das Adhäsionsverhalten der Oberfläche.

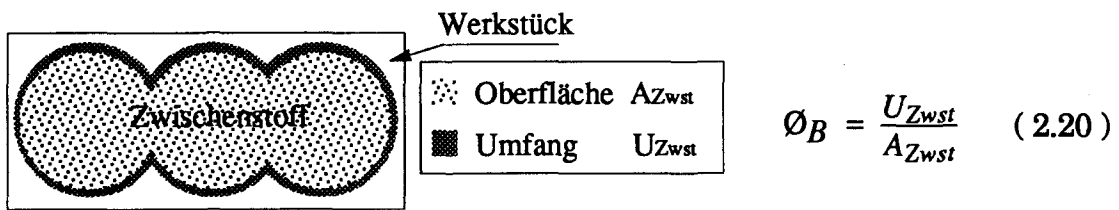
Das Wellenverhältnis hat einen direkten Einfluss auf das Reib- und das Adhäsionsverhalten der Tribopaarung. Ist  $\lambda_\alpha = 1$ , so kommt es, wie Versuche bestätigen, zu starkem Adhäsionsverschleiss als Folge des "Ineingreifens" der Kontaktflächen und damit zu einem starken Anstieg der Reibkräfte. Ist  $\lambda_\alpha \gg 1$ , so entstehen in Folge der Welligkeit der Oberflächen grössere Makrokontaktbereiche.

$$\mu_{Adh} = f(\lambda_\alpha, \dots) \quad \lambda_\alpha = 1 \text{ ; Ungünstig (Adhäsion)} \quad (2.19)$$

Bei Oberflächen, welche ein zusammenhängendes Hochplateau aufweisen, kann keine eigentliche Wellenlänge angegeben werden, denn die Grösse streut je nach Messort und -richtung zwischen einem Minimalwert  $\lambda_{min}$  und dem Maximalwert  $\lambda_{max} = \infty$ .

### 2.3.3 Reziproker Benetzungsdurchmesser

Der *Reziproke Benetzungsdurchmesser*  $\varnothing_B$  stellt das Verhältnis zwischen der Umfanglänge der Schmierstofftaschen zu ihrer Fläche dar. Entsprechend dem hydraulischen Durchmesser  $\varnothing_H$  gilt  $\varnothing_B = U/4A$ . Der reziproke Benetzungsdurchmesser  $\varnothing_B$  bildet ein Mass für die Form und zusammen mit dem Flächentraganteil ein Mass für die örtliche Verteilung der Schmierstofftaschen beim Kontakt zweier Reibflächen.



**Bild 25:** Der reziproke Benetzungsdurchmesser  $\varnothing_B$

Aus dem Kennwert *reziproker Benetzungsdurchmesser* leiten sich folgende Betrachtungen ab:

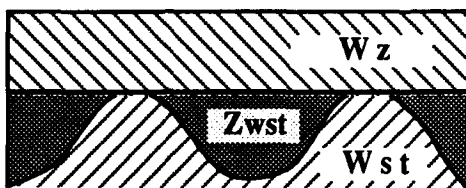
- Der *reziproke Benetzungsdurchmesser* bildet das Mass für die Erneuerung des Zwischenstoffes in der Reibfläche. Er wird als Quotient aus der Summe der tragenden Reibflächen und der Summe der entsprechenden Flächenumfänge einer Einheitsfläche gebildet. Ein grosser reziproker Benetzungsdurchmesser bedeutet, dass der Zwischenstoff gut in die Reibzone eingebracht werden kann.

#### 2.3.4 Leervolumen

Das *Leervolumen*  $X_V$  wird von Wollrab [1987] als der nicht durch die Rauheiten ausgefüllte Leerraum definiert. Dieser ist begrenzt durch die die Rauhtiefenextreme begrenzenden Hüllflächen parallel zur Mittenrauhebene.

Das *Leervolumen*  $X_V$  entspricht der von der Blechoberfläche im Kontakt mit einem ideal ebenen Werkzeug maximal speicherbaren Zwischenstoffmenge. Wird die Oberfläche während des Prozesses verändert, so entspricht das *Relative Leervolumen*  $\Delta X_{V_r}$  der Veränderung dieses Speichervolumens im betrachteten Bereich. In einer 1988 vom Autor veröffentlichten Arbeit konnte gezeigt werden, dass der Reibbeiwert für Stahl St1405 von diesem Kennwert abhängig ist.

$$\Delta \bar{V}_r = \frac{V_r - V_{r_0}}{V_{r_0}} \quad (2.21)$$



$$V_r = \iint (r_a^{i0} - r_a^{wpc}) df \quad (2.22)$$

**Bild 26:** Das Leervolumen  $X_V$

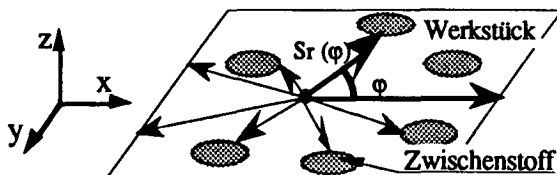
Aus dem Kennwert Leervolumen leiten sich folgende Betrachtungen ab:

- Das Leervolumen der Oberfläche ist somit ein Mass für das maximale Zwischenstoffaufnahmevermögen, das Nachschmiervermögen der Mikroreibflächen und der damit zusammenhängenden Oberflächenänderung. Die Grenzen der Deformation der Rauheiten hängt vom plastischen Verhalten des Grundwerkstoffes, der Geometrie der Rauheiten sowie dem Anteil der durch die Schmiertaschen aufgenommenen Normalspannungen ab.
- Das durch die Rauheitsdeformation induzierte *relative Leervolumen* ermöglicht eine Aussage über die mechanischen Wechselwirkungen in Form der plastischen Deformation der Rauheit sowie der molekularen Wechselwirkungen durch das im Leerraum gespeicherte chemische Potential in Form von unverbrauchtem Zwischenstoff. Dieses gespeicherte Potential ist vor allem in einer längeren Reibzone, z. B. unter dem Niederhalter, und beim Streckziehen in der Stempelrundung wichtig. Durch die Deformation des Grundwerkstoffes und der Rauheit wird das Zwischenstoffvolumen während des Umformprozesses laufend verändert.

$$\Delta XV_r = \iint (r_a^{Wst}(\underline{x}) - r_a^{Wz}(\underline{x})) df \quad \Delta XV_r = 0 ; \text{ Ungünstig (Adhäsion)} \quad (2.23)$$

### 2.3.5 Ungeschmierte Reiblänge

Die *ungeschmierte Reiblänge*  $S_r$  entspricht der Weglänge  $\bar{l}_\varphi$ , die ein Werkstückoberflächenelement in (geschmiertem) Kontakt mit der Werkzeugoberfläche zurücklegt, ohne dass die Zwischenstoffschicht durch Zwischenstoff aus einer Schmiertasche (Leervolumen) erneuert werden kann. Bei der *mittleren ungeschmierten Reiblänge*  $\bar{S}_R$  werden die an einer Tragfläche möglichen Kontakwege auf eine Kreisfläche bezogen. Es gilt:



$$\Pi \bar{S}_R^2 = \oint S_r^2(\varphi) d\varphi \quad (2.24)$$

**Bild 27:** Mittlere ungeschmierte Reiblänge  $\bar{S}_R$

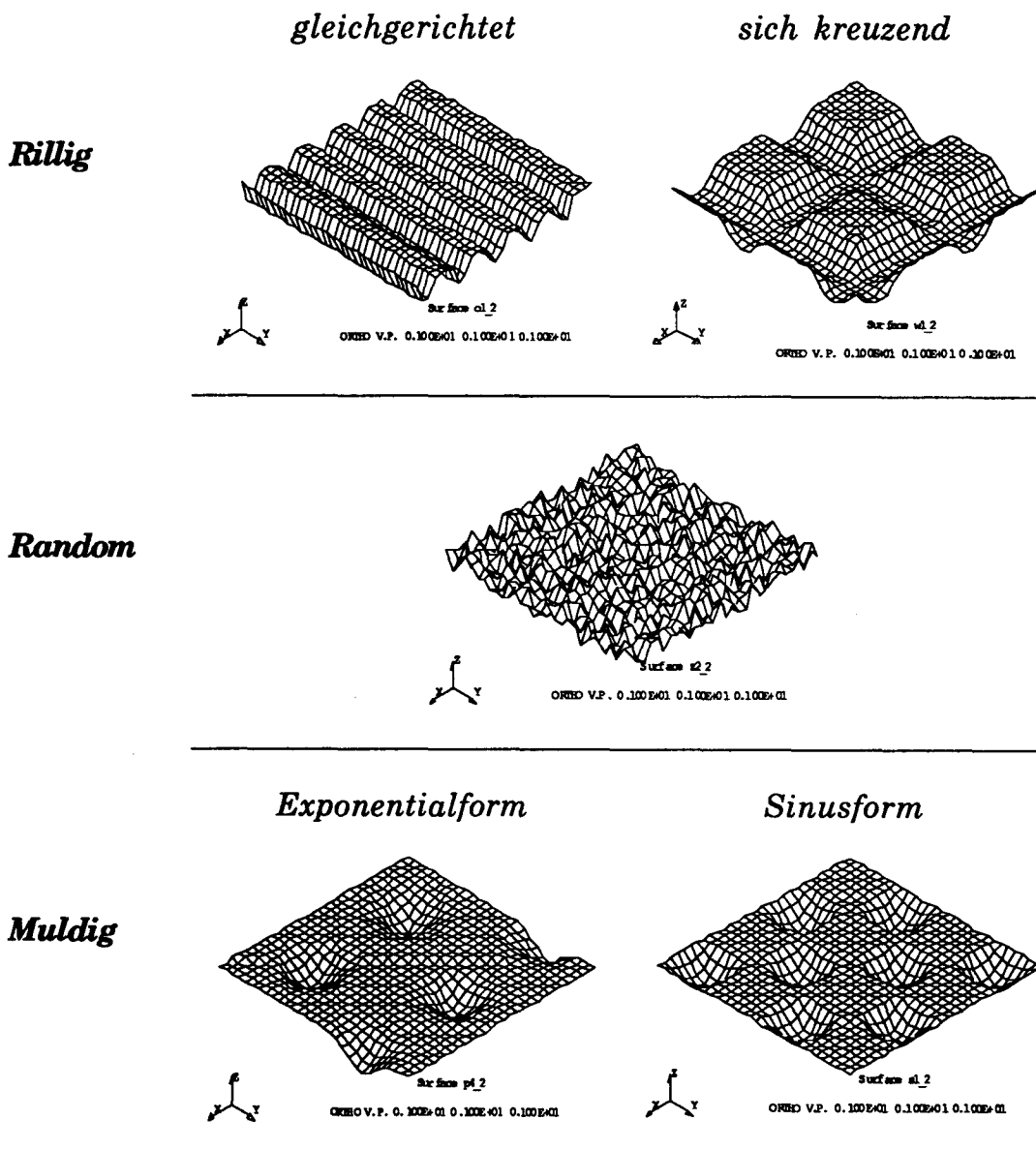
Aus dem Kennwert Reiblänge leiten sich folgende Betrachtungen ab:

- Eine optimale Schmierung bedingt, dass der Verschiebeweg einer Mikrokontaktstelle von Werkstück und Werkzeug, ohne die Zufuhr von unverbrauchtem Zwischenstoff aus einer Schmiertasche, die Bildung neuer Grenzschichten gewährleisten muss. Das bedeutet, dass die *Maximale Reiblänge* aller möglichen Verschieberichtungen diesen Verschiebeweg nicht überschreiten darf, da sonst Schmierstoffversagen auftritt. Je kürzer die maximale Reiblänge ist, desto geringer ist die Gefahr des Versagens der Zwischenstoffschicht als Folge der verminderten Reaktionsfähigkeit des Zwischenstoffes. Die maximal zulässige Reiblänge hängt von der Reaktivität des Gegenkörpers, von der Reaktivität der auftretenden Deformationen, d. h. der freien Valenzen und der neu gebildeten Oberflächen und damit der Oberflächenstruktur, sowie von den Eigenschaften des Grundwerkstoffes ab.

### 3 Kennwertverhalten unterschiedlicher Oberflächentypen

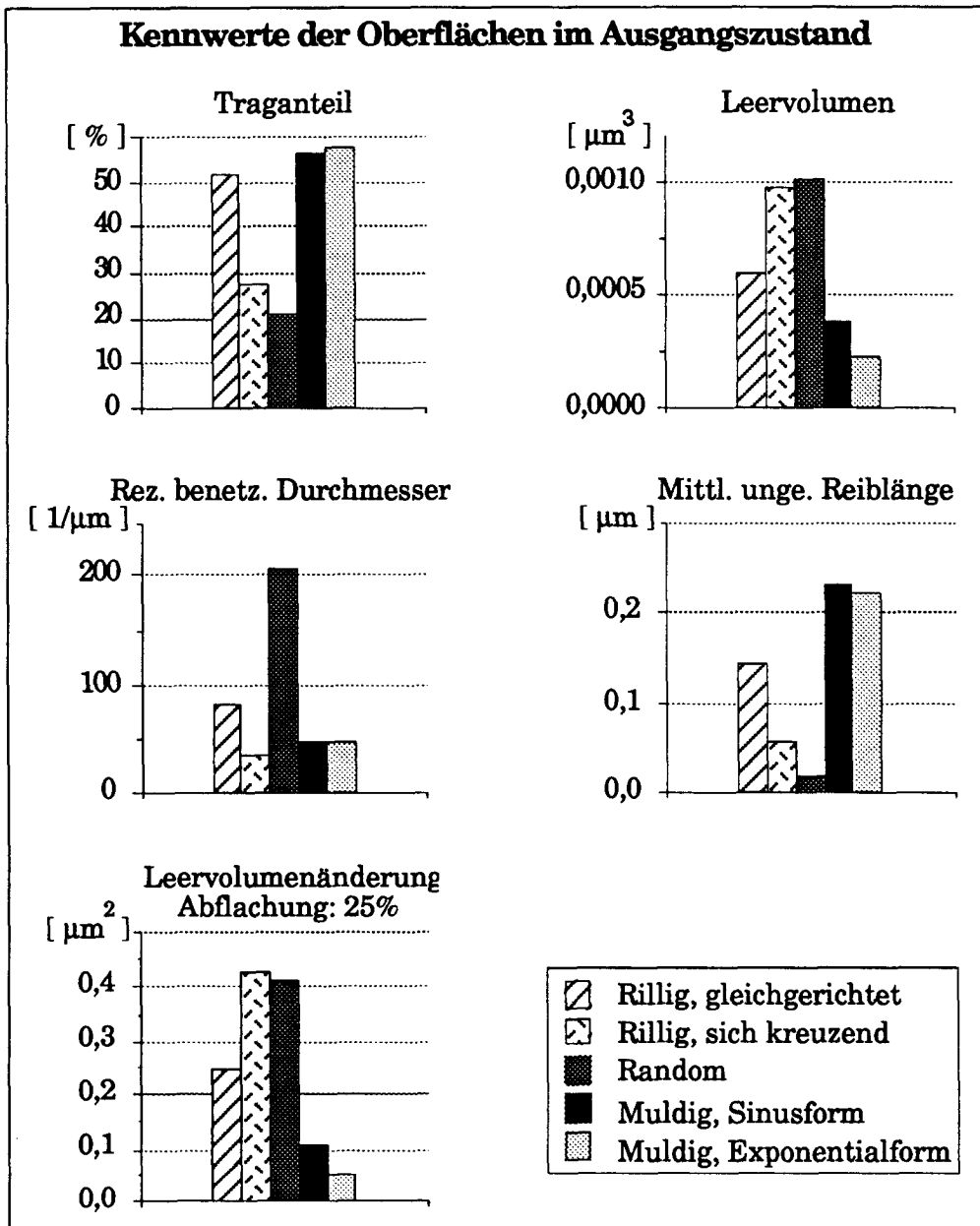
#### 3.1 Kennwerte der Ausgangsoberflächen

Die Diskretisierung der Rauheit ermöglicht die Bestimmung der im vorhergehenden Kapitel definierten dreidimensionalen Kennwerte und damit erste Aussagen über ein mögliches Verhalten im Reibkontakt. Als Grundlage der berechneten Kennwerte dienen die von den realen, in den Reibersuchen verwendeten Blechoberflächen abgeleiteten und im folgenden Bild dargestellten Rauheitsstrukturen.



**Bild 28:** Ausschnitte aus den simulierten realen Ausgangsoberflächen, deren Kennwerte untersucht werden. Einheitliche Rauhtiefe von 2 µm

Die unterschiedlichen Kennwerte der verschiedenen Ausgangsoberflächen sind in Bild 29 dargestellt.



**Bild 29:** Kennwerte der Ausgangsoberflächen werden auf die Einheitsfläche bezogen, Rauhtiefe  $2 \mu\text{m}$ , Referenzlayer bei 95 % der Rauhtiefe.

Die Bilder zeigen deutlich die markanten Kennwertunterschiede der einzelnen Oberflächentypen. Der Flächentraganteil der "rillig sich kreuzenden" und der "random"- Oberfläche ist deutlich kleiner als derjenige der anderen Oberflächen. Die "random"- Oberfläche weist zudem gegenüber den anderen Oberflächen einen sehr grossen reziproken hydraulischen Durchmesser bei einer kleinen mittleren Reiblänge auf. Entsprechend dem vom kleinen Flächentraganteil abhängigen grossen Leervolumen ist

auch die Leervolumenänderung der "rillig gleichgerichteten" und der "random"- Oberfläche deutlich grösser als bei den anderen Rauheiten. Entsprechen die im Bild 29 gezeigten Kennwerte dem Zustand der "undeformierten" Oberfläche, so ist für das Reibverhalten zusätzlich ihre Änderung mit zunehmender Abflachung zu untersuchen. Dies ist wichtig, da im realen Prozess

- *die Rauheit durch die Deformation des Grundwerkstoffes während der Umformung laufend verändert wird. Tritt kein Kontakt von Werkzeug und Werkstück auf, so gilt:*

$$r_a(\underline{x}, t) = f(\text{Ausgangszustand}, \varepsilon_{ij}) \quad (3.1)$$

Tritt jedoch Kontakt von Werkzeug und Werkstück auf, so treten während der Umformung Reibschubspannungen als Folge der Relativbewegung auf. Während der Umformung muss daher die sich

- *im Reibkontakt verändernde Rauheit als Folge der Normal- und Schubspannungen sowie der Deformation des Grundwerkstoffes berücksichtigt werden. Daraus folgt:*

$$r_a(\underline{x}, t) = f(\text{Ausgangszustand}, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}) \quad (3.2)$$

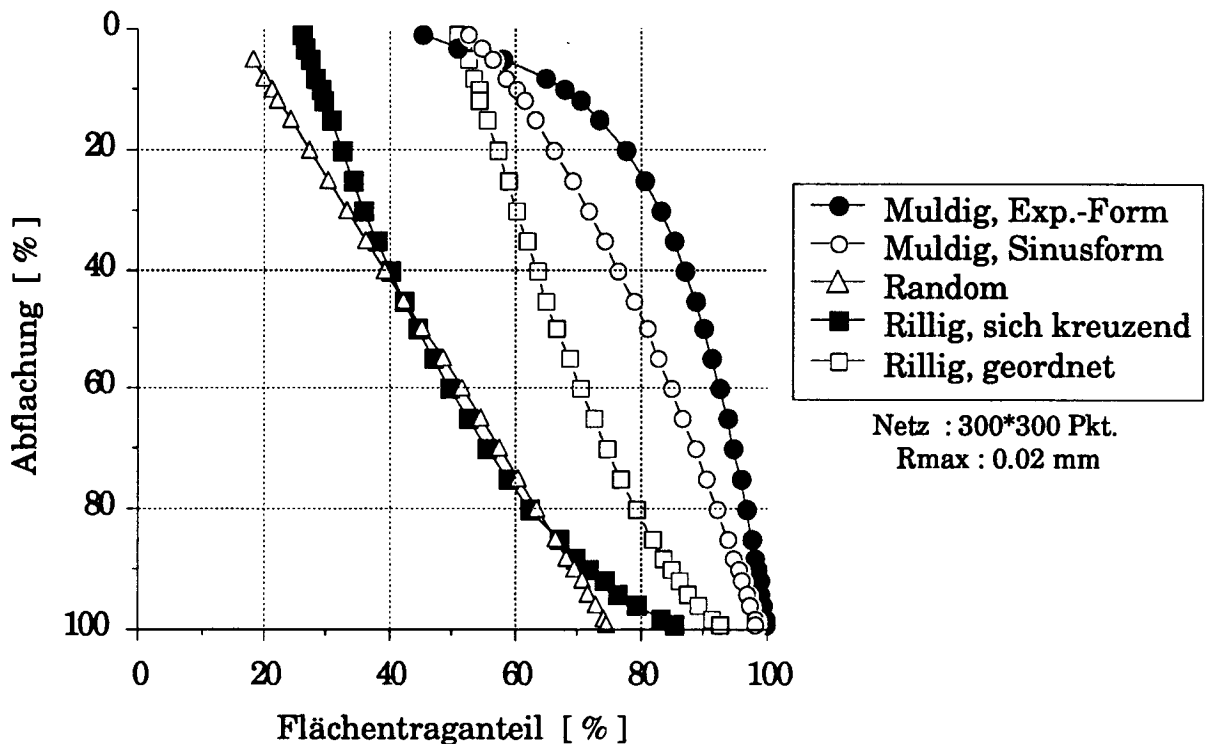
Die dynamische Änderung der Kennwerte für die betrachteten Oberflächen gehen aus den folgenden Diagrammen hervor, wo die Kennwertänderung in Abhängigkeit der Abflachung betrachtet wird.

### 3.2 Kennwertänderung bei der Abflachung

Die folgenden Bilder zeigen die Veränderung der Oberfläche während der plastischen Umformung. Aus experimentellen Untersuchungen ist bekannt, dass neben der Ausgangsoberfläche auch die zeitliche Änderung sich auf das Reibverhalten auswirkt. Die exakte Ermittlung der sich während der Umformung verändernden Oberflächenmikrogeometrie ist, wie bereits beschrieben, wegen den bei der freien und der gebundenen Umformung ablaufenden Mechanismen zur Zeit nicht möglich.

Um trotzdem Anhaltspunkte über die Kennwertänderung im Reibkontakt zu ermitteln, besteht die Möglichkeit, die Kennwerte in verschiedenen Schnittebenen in Tiefenrichtung zu ermitteln. Die resultierenden Kennwertkurven lassen näherungsweise Aussagen zu über die Kennwertänderung bei der Abflachung der Rauigkeit, wie sie bei der Mischreibung auftritt. Durch die Abflachung werden die Oberflächencharakteristiken nicht verändert.

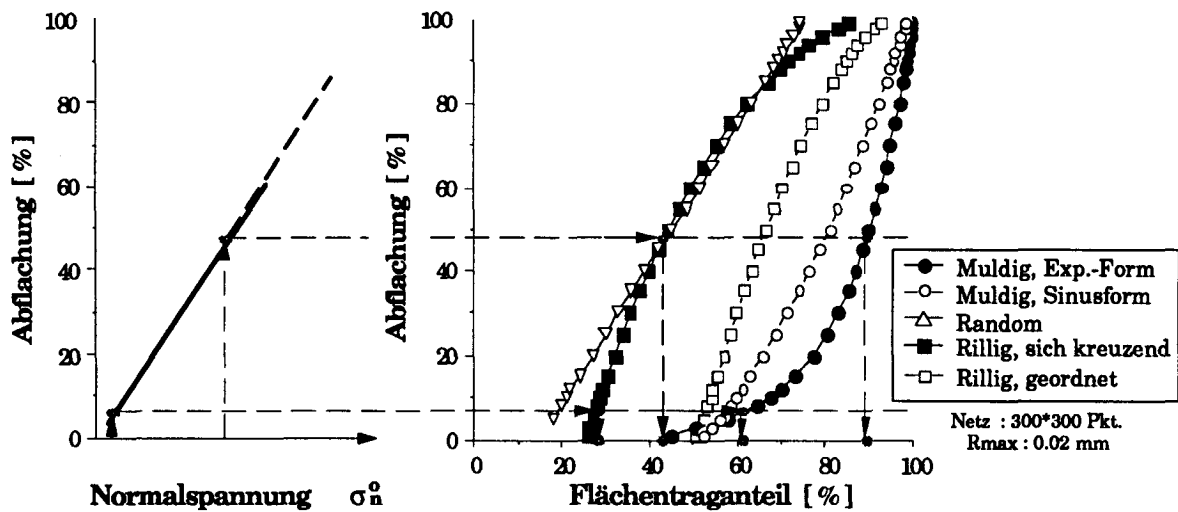
### 3.2.1 Flächentrageanteil



**Bild 29:** Flächentrageanteil  $t_a$  in Abhängigkeit der Abflachung aller Oberflächencharakteristiken mit derselben maximalen Rauhtiefe

Obiges Bild zeigt den von der Oberflächenstruktur und ihrer Abflachung abhängigen Kennwertverlauf. Speziell die "muldigen" Oberflächen verdeutlichen, wie relativ die Aussage eines einzelnen Oberflächenkennwertes in Bezug zur Rauhtiefe ist. Der Flächentrageanteil nimmt bei diesem Oberflächentyp, im Gegensatz zu den rilligen Oberflächen, mit zunehmender Abflachung überproportional zu. Die Abflachung der Rauheit hängt von der Normalspannung, dem elastischen oder plastischen Zustand des Grundwerkstoffes sowie den Eigenschaften des Zwischenstoffes ab. Wird das Blech nicht deformiert, so ist, wie zum Beispiel *Dannemann* [1980] zeigt, die Abflachung linear von der Normalspannung abhängig.





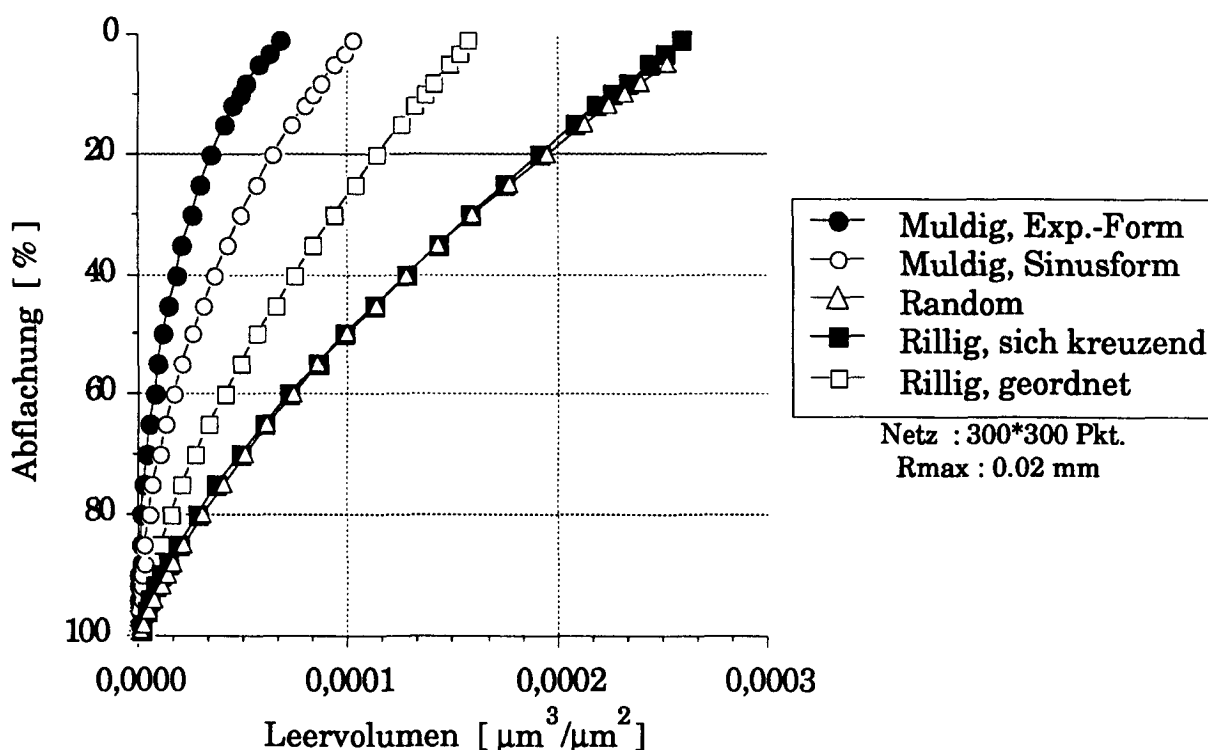
**Bild 30:** Schematische Darstellung der Abhängigkeit von Normalspannung, Flächentrageanteil und Abflachung der unterschiedlichen Oberflächen mit gleicher Rauhtiefe

Diese lineare Abhängigkeit führt zu der aus Bild 30 ersichtlichen oberflächenabhängigen Änderung des Flächentrageanteiles. Werden die äusseren Normalkräfte vollständig auf die Mikrokontakflächen übertragen, so folgt, dass "rillige" Oberflächen im Tribokontakt eine stärkere Abflachung erleiden als muldige. Dieser Effekt wird durch die Form der Vertiefungen verstärkt. "Muldige" Oberflächen können hydrostatische Drucktaschen aufbauen, während bei "rilligen" Oberflächen lediglich hydrodynamische Effekte die Normalspannung auf die Mikrokontakflächen mindern. Die "random"- Oberfläche mit den statistisch verteilten Rauheiten zeigt eine lineare Abhängigkeit des Flächentrageanteiles von der Profiltiefe im ganzen Bereich.

Generell gilt, dass Oberflächen mit kleineren Flächentrageanteilen ein grösseres Einebnungspotential besitzen. Das heisst, zur Deformation der Rauigkeit ist weniger Energie notwendig, was die Aktivierung des im Leervolumen gespeicherten Zwischenstoffes vereinfacht. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn nicht das ganze Leervolumen durch Zwischenstoff ausgefüllt ist.

### 3.2.2 Leervolumen

Bei den folgenden Kurven wird davon ausgegangen, dass das Leervolumen vollständig durch den Zwischenstoff ausgefüllt ist. Dies führt, wie bereits bei der Definition des Leervolumens beschrieben, zum umgekehrt proportionalen Verhalten als bei den Trageanteilkurven.



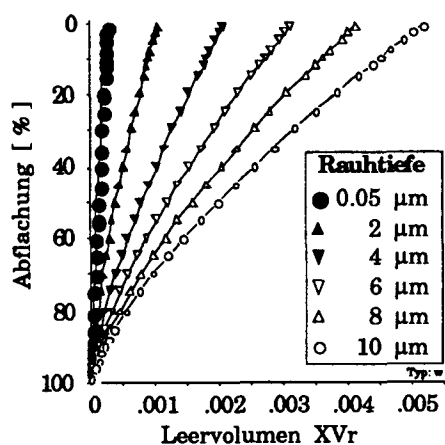
**Bild 31:** Leervolumen  $XV_r$  in Abhängigkeit der Abflachung aller Oberflächencharakteristiken mit derselben maximalen Rauhtiefe

Die Oberflächen mit dem kleinsten Traganteil erzielen bei gleicher Rauhtiefe das grösste Leervolumen. Diese Rauheiten besitzen neben ihrem besseren Einebnungsvermögen somit grössere Zwischenstoffreserven zur Benetzung neugebildeter Oberflächenschichten sowie zur Erneuerung verbrauchter Zwischenstoffschichten im Bereich der ungeschmierten Reiblängen. Die Änderung des Leervolumens hängt im weiteren von der Geometrie der Rauheitsflanken, vor allem vom Steigungswinkel relativ zur Mittelebene ab. Es ist somit zu erwarten, dass "random"- wie auch "rillige" Oberflächen den im Leervolumen gespeicherten Zwischenstoff besser nutzen könne als "muldige" Oberflächen. Es gilt:

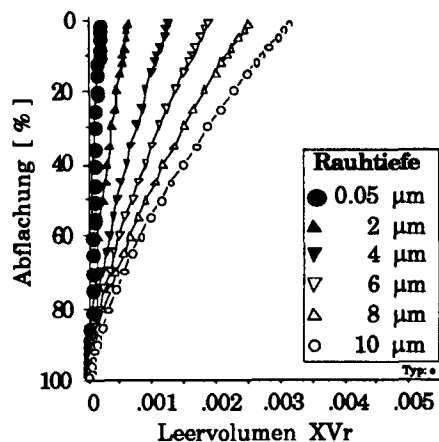
- Ein grosses Leervolumen sowie eine starke Leervolumenabnahme bei Abflachung ist günstig, da ein grosses Leervolumen die Speicherung des reaktiven Zwischenstoffes begünstigt und die Leervolumenabnahme die Neubenetzung der Mikrokontaktflächen in der Tribokontaktzone ermöglicht.

Die Variation der maximalen Rauhtiefe  $r_{max}$  hat bezüglich der Abflachung nur Einfluss auf das Leervolumen. Die folgenden Bilder zeigen diese Leervolumenänderung bei der Variation der Rauhtiefe der verschiedenen Oberflächentypen.

### Rillige Oberflächen

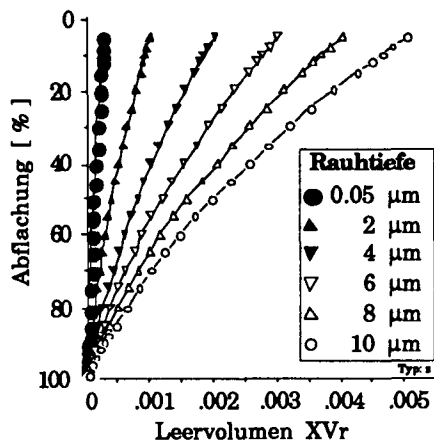


rillig sich kreuzend



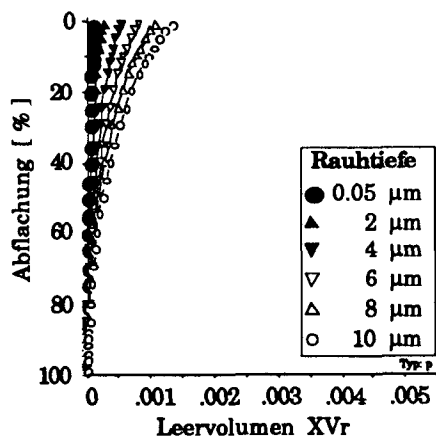
rillig gleichgerichtet

### Random Oberfläche

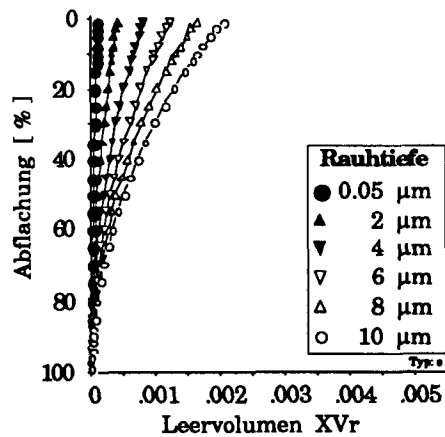


zufällig verteilt, isotrop

### Muldige Oberflächen



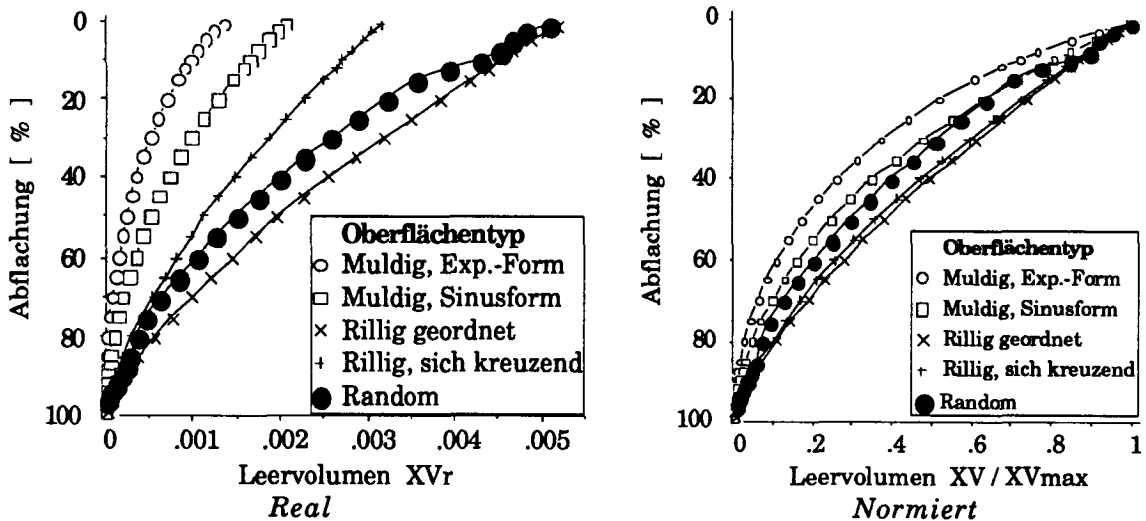
exponentielle Form



Sinusform

Bild 32 bis 36: Änderung des Leervolumens rilliger, einer isotropen und muldiger Oberflächen in Abhängigkeit der Abflachung

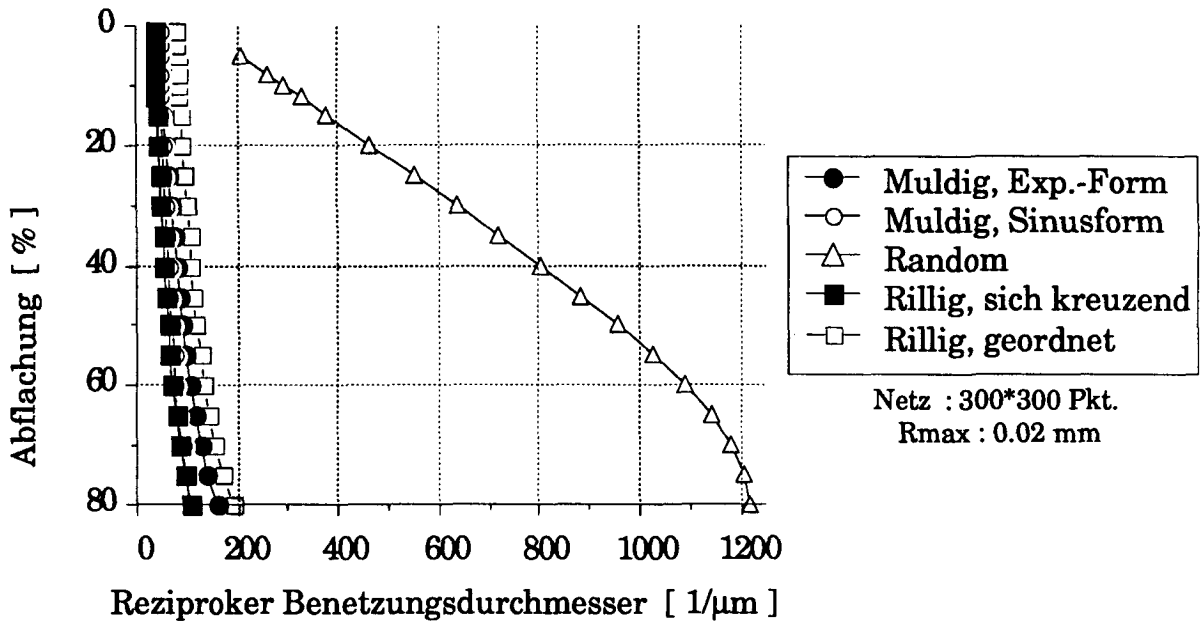
Die muldigen Oberflächen weisen auf Grund ihrer Struktur ein kleineres Leervolumen auf als die "random"- sowie die rilligen Oberflächen. Diese Tatsache korreliert mit dem entsprechend grösseren Traganteil der muldigen Oberflächentypen. Die von der Charakteristik abhängigen Kennwertverläufe werden in der folgenden normierten Darstellung deutlich.



**Bild 37,38:** Änderung des Leervolumens in Abhängigkeit der Abflachung für verschiedene Oberflächentypen

Die Bilder zeigen, dass bei gleichem Leervolumen der Ausgangsoberfläche das Leervolumen der muldigen Oberflächen bei der Abflachung der Rauheit am schnellsten aufgebraucht wird, während die rilligen Oberflächen diesbezüglich das beste Verhalten zeigen. Auf Grund ihrer Struktur ist das Zwischenstoffaufnahmevermögen der muldigen Oberflächen jedoch begrenzt und erreicht normalerweise dasjenige der rilligen Oberflächen nicht. Die rilligen Oberflächen haben daher zusammen mit der random-Oberfläche real die besten Voraussetzungen bezüglich des Nachschmiervermögens.

### 3.2.3 Reziproker Benetzungsdurchmesser



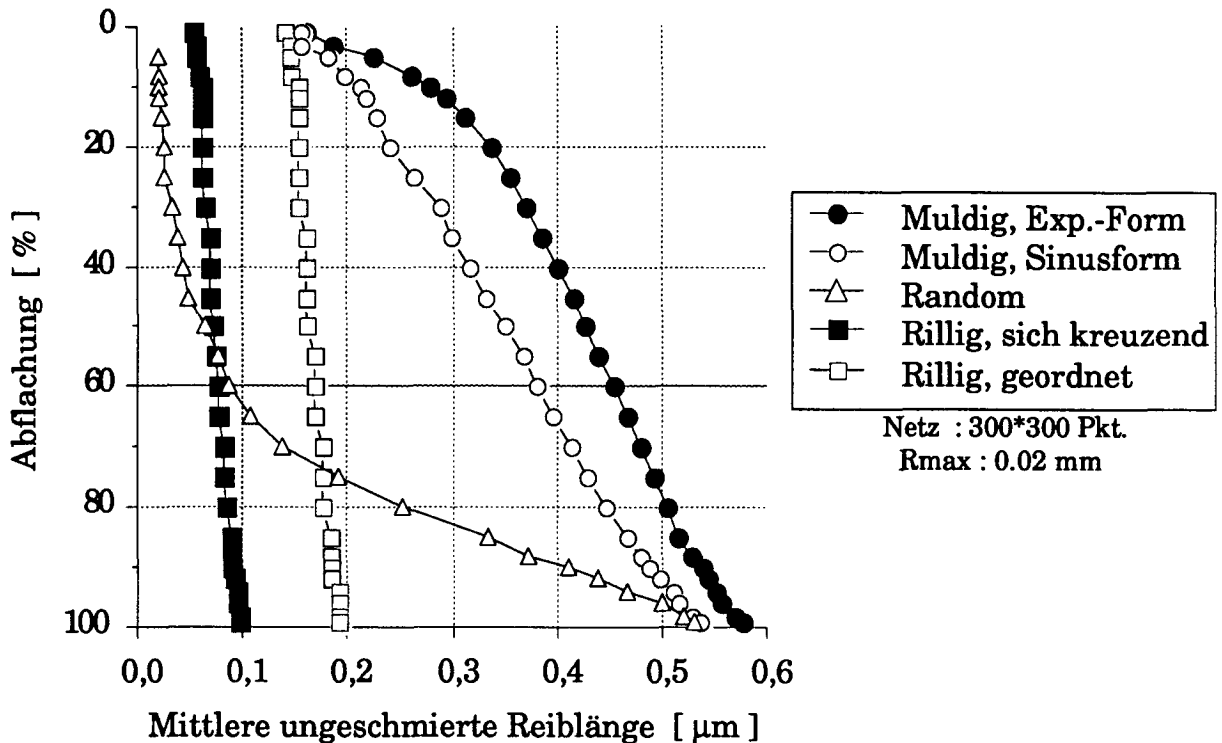
**Bild 39:** Reziproker Benetzungsdurchmesser  $\varnothing_B$  in Abhängigkeit der Abflachung aller Oberflächencharakteristiken mit derselben maximalen Rauhtiefe

Im obigen Bild weicht der Kennwertverlauf der "random"- Oberfläche deutlich von demjenigen anderen Rauheiten ab. Der Kurvenverlauf ergibt sich aus der Tatsache, dass bei der "random"- Oberfläche keine einheitliche Höhe der Rauheitsspitzen existiert. Die Rauheitsspitzen sind neben der Ebenenrichtung auch in Tiefenrichtung statistisch verteilt. Jede neue Rauheitsspitze, welche durch die Schnittebene tangiert wird, hat einen sehr grossen reziproken Benetzungsdurchmesser  $\varnothing_B$ .

Dies führt dazu, dass mit zunehmender Belastung der Oberfläche nicht nur der Flächentraganteil, sondern auch die Anzahl der Kontaktflächen steigt. Dies hat zur Folge, dass die Grösse der einzelnen Kontaktfläche annähernd gleich bleibt, während die Summe der Kontaktflächen durch die gesteigerte Anzahl deutlich ansteigt. Dieser Umstand ergibt einen deutlich grösseren, sprich optimaleren reziproken Benetzungsdurchmesser, was einem verbesserten chemischen Reaktionspotential des Zwischenstoffes an den Mikrokontaktflächen entspricht. Mit zunehmender Abflachung sinkt die Zahl der isolierten Mikrokontaktflächen, was zur Abnahme des reziproken Benetzungsdurchmessers führt.

Demgegenüber ist das Verhalten der richtungsabhängigen Oberflächenstrukturen gegenläufig. Die Anzahl der Kontaktflächen bleibt bei diesen konstant, einzig das Flächen-Umfangsverhältnis wird durch die Abflachung verändert.

### 3.2.4 Ungeschmierte Reiblänge



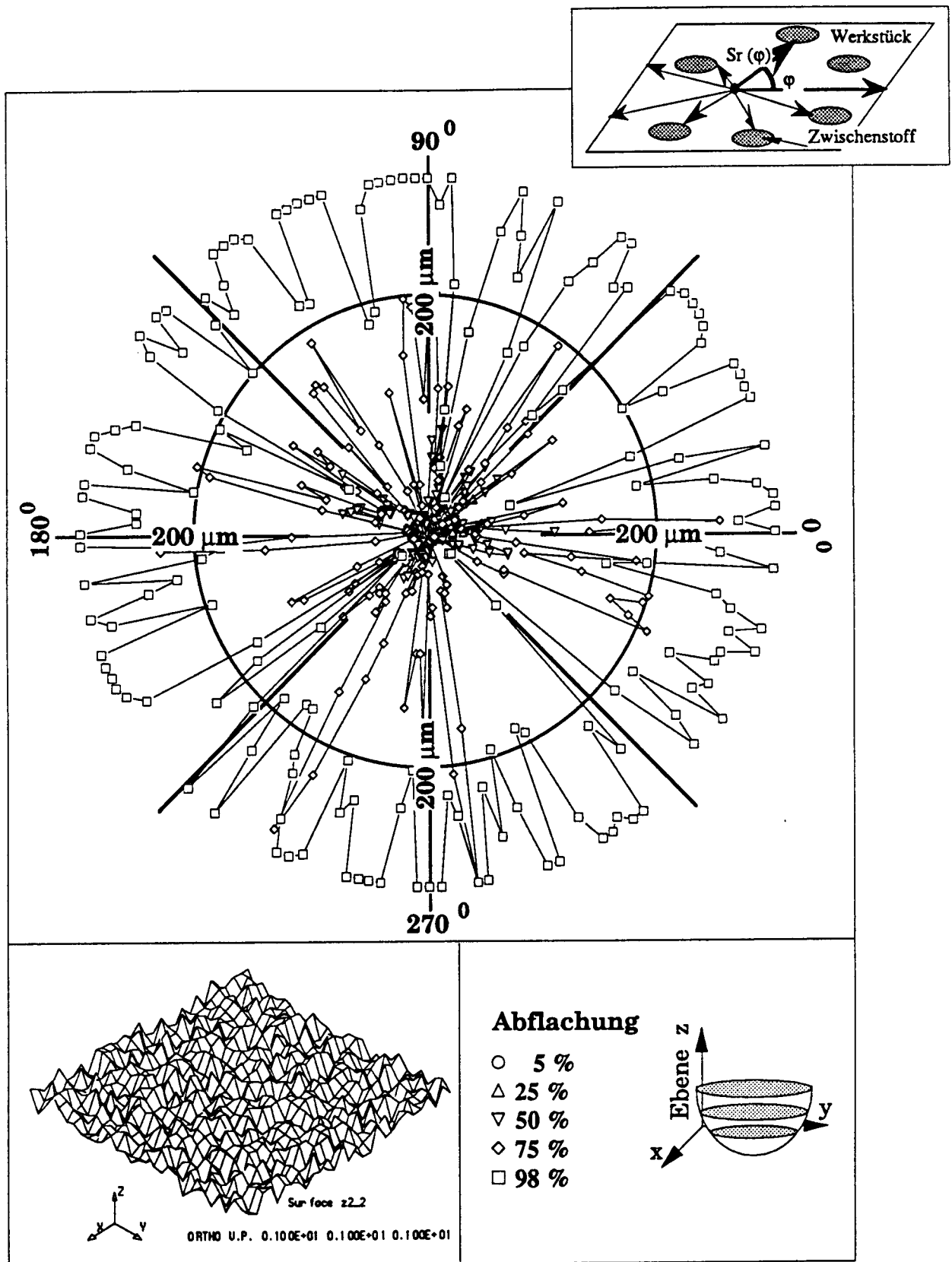
**Bild 40:** Mittlere ungeschmierte Reiblänge  $S_R$  in Abhängigkeit der Abflachung aller Oberflächencharakteristiken mit derselben maximalen Rauhtiefe

Der Verlauf der Reiblängenänderung bei zunehmender Abflachung hängt in hohem Masse von der Form der Vertiefungen und der Mikrokontaktflächen sowie, damit gekoppelt, der Grösse der durch die Abflachung zusammengeführten Bereiche ab. Diese Abhängigkeit wird vor allem bei den muldigen Oberflächen deutlich, wo beide Oberflächen den nahezu gleichen Ausgangswert besitzen. Die Kennwertverläufe unterscheiden sich mit zunehmender Abflachung deutlich. Bei den rilligen Oberflächen wird die mittlere ungeschmierte Reiblänge auch bei extremster Abflachung kaum verändert. Ihre mittlere ungeschmierte Reiblänge liegt, bedingt durch die begrenzende rillige Struktur, im allgemeinen tiefer als bei den muldigen Oberflächen. Die isotrope Oberfläche erreicht durch ihre zufällig verteilten Rauheitsspitzen ein differenzierteres Verhalten. Im Ausgangszustand erreicht sie, wegen ihrem unterschiedlichen Rauheitsniveau, die kleinste mittlere ungeschmierte Reiblänge aller Oberflächentypen. Mit zunehmender Abflachung nimmt die mittlere ungeschmierte Reiblänge wegen den zusammenwachsenden Mikrotragflächen jedoch überproportional zu und erreicht die Maximalwerte der muldigen Oberflächen.

Aussagekräftiger als die gemittelte maximale Reiblänge  $\bar{S}_R$  ist die Grösse der ungeschmierten Reiblänge in Verschieberichtungen relativ zur Textur. Da Tiefziehteile im allgemeinen rund sind, entspricht der zu betrachtende Bereich  $360^\circ$ .

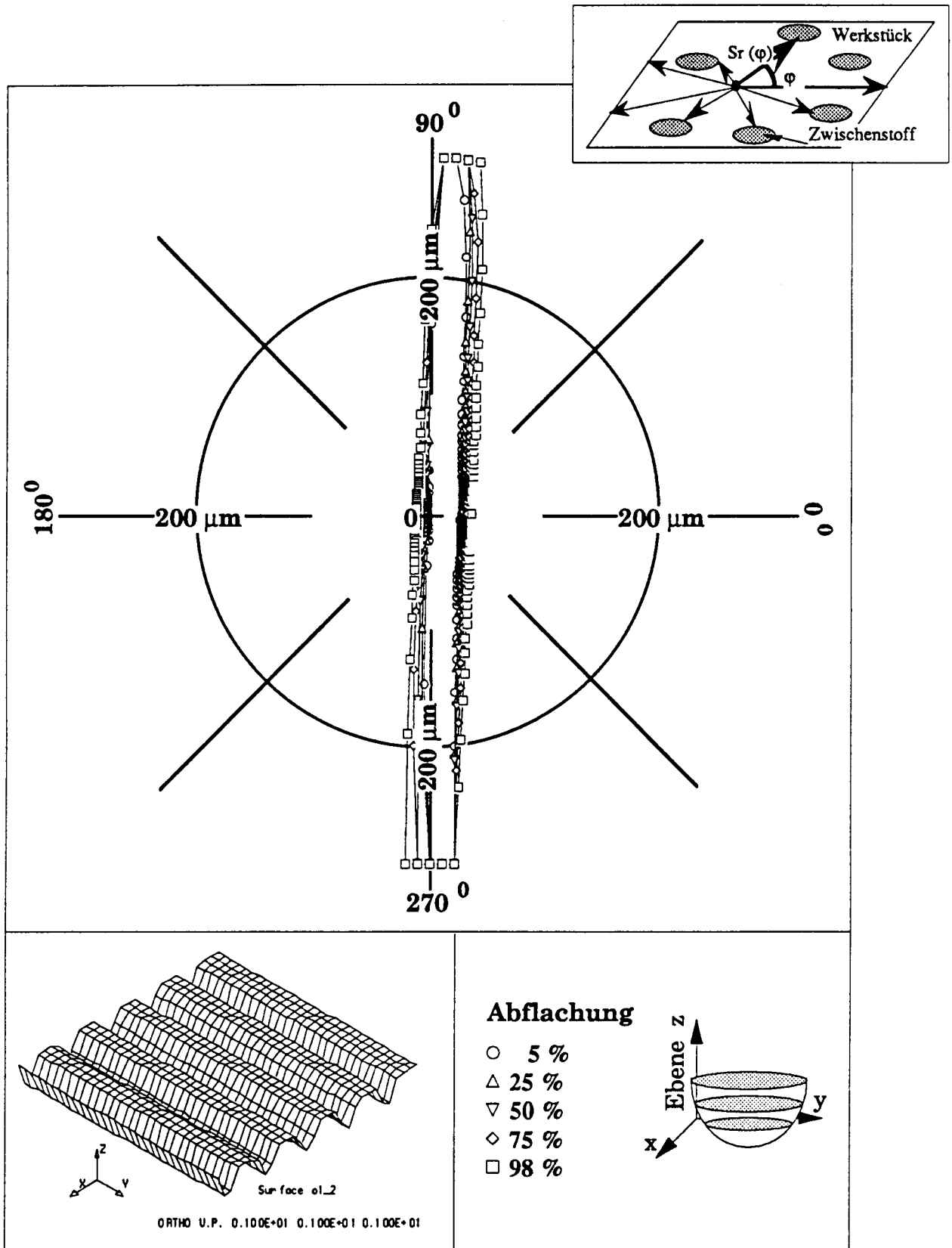
Der Bezugspunkt für die durch die Symbole identifizierten Begrenzungs-  
linien der Reibwege liegt immer im Zentrum des Koordinatensystemes.  
Reibwege, welche nicht innerhalb des betrachteten Rauheitsauschnittes  
begrenzt werden, sind in den Diagrammen durch Symbole auf dem äus-  
sersten konzentrischen Kreis angedeutet. Bei verschiedenen Oberflächen-  
typen existieren Verschieberichtungen, bei welchen die Reibwege nie be-  
grenzt werden, so z. B. bei der rillig geordneten Oberfläche.

Die folgenden Bilder zeigen die maximale ungeschmierte Reiblänge  $S_{r,max}$   
in Abhängigkeit des Winkels und der Abflachung.



**Bild 41:** Maximale ungeschmierte Reiblänge der Zufallsverteilten Oberfläche in Abhängigkeit der Verschieberichtung und der Ablachung





**Bild 42:** Maximale ungeschmierte Reiblänge der rillig gleichgerichteten Oberfläche in Abhängigkeit der Verschieberichtung und der Abflachung

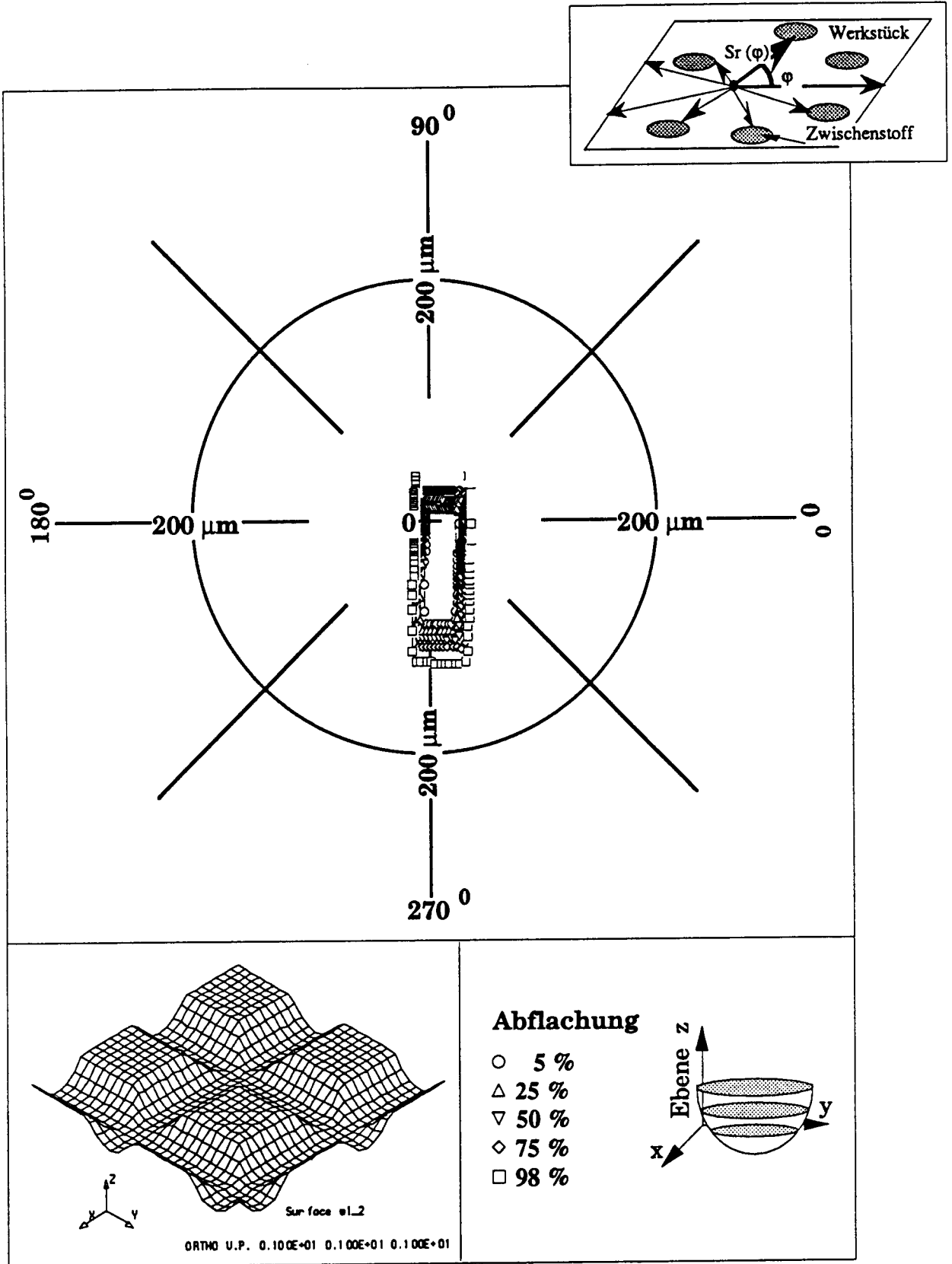
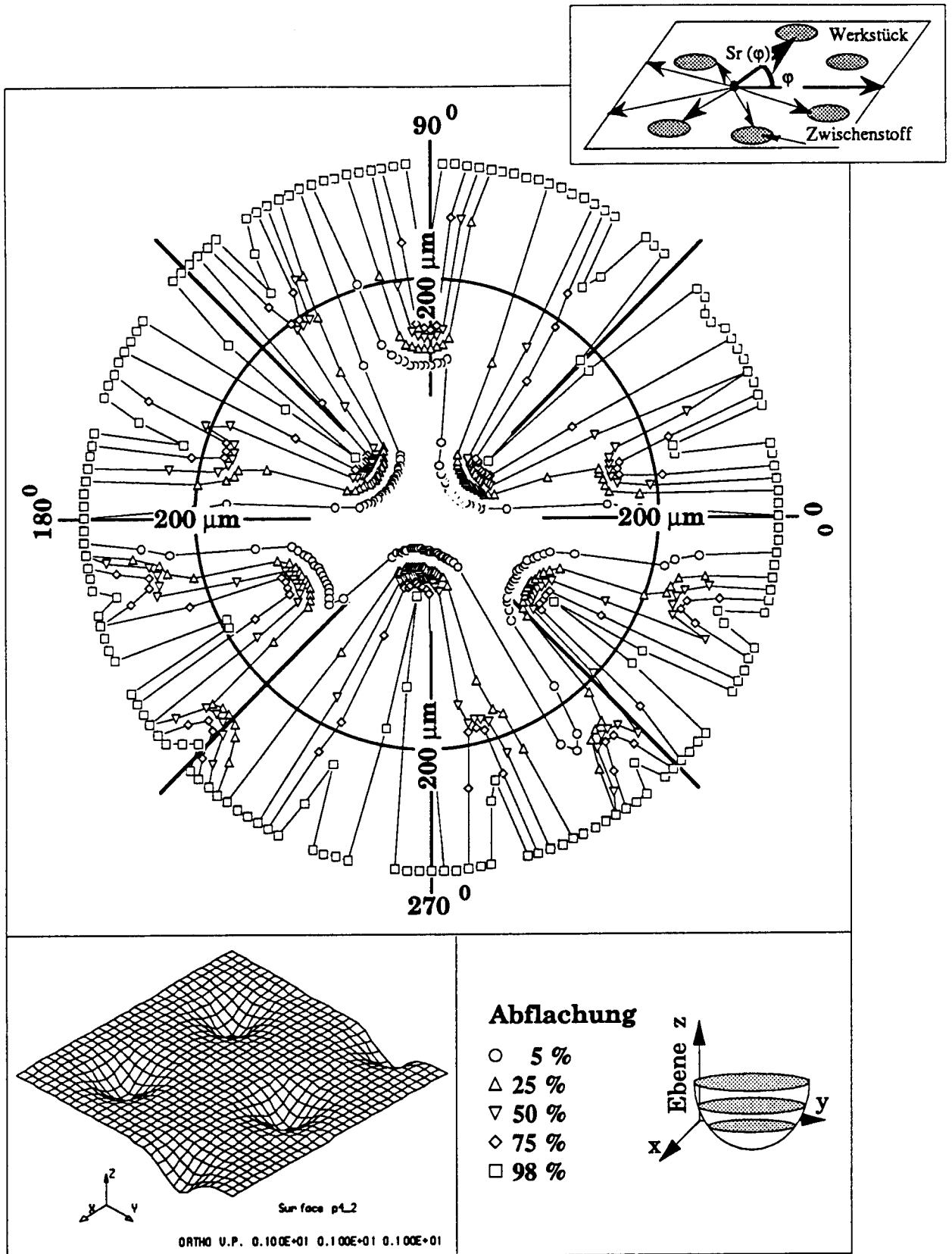


Bild 43: Maximale ungeschmierte Reiblänge der rillig sich kreuzenden Oberfläche in Abhängigkeit der Verschieberichtung und der Abflachung



**Bild 44:** Maximale ungeschmierte Reiblänge der muldigen Oberfläche mit exponentieller Flankenform in Abhängigkeit der Verschieberichtung und der Abflachung

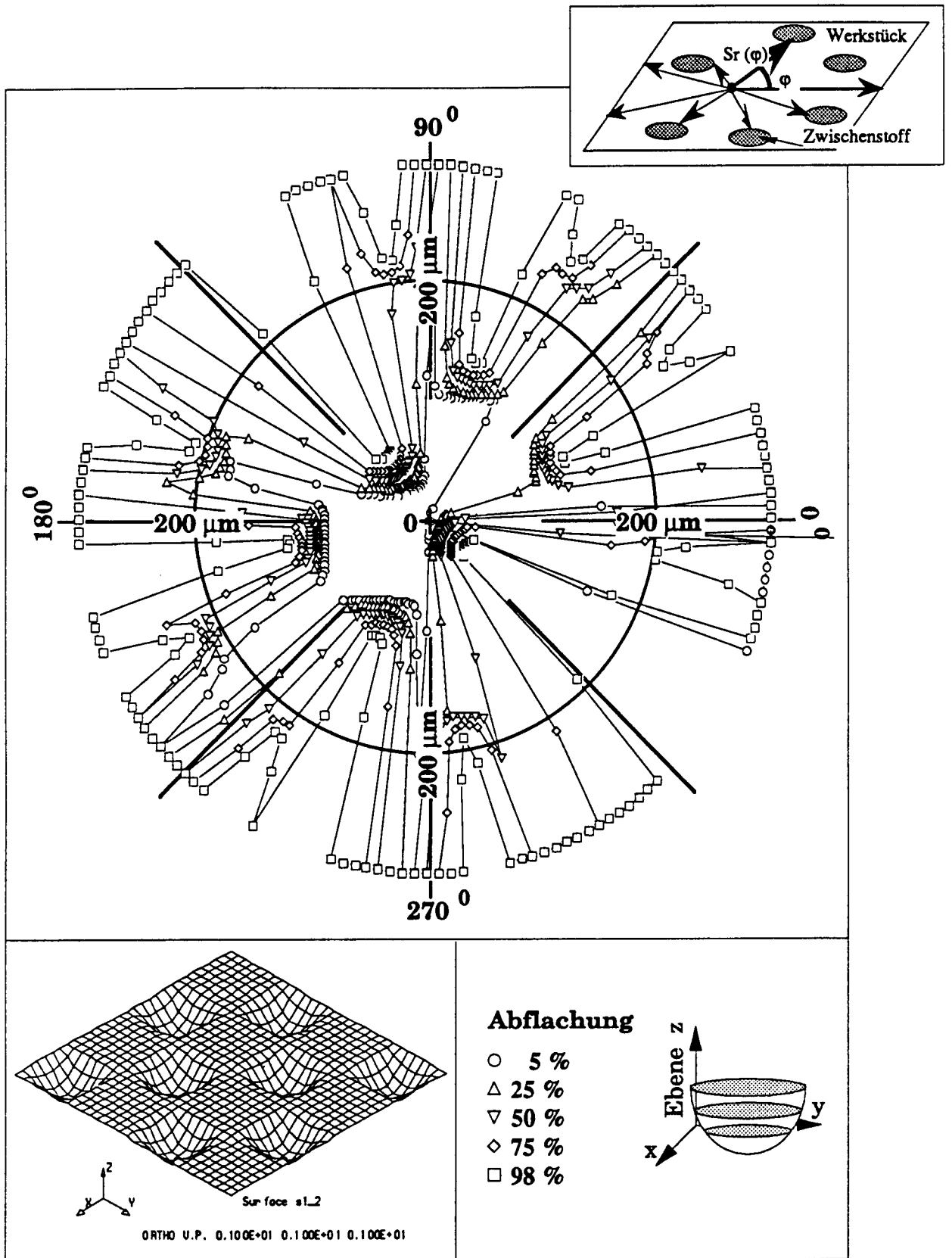


Bild 45: Maximale ungeschmierte Reiblänge der muldigen Oberfläche mit sinusförmiger Flanke in Abhängigkeit der Verschieberichtung und der Abflachung

Die in diesem Kapitel verwendeten Darstellungen beziehen sich auf Vergleiche zwischen Oberflächen gleicher Rauhtiefe und unterschiedlicher Charakteristik. In den mit Hilfe des Computers ermittelten Reiblängenfiguren wird die Richtungsabhängigkeit der verschiedenen Oberflächenstrukturen deutlich. Die optimale Rauheitsstruktur ist isotrop und hat kurze ungeschmierte Reiblängen. Dieser Anforderung am nächsten kommt, wie der Name bereits andeutet, der random- Oberflächentyp. Gute Eigenschaften bezüglich des Adhäsionsverhaltens dürfte auf Grund der kurzen ungeschmierte Reiblängen und deren regelmässiger Verteilungen in allen Verschieberichtungen auch der rillige, sich kreuzende Oberflächentyp haben. Bei den anderen Oberflächentypen wirkt sich die deutlich anisotrope Struktur negativ auf die Reiblängen aus, was sich teilweise in nie begrenzten ungeschmierte Reibwegen äussert. Während dieser Effekt bei der rillig geordneten Oberfläche nur in einer Verschieberichtung auftritt, ist dies bei der muldigen sogar in zwei Richtungen der Fall. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Anisotropie der Rauheit in Tiefenrichtung. Das Hochplateau der geordneten Oberflächen führt im Gegensatz zur random- Oberfläche dazu, dass die ungeschmierte Reiblängen sehr gross werden und entsprechend die Adhäsionserscheinungen an Mikrokontaktflächen gefördert und nicht durch Niveauunterschiede gestoppt werden können.

Die Auswertung dieses Kriteriums führt zu der wichtigen Erkenntnis, dass Oberflächenstrukturen mit einer einheitlichen Spitzenhöhe ungünstig sind, da sie zu Adhäsionserscheinungen neigen. Im weiteren sind regelmässige, geordnete Strukturen ungünstig, da sie lange Reibwege ermöglichen. Bei diesen Oberflächentypen kann durch ein verbessertes Design leicht eine Optimierung erzielt werden. Dabei sollte die Struktur der Rauheit sowohl in Tiefen- als auch in Ebenenrichtung verändert werden, um das Reibverhalten zu verbessern.

### **3.3 Kennwertbeurteilung zur Optimierung der Oberfläche**

Das Ziel bei der Verbesserung des Reibverhaltens kann bei konstant bleibenden Umformverhältnissen und bei vorgegebenem Werkstoff nur durch die Optimierung der geometrischen Struktur der Oberfläche erzielt werden. Die unterschiedliche Geometrie wird dabei vor allem durch die unterschiedliche

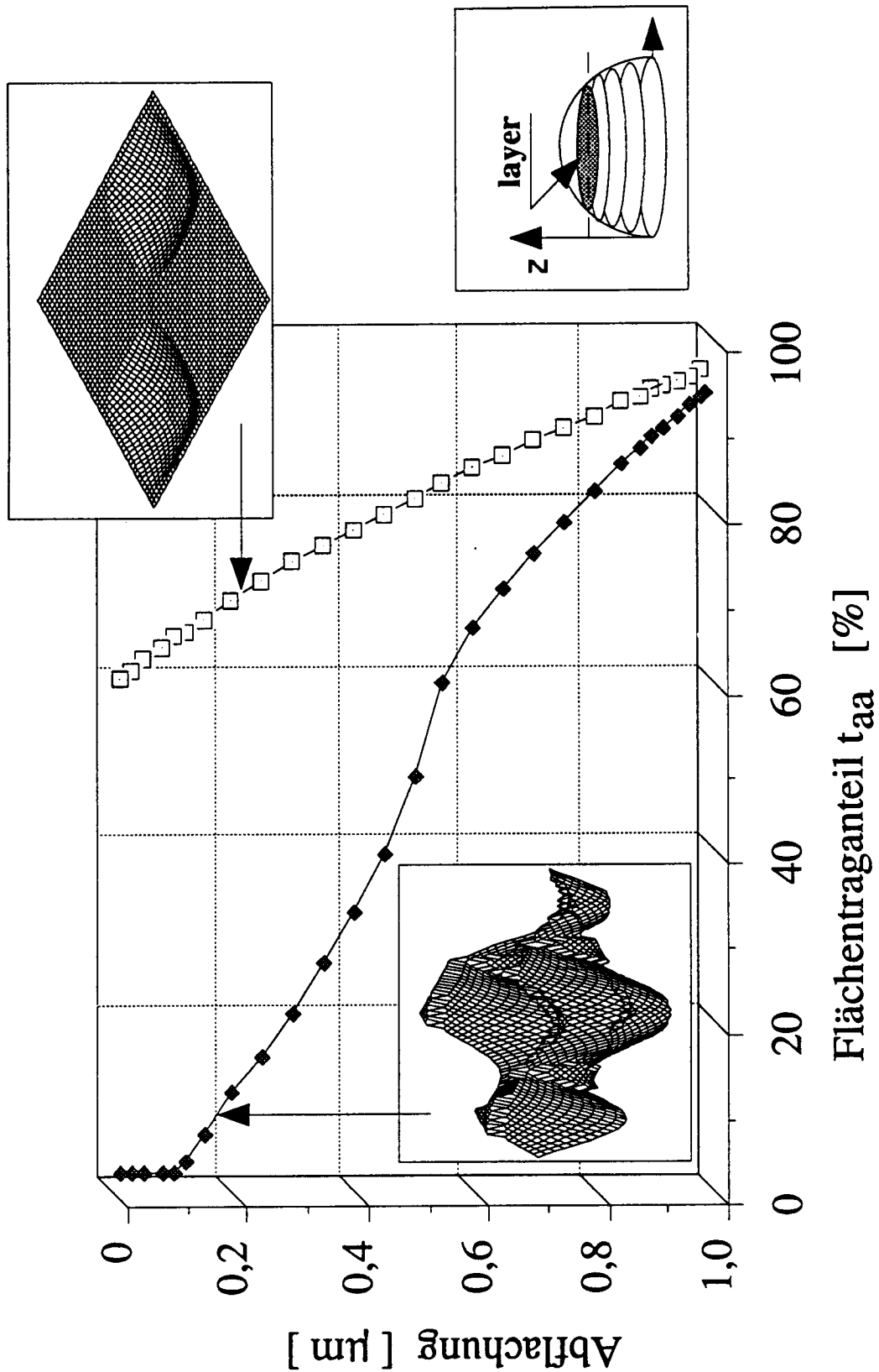
- > *Anordnung der Vertiefungen,*
- > *Form der Mikrotragfläche und*
- > *Flankenwinkel*

erreicht. Durch die Variation dieser Komponenten verändert sich nicht nur die Grösse der in den letzten Kapiteln eingeführten Kennwerte, sondern vor allem der für jeden Oberflächentyp typische, charakteristische Verlauf der Kennwerte in Abhängigkeit der Abflachung. Dies hat direkt Auswirkungen auf das Zusammenspiel der Kennwerte und damit den Anteil und das Verhältnis der für das Reibverhalten entscheidenden Wechselwirkungen. Daraus folgt, dass durch die Veränderung der Oberflächenstruktur die charakteristischen Reibeigenschaften gezielt beeinflusst werden könnten.

Wie stark und in welcher Weise die Rauheitsfunktion die Charakteristik verändert, hängt somit stark vom Oberflächentyp ab.

- Bei *rilligen Oberflächen* kann die Richtung der Rillen, die Periode sowie die Amplitude der Rauheit und damit der Flankenwinkel verändert werden. Die rillige Struktur bleibt erhalten.
- Bei *nichtrilligen Oberflächen* kann die Rauheit durch Überschneidungen der Strukturen stark verfremdet werden.

Die Veränderung einer muldigen Oberfläche ist im nächsten Bild dargestellt. Der Abstand der Mitten sowie die Tiefe der Mulden sind gleich. Der kreisförmige Durchmesser der Vertiefungen wurde verändert. Diese einfache Geometrievariation führt zu stark unterschiedlichen Oberflächenstrukturen und damit Kennwertverläufen. Als Beispiel ist im folgenden Bild der Flächentraganteil in Abhängigkeit der Abflachung dargestellt.



**Bild 46:** Änderung des Flächentrageanteiles in Abhängigkeit der Abflachung für muldige Oberflächen mit gleichem Abstand und unterschiedlichem Durchmesser der Vertiefungen

Während die erste, bekannte muldige Rauheit ein zusammenhängendes Hochplateau aufweist, ist dies bei der zweiten Oberfläche, bei welcher der Muldendurchmesser grösser ist als der Abstand, nicht der Fall. Als Folge der Überschneidung der Mulden ist der Traganteil der Ausgangsoberflächen bedeutend kleiner, als dies bei der ersten der Fall ist. Durch die zunehmende Abflachung der Rauheiten gleichen sich die Traganteile einander an. Während die Abflachung der Rauheit durch den kleineren Traganteil begünstigt wird, ist auch das Leervolumen dieser Oberfläche sowie die durch die Abflachung induzierte Leervolumenänderung grösser. Zudem sind die ungeschmierten Reiblängen kürzer, was die Verschleissneigung der Oberfläche senken sollte. Dagegen verhindert das nicht zusammenhängende Hochplateau die Ausbildung von geschlossenen Schmiertaschen, welche die Normalspannungen auf die Mikrotragflächen senken könnten. Daraus resultieren an den Mikrokontaktflächen höhere Normalspannungen, welche das Versagen der Grenzschicht beschleunigen und damit das Verschleissverhalten verschlechtern.

Für die Beurteilung und Optimierung des Reibverhaltens des Bleches ist somit nicht ein einzelner Kennwert, sondern neben der Kennwertänderung bei der Abflachung das Zusammenspiel der Kennwerte untereinander entscheidend. Dabei bildet der Flächentraganteil ein Mass für die lokale Flächenpressung an den Mikrokontaktflächen. Je grösser der Flächentraganteil ist, desto kleiner wird das Einebnungsvermögen der Rauheit. Während eine kleine Flächenpressung die Adhäsionsneigung mindert, verhindert das reduzierte Einebnungsvermögen oft die Ausbildung von Druckschmiertaschen sowie die Aktivierung des im Leervolumen gespeicherten Zwischenstoffes. Zusammenfassend gilt, dass der Flächentraganteil ein Mass für die lokale Flächenpressung an den Mikrokontaktflächen bildet.

- Je grösser der Flächentraganteil der Ausgangsoberfläche ist, desto kleiner wird das Einebnungsvermögen der Rauheit.
- Kleine Flächenpressungen mindern die Verschleissneigung.
- Das reduzierte Einebnungsvermögen der Oberfläche kann die Ausbildung von Druckschmiertaschen sowie die Aktivierung des im Leervolumen gespeicherten Zwischenstoffes verhindern.

In den folgenden Kapiteln sollen Kennwertvergleiche für die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen gezeigt und diskutiert werden.



### 3.3.1 Ungeschmierte Reiblänge zu Flächentraganteil

Das folgende Bild zeigt den Zusammenhang zwischen mittlerer ungeschmierter Reiblänge und Flächentraganteil auf.

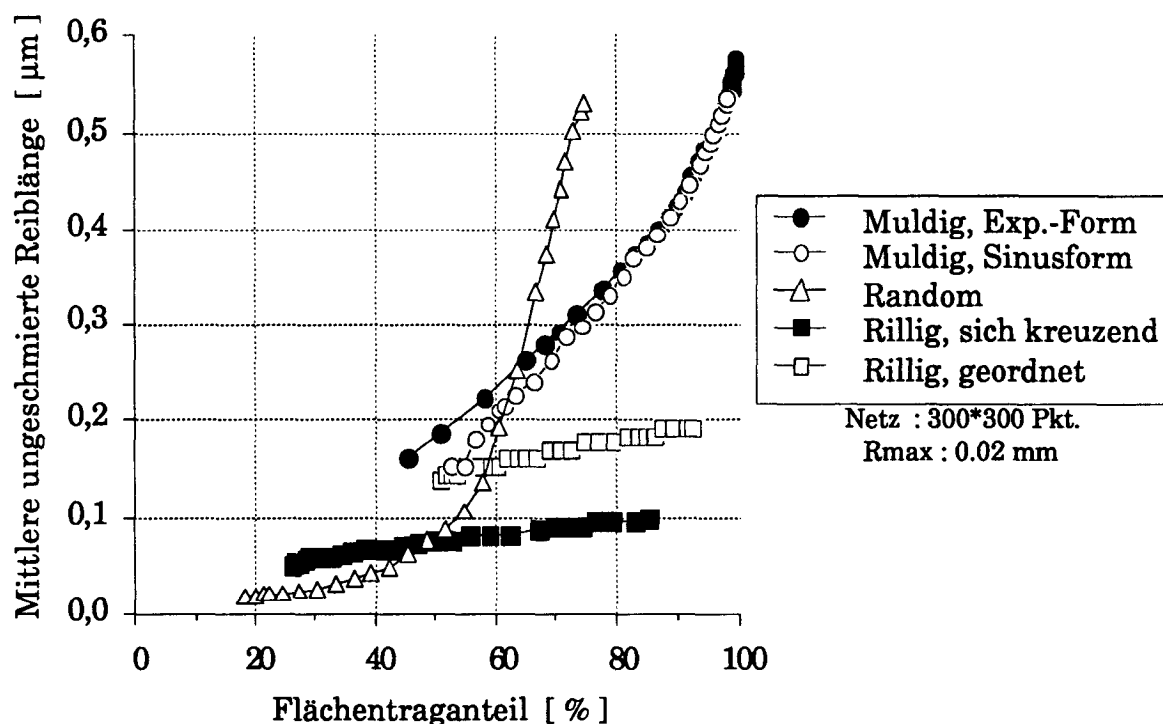


Bild 47: Zusammenhang zwischen Flächentraganteil  $t_a$  und ungeschmierter Reiblänge  $S_r$  dargestellt für alle Oberflächentypen bei Abflachung

Das Bild verdeutlicht, dass die "muldigen" Oberflächenstrukturen sowohl einen grossen Flächentraganteil als auch lange mittlere Reibwege aufweisen. Dieser Effekt wird mit zunehmendem Flächentraganteil noch verstärkt. Die rilligen Oberflächen weisen unabhängig vom Traganteil wesentlich kürzere mittlere ungeschmierte Reiblängen auf. Die random-Oberfläche durchläuft wegen den durch die Abflachung zusammenwachsenden Mikrokontaktflächen einen grossen Bereich. Ist der Flächentraganteil kleiner als fünfzig Prozent, so sind die mittleren Reiblängen deutlich kürzer als bei den anderen Oberflächentypen. Die isolierten Mikrotragflächen treten jedoch bei weiterer Abflachung zunehmend in Kontakt zueinander, was zum sprunghaften Anstieg der Reiblänge und damit zur Verschlechterung des Reibverhaltens führen würde. Aus diesen Erkenntnissen leiten sich in Bezug auf die Optimierung der Oberfläche folgende Eigenschaften ab:

- die Reibwege an der Werkstückoberfläche sind möglichst kurz zu halten.

- die Minimierung der Reiblänge führt auch zu einer Verkürzung der Wellenlänge der Rauheit des Werkzeuges. Da jedoch ein Wellenlängenverhältnis  $\lambda_{\alpha} = 1$  wegen dem Einsetzen mechanischer Wechselwirkungen zu starken Verschleisserscheinungen führen muss, wird die minimale Reiblänge der Werkstückoberfläche durch die Wellenlänge der normalerweise kleineren Rauheit des Werkzeuges begrenzt. Das heisst:

$$\lambda_{Wz} \ll S_{r,Wst} \ll \infty \quad (3.3)$$

- Durch die Bildung unterschiedlicher Höhenniveaus ist es möglich, kleine Reiblängen bei gutem Einebnungsvermögen der Rauheit zu realisieren. Dabei ist zu beachten, dass in der Praxis ein Traganteil von nahezu 100% nie erreicht wird, da erstens die Werkzeugoberfläche rauh ist und zweitens die Grenzschicht infolge der hohen lokalen Spannungen in Normalenrichtung vorher versagt.

### 3.3.2 Reziproker Benetzungsdurchmesser zu Flächentraganteil

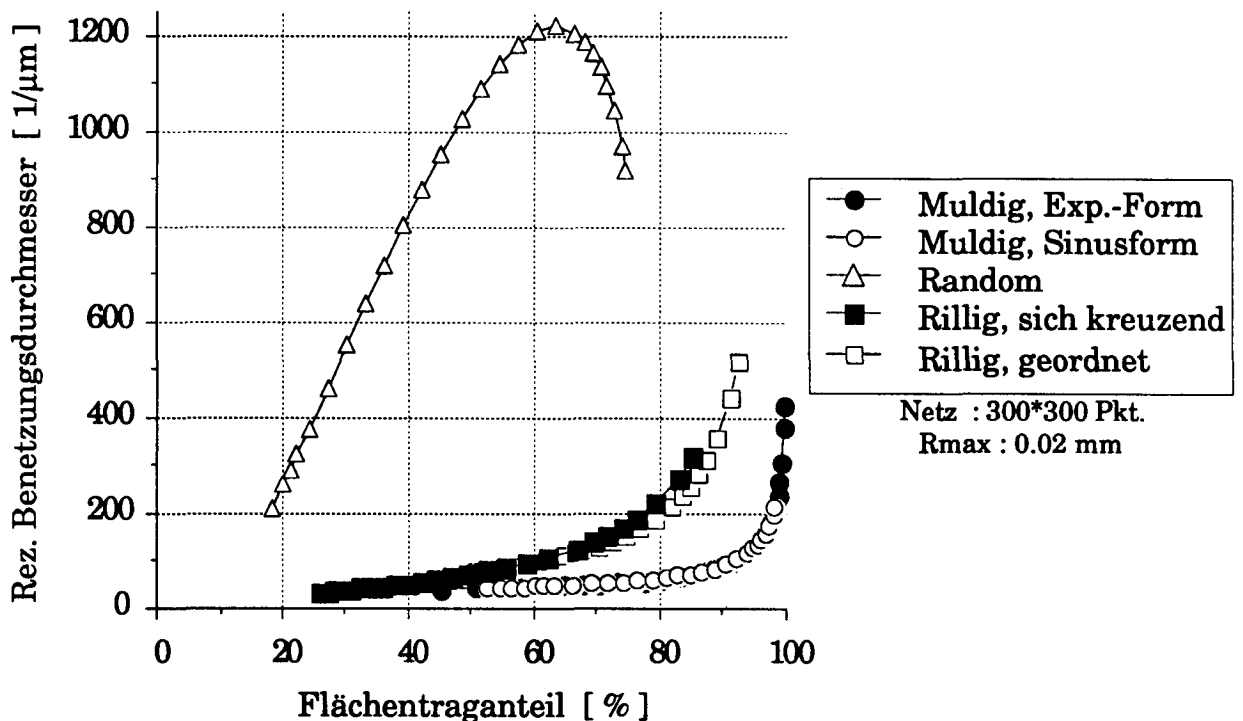


Bild 48: Reziproker Benetzungsdurchmesser  $\varnothing_B$  zu Flächentraganteil  $t_a$  bei Oberflächenänderung aller Oberflächentypen bei Abflachung

Das Bild verdeutlicht, dass der reziproke Benetzungsdurchmesser der "random"- Oberfläche bereits beim ersten Werkzeugkontakt am grössten ist und mit zunehmender Abflachung weiter ansteigt. Das Benetzungsvermögen der anderen Oberflächentypen ist bereits zu Beginn deutlich kleiner und verschlechtert sich mit zunehmender Abflachung. Dieses Verhalten folgt direkt aus der Anzahl der Mikrokontaktflächen, welche bei diesen Oberflächentypen konstant bleibt. Nur das Verhältnis von Umfang zur Fläche wird verändert, wobei dieses bei den "rilligen" Rauheiten vorteilhafter ist als bei den "muldigen". Obige Betrachtungen und die Tatsache, dass ein möglichst grosser reziproker Benetzungsdurchmesser anzustreben ist, führen zum Schluss, dass

- eine Oberflächenstruktur mit vielen separierten, möglichst kleinen Mikrokontaktflächen vorteilhaft ist. Optimal ist eine Rauheit mit vielen unterschiedlichen Spitzenniveaus und Mikrokontaktflächenkonturen in Mäanderform. Schlecht sind kreisförmige Mikrokontaktflächenkonturen, da Kreise den minimalen Umfang einer Fläche erzeugen.

### 3.3.3 Leervolumen zu Flächentraganteil

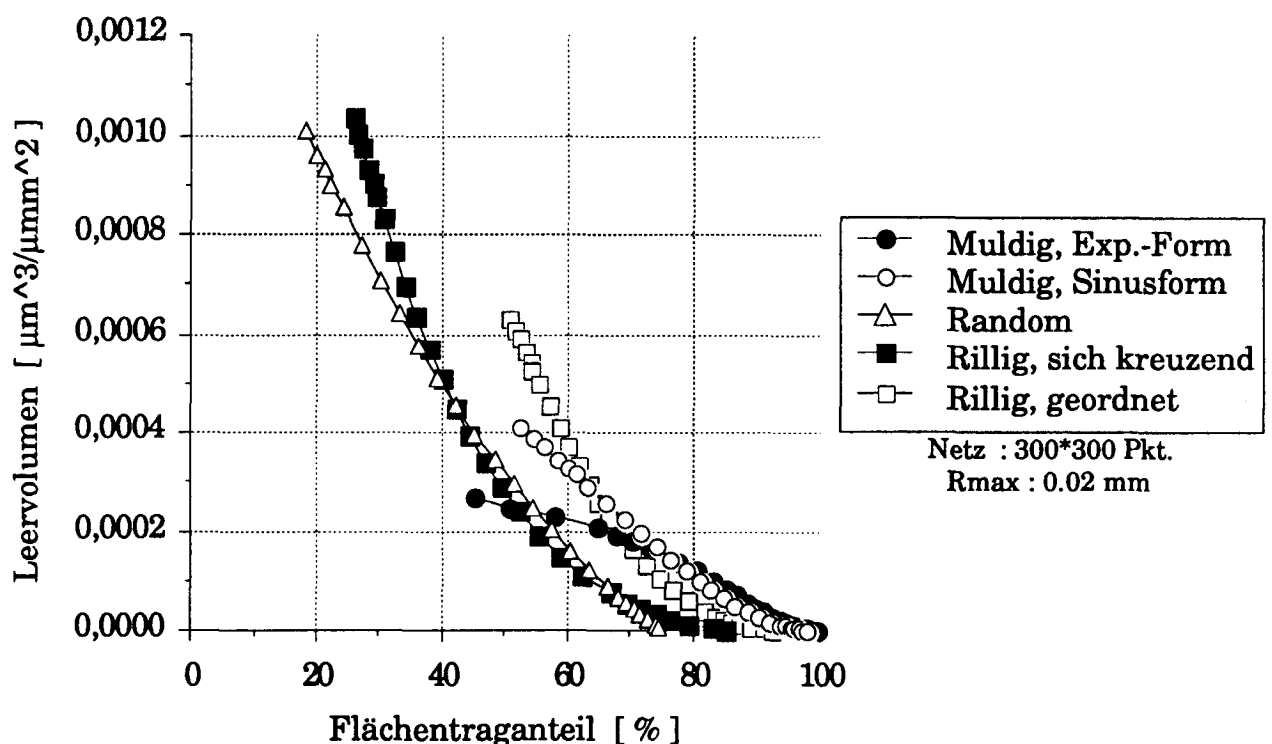
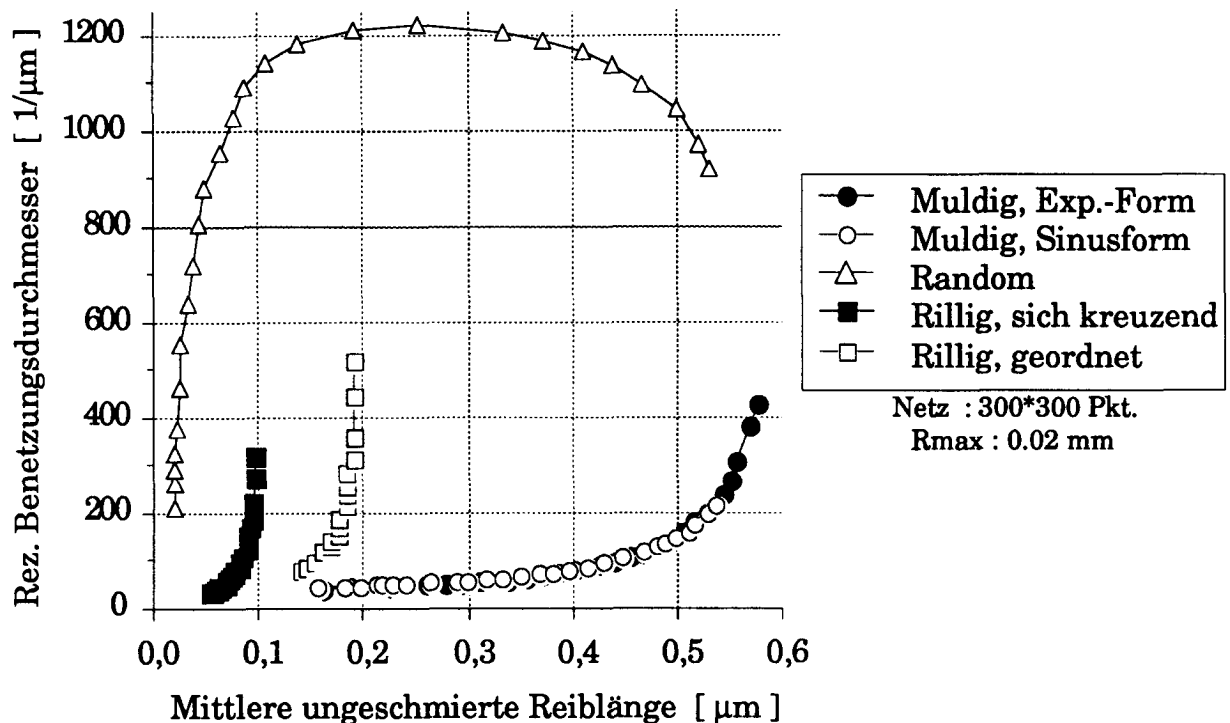


Bild 49: Leervolumen  $XV_T$  zu Flächentraganteil  $t_a$  bei Abflachung, dargestellt für alle Oberflächentypen

Das Bild 49 zeigt das grosse Leervolumen der "rillig sich kreuzenden" und der "random"- Oberfläche auf. Dies verdeutlicht den Vorteil von Oberflächenstrukturen mit kleinem Flächentraganteil bezüglich des Zwischenstoffaufnahmevermögens. Zur Aktivierung des im Leervolumen der Rauheit gespeicherten Zwischenstoffes ist eine Oberflächenstruktur anzustreben, welche eine starke Abflachung der Oberfläche ermöglicht. Dies ist bei der rillig sich kreuzenden und der random- Oberfläche der Fall. Als negativer Effekt dieser Annäherung muss jedoch das Wachsen des Flächentraganteiles und mit ihm das Wachsen der Reiblängen gewertet werden. Beide zu Beginn erwähnten Oberflächen weisen jedoch auch hier gegenüber den anderen Oberflächen Vorteile auf. Daraus folgt:

- Rauheiten mit kleinem Flächentraganteil besitzen ein grosses Einebnungspotential. Durch die Aktivierung des reaktiven Zwischenstoffes aus dem Leervolumen haben diese Oberflächen Vorteile bezüglich des Adhäsionsverhaltens im Reibkontakt.
- Die durch die Einebnung entstehenden mechanischen Wechselwirkungen sowie die entsprechende Zunahme der Oberflächenenergie begünstigen jedoch die Adhäsion und führen zu hohen Reibkräften. Die Zunahme der Oberflächenenergie muss durch entsprechende Reaktionen des Zwischenstoffes abgebaut werden. Dazu ist eine ausreichende Zwischenstoffmenge und eine gute Benetzung der Mikrokontaktflächen zwingend.

### 3.3.4 Ungeschmierte Reiblänge zu reziprokem Benetzungsdurchmesser



**Bild 50:** Ungeschmierte Reiblänge  $S_R$  zu reziprokem Benetzungsdurchmesser  $\varnothing_B$  aller Oberflächentypen bei zunehmender Abflachung

Mit dem Anstieg der mittleren freien Reiblängen erhöhen sich auch die Anforderungen an das Benetzungsvermögen der Mikrokontaktflächen sowie an den Zwischenstoff zur Reduzierung der Oberflächenenergie. Bei der "random"- Oberfläche steigt der reziproke Benetzungsdurchmesser wegen der Zunahme der Anzahl der Tragflächen bei nahezu gleichbleibender Grösse (respektive der mittleren ungeschmierten Reiblänge) stark an. Durch die Vergrößerung und das Zusammenwachsen der einzelnen Tragflächen steigt die Reiblänge bei gleichzeitig abnehmendem Tragflächenumfang an, was sich bei starker Abflachung in einem sinkenden reziproken Benetzungsdurchmesser äussert. Im Unterschied zu der "random"- Oberfläche bleibt die Tragflächenanzahl bei den "muldigen" und "rilligen" Oberflächen konstant. Die Vergrößerung des reziproken Benetzungsdurchmessers erfolgt daher auf Grund der starken Zunahme des Flächentraganteiles und nicht der Anzahl der tragenden metallenen Flächen. Die Kurven verdeutlichen entsprechend die Überlegenheit der Oberfläche mit unterschiedlichen Spitzenniveaus, bei welchen der reziproke Benetzungsdurchmesser wie auch der Flächentraganteil als Folge der steigenden Anzahl Kontaktflächen erhöht wird.

- Um kurze Reiblängen bei grossem reziprokem Benetzungsdurchmesser zu erreichen, sollten die Rauheitsspitzen in unterschiedlichen Tiefenebenen angeordnet sein. Die im Reibkontakt zunehmenden Normalkräfte werden dann von einer kontinuierlich ansteigenden Anzahl von Tragflächen aufgenommen, deren einzelner Flächeninhalt nahezu konstant bleibt. Die so erzielten, separierten Mikrokontaktflächen weisen kleine Verfestigungen und gleichzeitig kurze mittlere ungeschmierte Reiblängen auf, was die Adhäsionsneigung vermindert.

### 3.3.5 Ungeschmierte Reiblänge zu Leervolumen

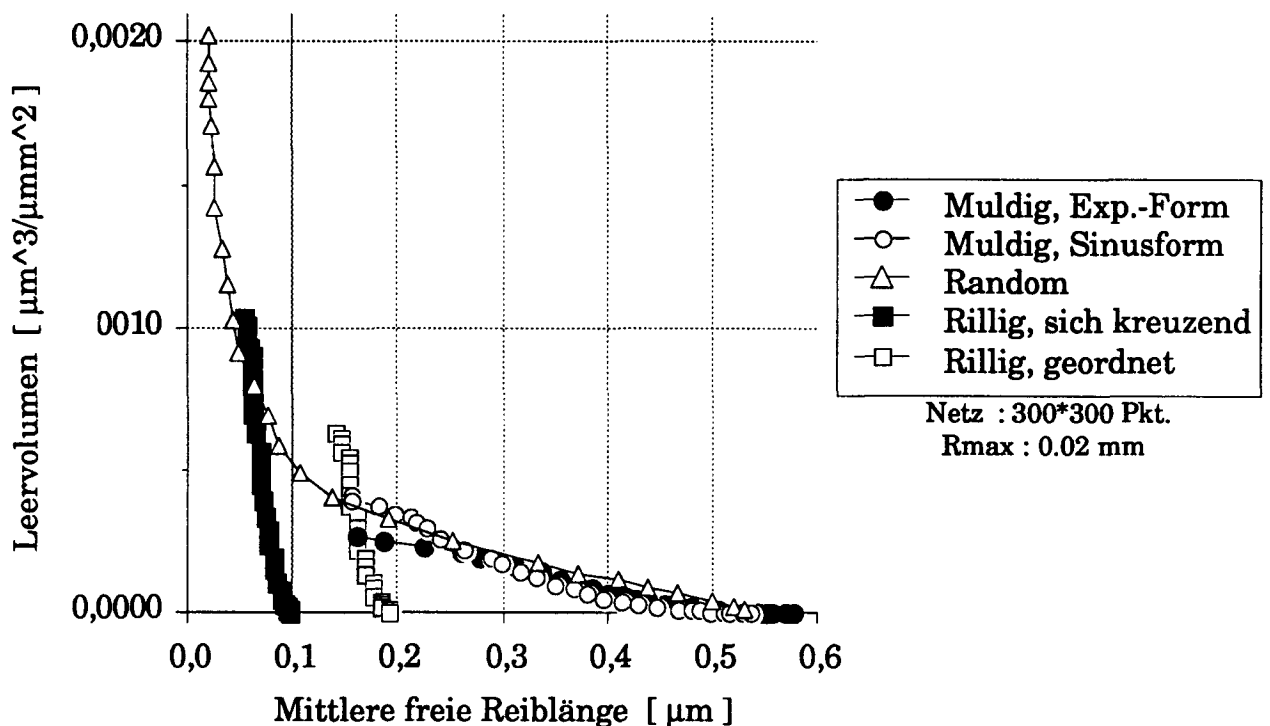


Bild 51: Zusammenhang zwischen ungeschmierte Reiblänge  $S_r$  und Leervolumen  $XV_r$  bei Abflachung, dargestellt für die unterschiedlichen Oberflächentypen

Eine interessante Aussage im Bezug auf das Adhäsionsverhalten erhält man, wenn die beiden für die Adhäsion wichtigen Kennwerte - das Leervolumen und die Reiblänge - sich gegenübergestellt werden. Wie Bild 51 zeigt, weisen auch hier die "random"- und die "rillig sich kreuzende" Oberfläche wegen dem grossen Leervolumen bei kleiner ungeschmierter Reiblänge ein vorteilhaftes Verhalten auf.

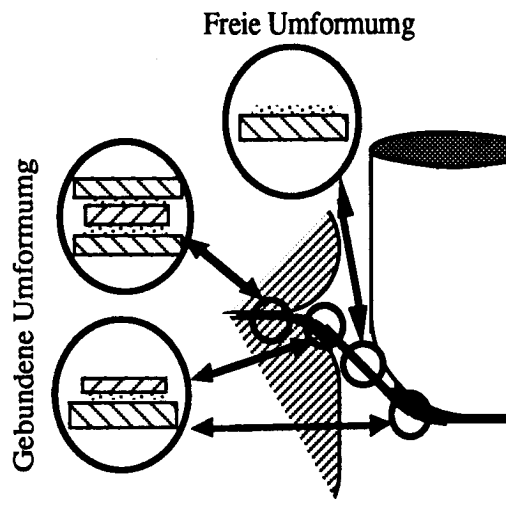
Während die Reiblänge der "rilligen" Strukturen durch die Leervolu-

menänderung kaum beeinflusst wird, gleicht sich das Leervolumen-Reiblängen-Verhalten der "random"- Oberfläche demjenigen der "muldigen" Oberflächen an. Daraus kann abgeleitet werden, dass die "random"- Oberfläche einem quasi "muldigen" Oberflächentyp entspricht. Muldige Strukturen entstehen bei der "random"- Oberfläche jedoch erst bei starker Abflachung. Durch das Zusammenwachsen der einzelnen Mikrokontaktflächen bilden sich dann einzelne muldige Vertiefungen. Dieses Erkenntnis führt wiederum zum Schluss, dass die hier bearbeiteten muldigen Oberflächen durch die Veränderung ihrer Struktur, wie dies in vorhergehenden Kapitel ausgeführt wurde, einer random- Oberfläche angeglichen werden könnten. Aus diesem Grund besitzen diese Oberflächen noch ein grosses Optimierungspotential. Generell gilt, dass

- Oberflächen mit einem grossen Leervolumen und kleinen ungeschmierten Reiblängen anzustreben sind. Neben der mittleren ungeschmierten Reiblänge muss bei den verschiedenen Oberflächentypen die Richtungsabhängigkeit der ungeschmierten Reiblängen berücksichtigt werden, wie dies im vorhergehenden Kapitel durchgeführt wurde. Diese differenzierte Betrachtung verdeutlicht, dass, wie bereits durch kleinste mittlere ungeschmierte Reiblängen angedeutet, real nur die "rillig sich kreuzende" und die "random"- Oberfläche den Anspruch eines grossen Leervolumens bei gleichzeitiger kleiner ungeschmierter Reiblänge erfüllen.

### **3.4 Folgerungen aus den definierten Oberflächenkennwerten**

Die bisherigen Untersuchungen verdeutlichen den Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Rauheitsänderung und entsprechend auf die Kontaktmechanismen sowie das Reib- und Adhäsionsverhalten im Reibkontakt. Die in der Produktion verwendeten Bleche weisen auf beiden Oberflächenseiten gleiche Rauheitsstrukturen auf. Ihr Reibverhalten ist somit ähnlich. Unterschiedliche Umformzonen wie auch Umformteile verlangen jedoch ein differenziertes Reibverhalten. Die verwendeten Bleche bilden somit bei der optimierten Umformung einen Kompromiss.



**Bild 52:** Umformzonen am Realteil

Wie allgemein bekannt ist, treten am Werkstück unterschiedliche Umformzonen, -zustände und damit Anforderungen das Umformverhalten respektive Reibverhalten der Bleche auf.

Um eine optimale Werkstoffausnutzung zu erzielen, müssen die Reibkräfte beim Tiefziehen in der Ziehringrundung möglichst klein und in der Stempelrundung möglichst gross sein. Beim Streckziehen dagegen sollten sowohl die in der Ziehring- als auch die in der Stempelrundung wirkenden Reibkräfte möglichst klein sein. Der für die Umformung verwendete Werkstoff bildet daher einen Kompromiss für die am jeweiligen Umformteil verlangten Eigenschaften. Durch die Beherrschung des Reibverhaltens von Blechoberflächen müsste kein Kompromiss eingegangen werden. Die folgende Lösung wäre möglich:

- *Die beiden Blechoberflächen oder Oberflächenbereiche werden unterschiedlich, je nach Anforderung an die Reibkräfte, strukturiert, um für die jeweilige Umformzone optimale Eigenschaften zu erzielen.*

Diese Lösung bedingt jedoch die Quantifizierung des Reibbeiwertes für die in der jeweiligen Umformzone herrschenden Spannungen, Dehnungen, Relativgeschwindigkeiten und Temperaturen. Da dies an Rauheitsstrukturen wegen den komplexen chemischen und physikalischen Abläufen an der Grenzschicht nicht mathematisch erfolgen kann, sind entsprechende Versuche notwendig. Zur Quantifizierung des Reibverhaltens der verschiedenen Oberflächentypen wurde daher ein Modellreibversuch durchgeführt, nämlich der erweiterte Streifenziehversuch mit Umlenkung, der im folgenden Kapitel beschrieben wird.



## 4 Streifenziehversuch mit Umlenkung

Im erweiterten Streifenziehversuch mit Umlenkung wird die Probe während des Versuchsablaufes kontinuierlich deformiert. Der Werkstoff wird so in der Reibzone plastifiziert. Dieser Umstand führt dazu, dass das Reibverhalten der Oberflächenstruktur in Variation der Spannungen, Dehnungen und Relativgeschwindigkeiten untersucht werden kann. (Die Übereinstimmung von Resultaten aus dem einfachen Streifenziehversuch und den Messungen an Realteilen wurde bereits von *Grahner* [1985] gezeigt.) Das Ziel der Messungen im Rahmen dieser Arbeit ist es, das Reibverhalten der im letzten Kapitel eingeführten typologisierten Oberflächen zu ermitteln.

### 4.1 Versuchsaufbau

Der erweiterte Streifenziehversuch mit Umlenkung basiert auf der Simulation des Reibverhaltens, wie es beim Umformen im Bereich der Ziehringrundung auftritt. Zur Versuchsdurchführung werden Probestreifen mit 1000 mm Länge und 20 mm Breite an den Enden in Einspannköpfen festgeklemmt. Die Einspannköpfe sind durch einen geschlossenen Seilzug miteinander verbunden. Diese kraftschlüssige Verbindung ermöglicht, den Streifen vor dem Versuch durch eine Spannvorrichtung zu strecken und definiert um  $\Delta\varepsilon_v$  vorzudehnen (Vordehnung).

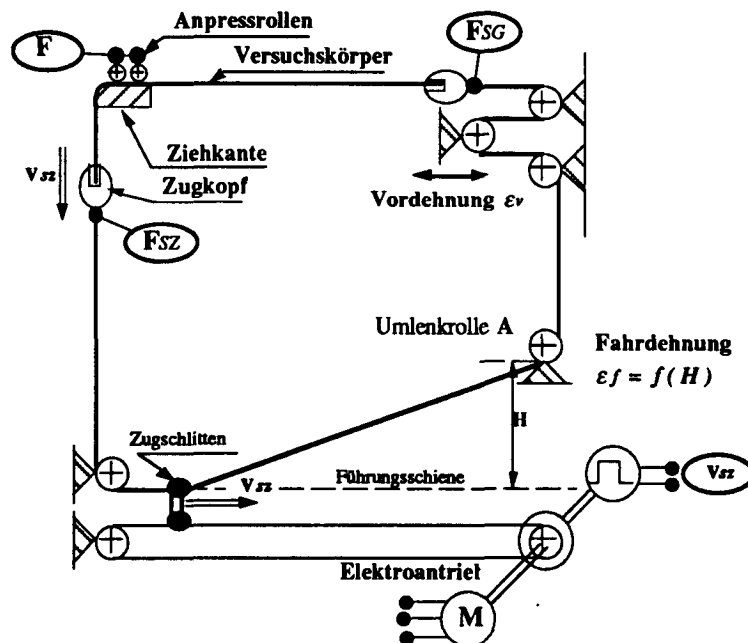
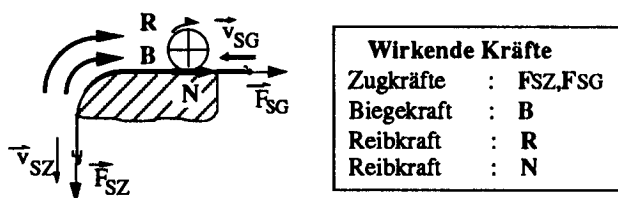


Bild 53: Aufbau des Streifenziehversuches mit Umlenkung

Mit Hilfe eines Elektromotors wird der Zugschlitten mit konstanter Geschwindigkeit  $v_{SZ}$  der Führungsschiene entlanggezogen. Über diesen Schlitten wird der Seilzug so bewegt, dass der Zugkopf ebenfalls eine konstante Geschwindigkeit  $v_{SZ}$  erfährt.

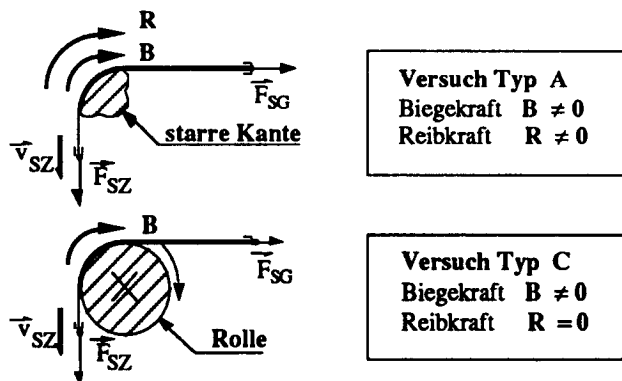
Durch die während des Versuches fixierte vertikale Verschiebung der Umlenkrolle A aus der horizontalen Ebene des Zugschlittens um den Betrag  $H$  wird die während des Versuchsablaufes mechanisch auf den Streifen übertragene Fahrdehnung  $\epsilon_f$  induziert. Die Fahrdehnung  $\epsilon_f$  resultiert aus den unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $v_{SZ}$  und  $v_{SG}$  der Einspannköpfe, es gilt  $v_{SZ} > v_{SG}$ . Durch die Fahrdehnung  $\epsilon_f$  kommt es zur Plastifizierung der gesamten Probe während des Versuchsablaufes. Der Verformungsanteil  $\epsilon_f$  ist im Bereich der Ziehkantenrundung am grössten. Eine Anpressrolle ermöglicht im flachen Bereich vor der Rundung die Einebnung der Rauheit vor der Reibzone. Am Realteil findet dieser Mechanismus zum Beispiel unter dem Niederhalter statt.

An der Ziehkante wirken die in der folgenden Skizze dargestellten Kräfte:



**Bild 54:** An der Ziehkante wirkende Beanspruchungen, schematisch dargestellt

Um die Reibkraft über der Ziehkantenrundung zu ermitteln, müssen verschiedene Versuche durchgeführt werden. Durch die in den folgenden Bildern dargestellten Versuchsanordnungen vom Typ A, B und C werden die gesuchten Grössen Biegeanteil  $B$ , Reibkräfte  $R$  und  $N$  an der Ziehkante separiert. Wird die Anpressrolle vor der Ziehkantenrundung nicht verwendet, so genügen zwei Versuche vom Typ A und C zur Separierung von  $R$  und  $B$ .



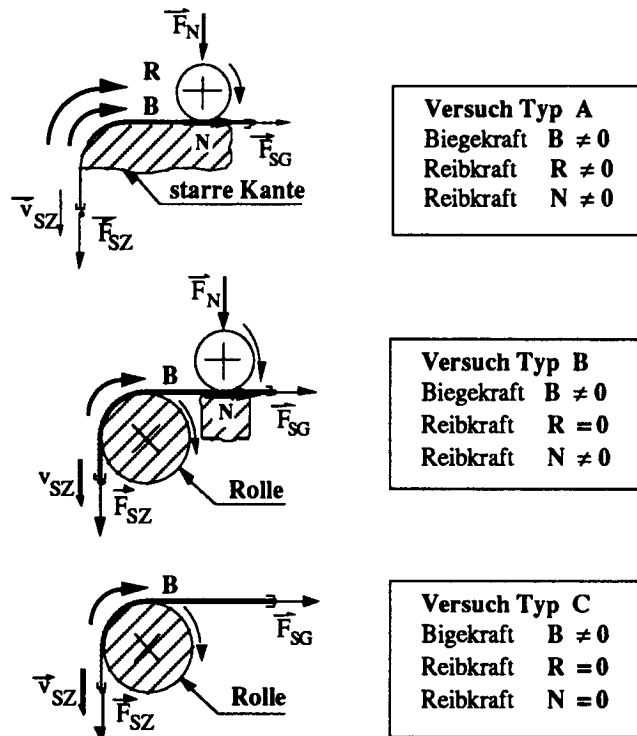
**Bild 55:** Schematischer Aufbau der Versuchsvarianten mit starrer Ziehkante und drehender Rolle mit Kräften

Es gilt:

$$\text{Versuch Typ A:} \quad \Delta A = F_{SZ} - F_{SG} = R + B \quad (4.1)$$

$$\text{Versuch Typ C:} \quad \Delta C = F_{SZ} - F_{SG} = B \quad (4.2)$$

Wird die Anpressrolle vor der Ziehkantenrundung zur Einebnung der Oberfläche vor der Reibzone verwendet, so werden drei Versuche benötigt, um die Grössen N, R und B zu separieren .



**Bild 56:** Schematischer Aufbau der Versuchsvarianten mit starrer Ziehkante und drehender Rolle mit Kräften

Es gilt:

$$\text{Versuch Typ A:} \quad \Delta A = F_{SZ} - F_{SG} = R + B + N \quad (4.3)$$

$$\text{Versuch Typ B:} \quad \Delta B = F_{SZ} - F_{SG} = B + N \quad (4.4)$$

$$\text{Versuch Typ C:} \quad \Delta C = F_{SZ} - F_{SG} = B \quad (4.5)$$

Aus den gemessenen Zugkräften  $F_{SZ}$ ,  $F_{SG}$  der Versuche wird ein mittlerer Reibbeiwert  $\mu_{sz}$  in der Ziehkantenrundung ermittelt. Die Umrechnung erfolgt nach der modifizierten Formel nach Eytelwein

$$\mu_{sz} = \frac{2}{\pi} * \ln \left( \frac{F_{SZ} - B/2}{(F_{SZ} - B/2) - R} \right) \quad (4.6)$$

wobei die Bezugskraft  $F_{sz}$  aus dem Versuch vom Typ A stammt.

## 4.2 Untersuchtes Reibsystem

Das im Modellversuch untersuchte Reibsystem besteht aus Werkzeug (Ziehkante), Werkstück (Streifen) und Zwischenstoff. Der Variationsbereich der Umformvariablen, primär der

*plastischen Deformation  $\epsilon_{ij}^p$*

und der

*Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}$ ,*

wird durch die bereits beschriebenen Prozessparameter der realen Umformung, vor allem

*die Stempelgeschwindigkeit  $v_{St}$ ,*

*die Werkzeuggeometrie, respektive die Anfangs- und Endform des Teiles, sowie*

*die Reibzone (Ziehring:  $v_{rel} \approx v_{St}$ , Stempelrundung:  $v_{rel} \ll v_{St}$ )*

bestimmt.

Die Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Der Einfluss der Temperatur auf das Reibverhalten ist bei den hier vorliegenden Untersuchungen vernachlässigbar. Beim Vergleich von Reibsystemen, welche sich nur durch die Rauigkeit des Werkstückes unterscheiden, ist die Temperatur direkt von der Variation der Systemvariablen und den dadurch induzierten Reibmechanismen abhängig. Sie ist somit für alle hier untersuchten Reibsysteme näherungsweise gleich.

Die Versuche mit dem Streifenziehversuch mit Umlenkung ermittelten somit folgende  $\mu$ -Abhängigkeit:

$$\mu = f_1(\text{Oberfläche}) + f_2(v_{rel}, \epsilon_{ij}) \quad (4.7)$$

Die von Umformpressen im Presswerk erreichten Hubzahlen bei einem Hubweg von 50 + 70 mm liegen bei 16 + 18 1/min. Dies ergibt eine maximale Stempelgeschwindigkeit  $v_{St}$  von 420 mm/s. Diese Geschwindigkeit  $v_{St}$  bestimmt die maximal erreichbare Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}$  zwischen Werkzeug und Werkstück. Die Relativgeschwindigkeit in der

Stempelrundung  $v_{St}$  dagegen ist sehr klein. Für Relativgeschwindigkeiten am Realteil gilt somit:

$$0 \text{ m/s} < v_{rel} < v_{St} \quad (4.8)$$

Am Umformteil treten, abhängig von der Geometrie und dem Betrachtungsort, Zonen ohne plastische Deformation wie auch Bruchdehnung auf. Daraus folgt, dass für den Variationsbereich der Deformation gilt:

$$0 < \epsilon_{ij} < \epsilon_f^{krit} \quad (4.9)$$

Im Modellversuch können durch die Vordehnung des Bleches um  $\Delta\epsilon_v$ , die Fahrdehnung  $\epsilon_f$  während des Versuches, die Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}$  und die Vorgabe des Ziehkantenradius  $r$  die unterschiedlichen am Realteil lokal auftretenden Deformationszustände simuliert und deren Reibverhalten quantifiziert werden. Der Einfluss der Verfestigung ist in den ermittelten  $\mu$ -Werten implizit enthalten.

Die Variablen können im Versuch im folgenden Variationsbereich verändert werden:

Variablen		Variationsbereich		
		<i>min</i>	<i>max</i>	
Ziehgeschwindigkeit	$v_{rel}$	0.02	0.8	m/s
Fahrdehnung	$\epsilon_f$	0	30	%
Vordehnung	$\epsilon_v$	0	$\epsilon_{v,max}$	%
Flächenpressung	$\bar{\sigma}$	<i>f (Werkstoff)</i>		N/mm <sup>2</sup>

Bild 57: Variationsbereich der Umformvariablen beim Streifenziehversuch mit Umlenkung

## 4.3 Systemkomponenten

### 4.3.1 Werkstück

Zur Bestimmung der Reib- und Adhäsionseigenschaften von unterschiedlichen Oberflächenstrukturen wurde als Grundwerkstoff eine Aluminiumlegierung gewählt, da deren chemische Reaktivität und die gute Verformbarkeit der Rauheiten klare Aussagen bezüglich der beiden Optimierungskriterien ermöglichen.

Als Werkstoff wurde die Aluminiumlegierung Ac120<sup>®</sup>, eine Legierung

AlMg0.4Si1.2 mit folgender Zusammensetzung

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
1.2	0.29	0.10	0.08	0.39	0.05	0.001	0.02

verwendet. Die Bleche wurden mehrheitlich aus demselben Coil gefertigt. Die Grundwerkstoffe haben somit die gleiche Zusammensetzung und durch die Herstellung mit denselben Verfahrensparametern auch gleiche Eigenschaften.

Die Walzenoberflächen zur Herstellung der Ausgangsoberflächen wurden durch Schleifen oder Laserpulsen bearbeitet, was eine Typologisierung nach DIN-4761 möglich macht.

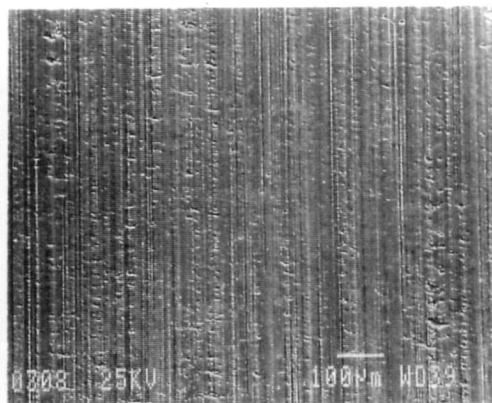
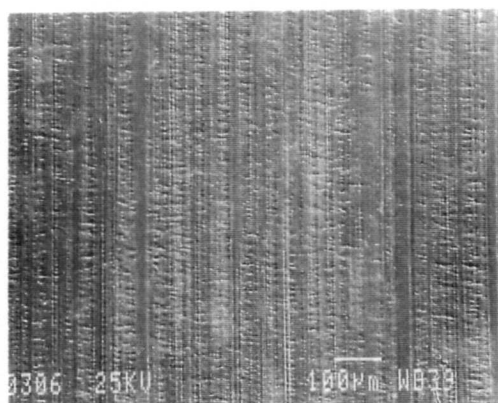
Die folgenden Bilder zeigen Aufnahmen der verschiedenen Oberflächentopographien mit dem Rasterelektronenmikroskop, jeweils von der Ober- und der Unterseite des Bleches, wobei diesen die Typen "rillig gleichgerichtet", "rillig sich kreuzend" und "muldig" zugeordnet werden können.

*Oberseite*

*Unterseite*

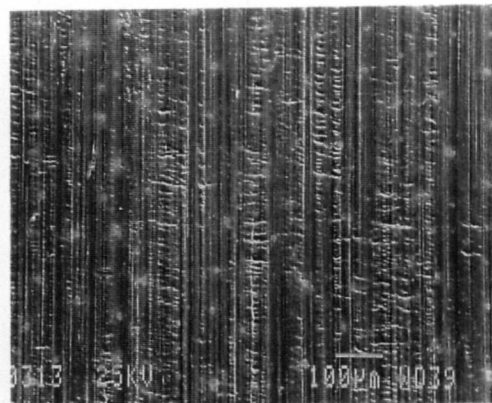
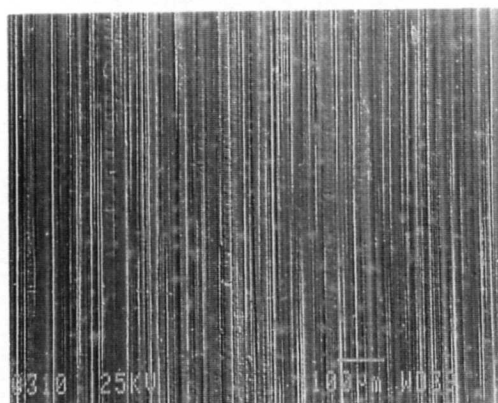
Rillig,  
gleich-  
gerichtet

Typ: MA



Rillig,  
gleich-  
gerichtet

Typ: M1

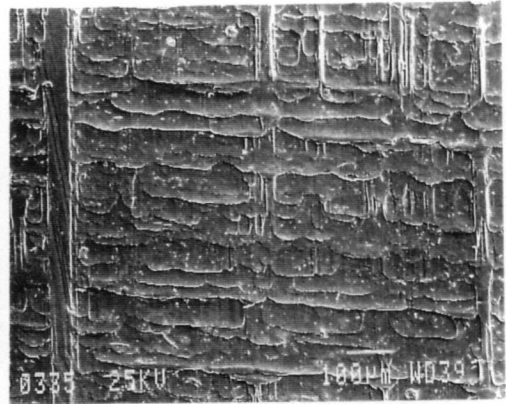
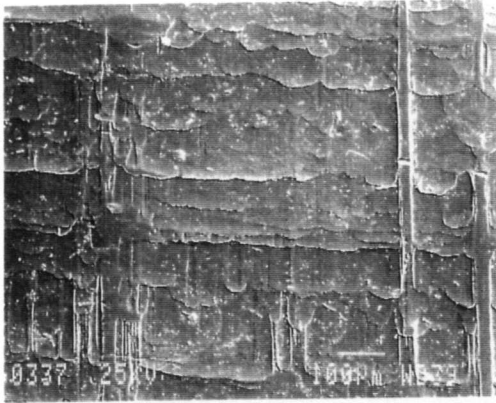


*Oberseite*

*Unterseite*

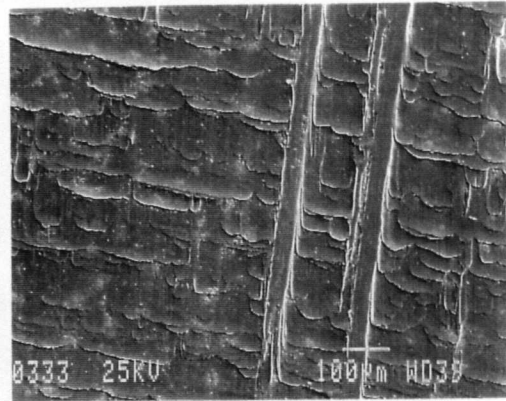
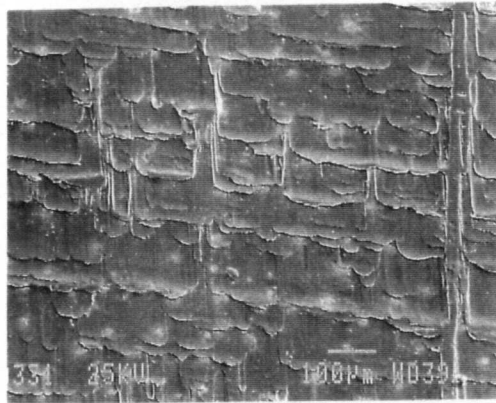
Rillig,  
sich kreuz-  
zend

Typ: IAF



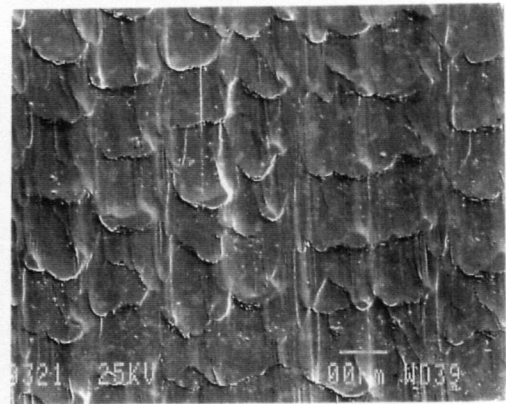
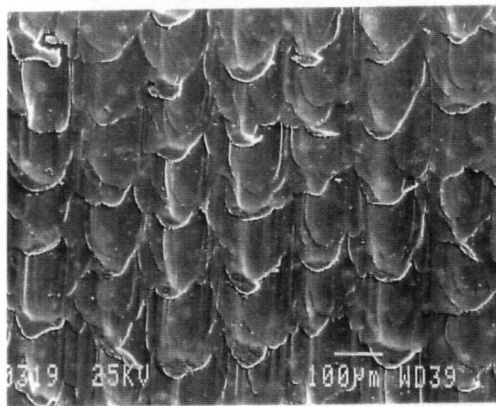
Rillig,  
sich kreuz-  
zend rauh

Typ: IAR



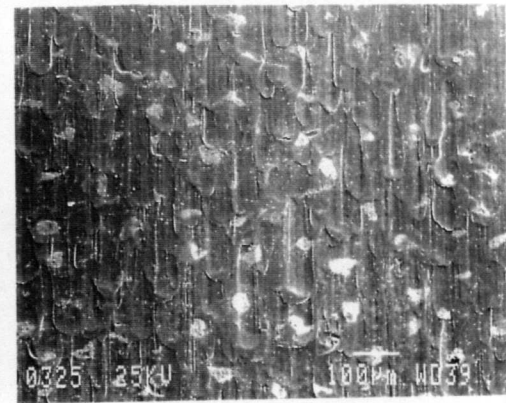
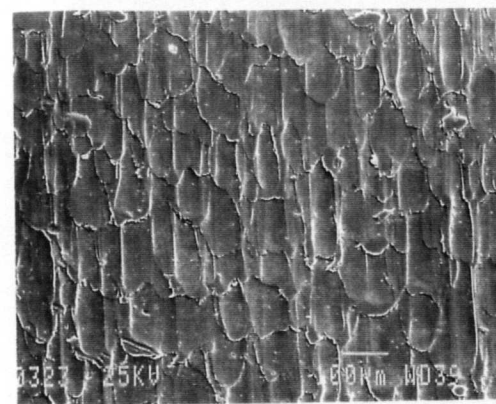
Muldig

Typ: LA



Muldig

Typ: L1

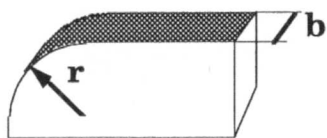


**Bild 58 bis 64:** REM-Aufnahmen der realen Blech-Ausgangsoberflächen

Wie bereits beschrieben, bestimmt der Herstellungsprozess der Walze die Charakteristik der Ausgangsoberflächen. Die Walze zur Herstellung der rilligen Qualitäten wird durch Umfangsschleifen bearbeitet. Die "rillig gleichgerichtete" Struktur wird durch einfaches Überschleifen der Walze, die "rillig sich kreuzende" Struktur durch einen Kreuzschliff erzeugt. Die Walzen zur Herstellung der "muldigen" Strukturen werden durch Laserpulsen präpariert. Weitere Visualisierungen der Rauheiten mit Hilfe von Tastschnitten sind im Anhang angefügt.

#### 4.3.2 Werkzeug

Im Versuch werden Ziehkanten mit einer Breite  $b$  von 25 mm verwendet. Der Ziehkantenradius  $r$  wie auch der Werkstoff und die Oberflächenbearbeitung kann entsprechend realen Produktionsbedingungen beliebig variiert werden.



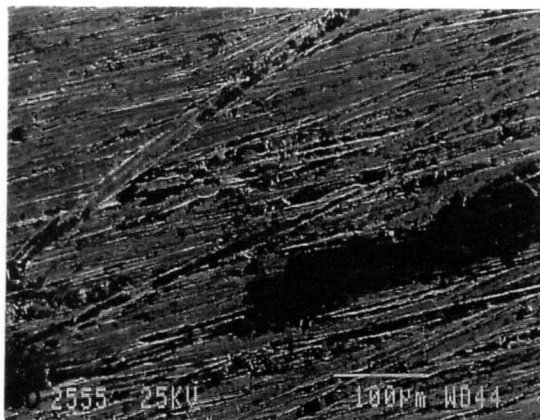
Ziehkantengeometrie

Radius:  $r$

Breite :  $b$

**Bild 65:** Geometrie der Ziehkante im Streifenziehversuch mit Umlenkung

Für alle später dargestellten Versuche wird eine in Zugrichtung geschliffene Kante mit einem Radius von 10 mm verwendet.



**Bild 66:** REM-Aufnahme der Ziehkantenrundung. Oberfläche: geschliffen, Material: GG-25, Kantenradius: 10 mm

Die Kante besteht aus GG-25 und hat die folgende chemische Zusammensetzung:



C	Mn	Si	P	S
3.2 %	0.75 %	1.9 %	0.1 %	0.1 %

**Bild 67:** Chemische Zusammensetzung des verwendeten Versuchswerkzeuges

### 4.3.3 Zwischenstoff

Durch den Einsatz eines bestimmten Zwischenstoffes können die Eigenschaften des Reibsystems gezielt beeinflusst werden.

Die am Umformteil zonenspezifisch geforderten hohen Reibbeiwerte können durch einfache Massnahmen, wie Reduzierung der Schmierfilmdicke, Ziehwälste und grosse Niederhalterkräfte, erreicht werden. Minimale Reibbeiwerte werden durch die Verwendung geeigneter Oberflächenstrukturen oder entsprechender Zwischenstoffe, wie Ziehfolien oder legierte Schmierstoffe, erzielt. Das Entfernen der Zwischenstoffschichten nach der Umformung ist meist sehr aufwendig und damit unwirtschaftlich. Im weiteren belasten die meisten Zwischenstoffe wegen ihrer zulegierten Additive sowie der beim Entfernen der Schichten verwendeten Lösungsmittel die Umwelt.

Der verwendete Zwischenstoff bestimmt neben den Reibpartnern, deren Oberflächenrauheiten sowie den Umformvariablen den Aufbau und die chemische Zusammensetzung der Grenzschichten. Da alle untersuchten Bleche aus demselben Werkstoff hergestellt sind, bei den Modellversuchen das gleiche Werkzeug und die gleichen Umformparameter gewählt werden, folgt, dass die induzierte Grenzschicht einzig von der Oberflächenrauheit abhängig ist. Daraus folgt weiter, dass der Aufbau und die Zusammensetzung der Grenzschicht und damit deren Einfluss auf das Reibverhalten der Reibpaarung für die weitere Auswertung nicht von Bedeutung ist. Das Reibverhalten des Systems wird somit neben der Zwischenstoffschichtdicke nur durch die Struktur der Werkstückoberfläche bestimmt.

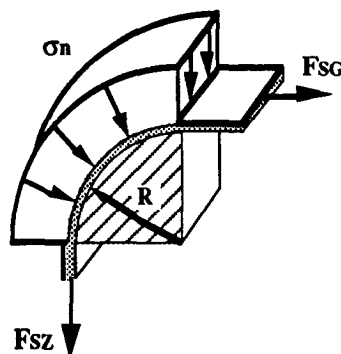
Normalerweise werden bei der Kaltumformung niedrigviskose Zwischenstoffe auf Mineralöl- oder Wasserbasis eingesetzt. Während bei den Zwischenstoffen auf Mineralölbasis neben den Additiven die im Vergleich hohe Viskosität des Trägerstoffes die Trenn- und Schmierwirkung stark beeinflusst, ist dieser Einfluss bei den verwendeten Emulsionen gering. Die durch das Wasser an der Reibfläche induzierte Schubspannung ist geringer und die Trennwirkung deutlich kleiner als beim Mineralöl.

Der Unterschied nimmt jedoch bei steigender Relativgeschwindigkeit wegen der steigenden Temperaturen an den Reibflächen ab. Der Grund da-

für liegt im stark temperaturabhängigen Viskositätsverhalten viskosen Mineralöls. Um diesen gegenläufigen Einflussmechanismen bei der Beurteilung der Oberflächenstruktur bezüglich des Reib- und Adhäsionsverhaltens Rechnung zu tragen, wurden Versuche mit Zwischenstoff auf Mineralölbasis wie auch als Emulsion durchgeführt.

Einen grossen Einfluss auf die Vorgänge an den Reibflächen hat die Dicke der Zwischenstoffschicht. Die Zwischenstoffmenge auf dem Blech selbst ist, wenn überhaupt, sehr schwer messbar.  $1 \text{ cm}^3$  Zwst pro  $1 \text{ m}^2$  entspricht einer Schichtdicke von  $1 \text{ }\mu\text{m}$ . Versuche haben gezeigt, dass die Zwischenstoffmenge graphimetrisch nur mit grosser Unsicherheit gemessen werden kann. Eine Aussage über die Homogenität der Verteilung auf der Werkstückfläche ist ebenfalls nicht zu gewinnen. Bei Schichtdicken im  $\mu$ -Bereich muss berücksichtigt werden, dass die flüchtigen Komponenten im Flüssigkeitsfilm sehr schnell verdampfen. Durch konstante Zykluszeiten bei der Versuchsdurchführung wurde diesem Umstand Rechnung getragen.

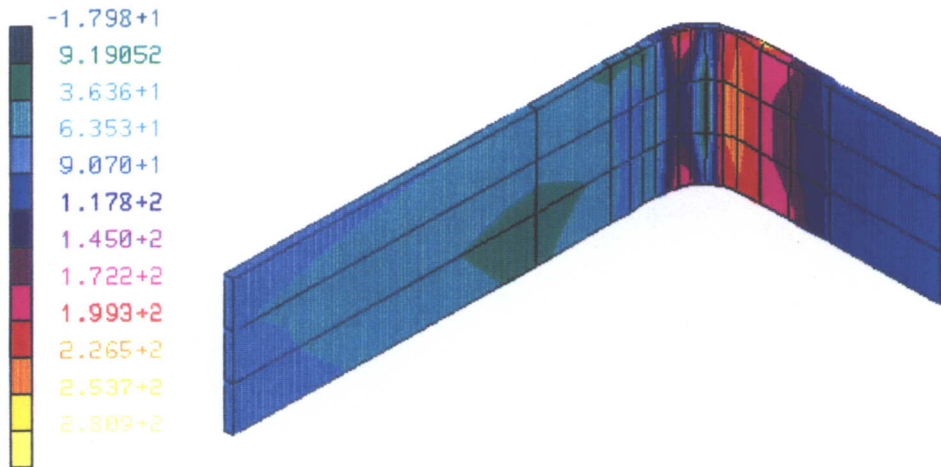
Um jeweils eine reproduzierbare, gleichbleibende Benetzung der Reibflächen zu gewährleisten, wurden die Proben vor dem Zwischenstoffauftrag mit Petrol-Äther gereinigt. Durch einen Roller wurde der Zwischenstoff gleichmässig auf die Probenoberfläche aufgetragen. Dass dieses Auftrageverfahren für die Zwischenstoffmenge im Ziehspalt beim durchgeführten Modellversuch nicht entscheidend ist, zeigen die folgenden Ausführungen. Beim Streifenziehversuch mit Umlenkung liegt die Spannungsverteilung in der Wirkfuge so vor, dass der Quotient der Kräfte eine mittlere Reibungszahl liefert. Die numerische Simulation des Versuches zeigt, dass der Druckverlauf über die Kantenrundung annähernd konstant ist und vom Kantenradius, von der induzierten Reibung und somit vom Reibsystem abhängt.



**Bild 68:** Normalkraftverteilung im Ziehspalt, schematisch

INCREM 31 SUBINC 0 TIME 8.970007

MENTAT

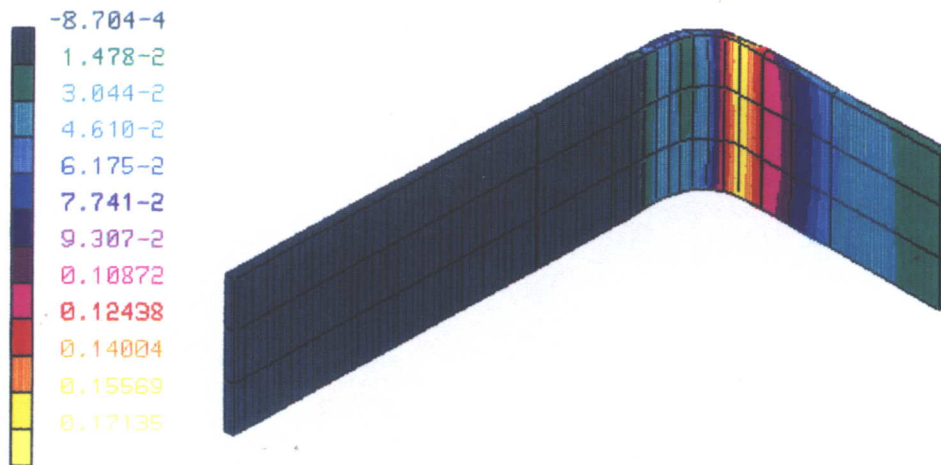


EQUIV MISES TENSILE STRS  
ORTHO U.P. -1.000 -1.000 1.0000

**Bild 69:** Spannungen im Bereich der Ziehkantenrundung, simuliert mit dem FE-Paket Marc

INCREM 40 SUBINC 0 TIME 1.1960+1

MENTAT



STREIFENZIEHVERSUCH  
TOTAL EQUIV PLASTIC STRN  
ORTHO U.P. -1.000 -1.000 1.0000

**Bild 70:** Dehnung im Bereich der Ziehkantenrundung, simuliert mit dem FE-Paket Marc

Im Bereich des Reibkontaktes steigt die Normalspannung sprunghaft von Null auf einen nahezu konstanten Wert an. Der niedrigviskose Zwst wird in Folge des Druckanstieges vor der Kontaktzone gestaut und wegen der

einfachen Krümmung der Ziehkante seitlich weggedrückt. Begünstigt wird das seitliche Wegfliessen des Zwst zusätzlich durch die bei der Biegung induzierte Aufwölbung des Streifens vor der Ziehkante. Diese "Zwischenstoffverdrängung" äussert sich in einem typischen Zwischenstofftropfen in der Zone des ersten Tribokontaktes. Auf Grund des im Streifenziehversuch zunehmenden Druckes an der Ziehkantenrundung während der Phase vor und in der Reibzone stellt sich somit eine Zwischenstoffdicke ein, welche etwa der Oberflächenrauheit und damit dem Leervolumen der rauhen Oberfläche entspricht. Vergleiche bestätigen, dass der Auftrag niedrigviskoser Zwischenstoffe unterschiedlicher Dicke keinen Einfluss auf die gemessenen Reibbeiwerte  $\mu_{sz}$  hat.

Zur Untersuchung des Reibverhaltens der Werkstückoberflächen wird als Zwischenstoff sowohl ein Ziehöl wie auch eine Emulsion verwendet. Als Ziehöl wird der in der Praxis verwendete Zwischenstoff *Anticorit 5080* mit einer Viskosität von  $145 \text{ mm}^2/\text{s}$  bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  eingesetzt. Als Emulsion wird der Hochleistungsziehschmierstoff *SK 255*, eine wässrige Emulsion mit einer Viskosität von  $35 \text{ mm}^2/\text{s}$  bei  $20^\circ\text{C}$  verwendet.

## 5 Reibung an realen Oberflächen

Bei der Untersuchung der Reibung realer Werkstoffe muss, wie bereits erläutert wurde, zwischen dem Reibverhalten der Bleche und der Adhäsion an Oberflächen unterschieden werden.

### 5.1 Reibverhalten

Im Reibkontakt entsteht die Reibkraft als Folge von Schubspannungen  $\tau$  an der Kontaktfläche von Werkzeug und Werkstück. Die Grösse der Schubspannung  $\tau$  hängt dabei stark von der Anpresskraft der beiden Gegenkörper, das heisst der mittleren Spannung in Normalenrichtung  $\sigma_n$  ab. Um die Resultate der verschiedenen Versuche miteinander vergleichen zu können, werden daher die auftretenden Reibschubspannungen auf die über die Reibzone gemittelte Normalspannung  $\sigma_n$  bezogen. Der Zusammenhang zwischen der Normalspannung, der Reibschubspannung, der Abflachung und entsprechend den definierten Oberflächenkennwerten am Beispiel des Flächentraganteiles  $t_{aa}$  ist im folgenden Bild schematisch dargestellt.

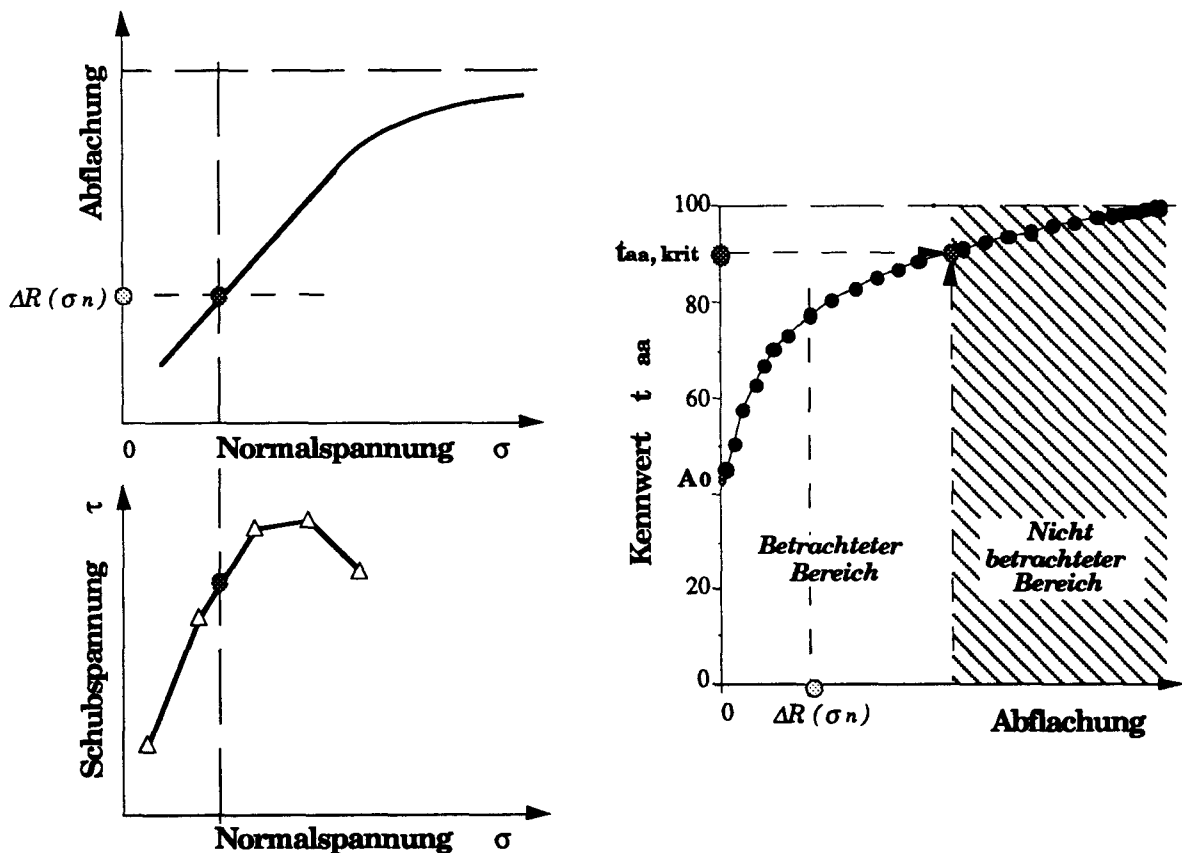
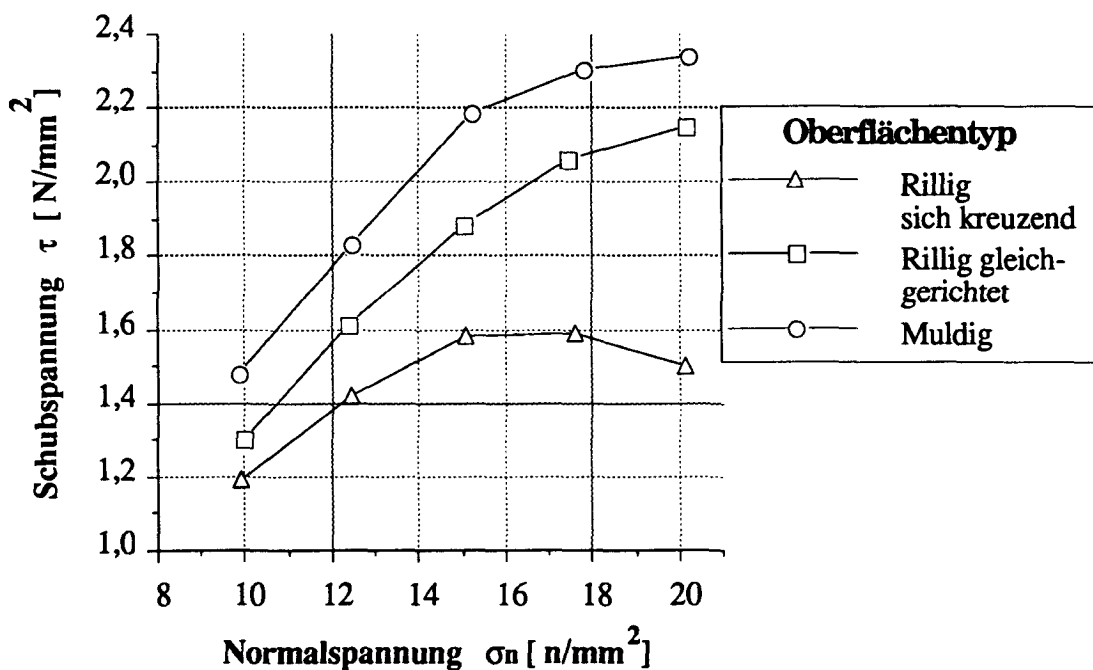


Bild 71: Schematischer Zusammenhang zwischen Schubspannung, Abflachung und Oberflächenkennwert (als Beispiel der Flächentraganteil  $t_{aa}$ )

Mit steigender Normalspannung nimmt die Abflachung zu. Entsprechend der Oberflächencharakteristik verändern sich auch die definierten Kennwerte, wie dies am Beispiel des Flächentrageanteiles  $t_{aa}$  dargestellt ist. Wegen dem Verfestigungsverhalten des Werkstoffes steigen dabei auch die lokal an den Mikrokontaktflächen wirkenden Normalspannungen  $\sigma_{n, \text{lokal}}$  an. Übersteigt diese lokale Normalspannung einen vom Zwischenstoff abhängigen Wert, so steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Grenzschicht versagt, sprunghaft an. Der kritische Punkt hängt dabei von den Umformvariablen  $v_{rel}$  und  $T$  sowie vor allem von der ungeschmierten Reiblänge, dem Wellenlängenverhältnis und dem reziproken Benetzungsdurchmesser ab. Entsprechend der während der Umformung auftretenden Deformation des Werkstückes wird bei der Beschreibung des Reibverhaltens zwischen undeformiertem (das heisst dem Ausgangswerkstoff) und dem deformierten Zustand des Bleches unterschieden. Zur Untersuchung des Reibverhaltens wird, um Adhäsionserscheinungen zu vermeiden, als Zwischenstoff das Ziehöl verwendet.

### 5.1.1 Ausgangsoberflächen

Das folgende Bild zeigt das Resultat der Reibuntersuchung mit dem Streifenziehversuch, bei welcher unverformte Proben verwendet werden.



**Bild 72:** Reibschubspannung der undeformierten Werkstoffe in Abhängigkeit der Flächenpressung, Ziehkantenradius: 10mm, Zwst: Anticorit 5080,  $v$ :0.2m/s, Vordehnung 0 %, Fahrdehnung 10 %

Die ermittelten Reibschubspannungen  $\tau$  sind für die verschiedenen Bleche unterschiedlich gross.

- *Diese unterschiedlichen Reibschubspannungen  $\tau$  sowie der Umstand, dass die weiteren Systemkomponenten und damit der molekulare Aufbau der Grenzschicht für alle untersuchten Bleche identisch sind, bestätigt die Annahme, dass das Reibverhalten nicht nur durch die atomare Struktur der metallenen Oberflächen, sondern massgeblich durch die Rauigkeit der Reibkontaktfläche bestimmt wird.*

Die Kurvenverläufe zeigen das nichtlineare, spannungsabhängige Reibverhalten der verschiedenen Oberflächentypen. Die "muldige" Oberfläche besitzt den grössten Flächentraganteil, gefolgt von der "rillig gleichgerichteten". Die "rillig sich kreuzende" Oberfläche weist einen deutlich kleineren Flächentraganteil auf als die anderen beiden Oberflächentypen. Die Höhe der Reibschubspannung der Oberflächen korreliert somit mit der Grösse des Flächentraganteiles.

Mit zunehmender Normalspannung werden die Rauheiten abgeflacht. Wie durch die numerische Simulation der unterschiedlichen Oberflächen im vorangegangenen Kapitel gezeigt wurde, bewirkt die Abflachung eine für den jeweiligen Oberflächentyp charakteristische Änderung der definierten Kennwerte, was durch den nichtlinearen, oberflächenspezifischen Anstieg der Reibschubspannungen bestätigt wird.

Weil sich die Rauheiten von untersuchten Blechen mit gleicher Charakteristik sowohl in Ebenen- wie auch in Tiefenrichtung unterscheiden, können keine direkten Aussagen über den Zusammenhang von Rauheit und der Höhe des Reibbeiwerts  $\mu_{sz}$  gemacht werden. Dazu wäre eine grosse Anzahl ähnlicher Probenoberflächen notwendig, welche sich nur bezüglich eines spezifischen Rauheitsmerkmals unterscheiden. Die möglichen Variationen von Rauheitsmerkmalen sind, wie im Kapitel mit der reiborientierten Oberflächenbeschreibung ausgeführt, die Änderung der Rauhtiefe unter Beibehaltung der Profilgestalt in Ebenenrichtung sowie die Änderung der Profilgestalt in Ebenenrichtung bei gleichbleibender Rauhtiefe. Da die Herstellung solcher Rauheiten bei gleichzeitig identischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes äusserst aufwendig und kostspielig ist, sind solche Platinen nicht erhältlich. Der absolute, für einen Umformzustand gemessene Reibbeiwert hängt entscheidend von verschiedenen Einflussgrössen, wie zum Beispiel der Relativgeschwindigkeit, der Art und Geometrie der Zwischenstoffschicht und der Temperatur des Werkzeuges, ab und kann in der Praxis entsprechend laufend

verändert werden. Sein Einfluss auf die Umformung ist daher relativ und wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht.

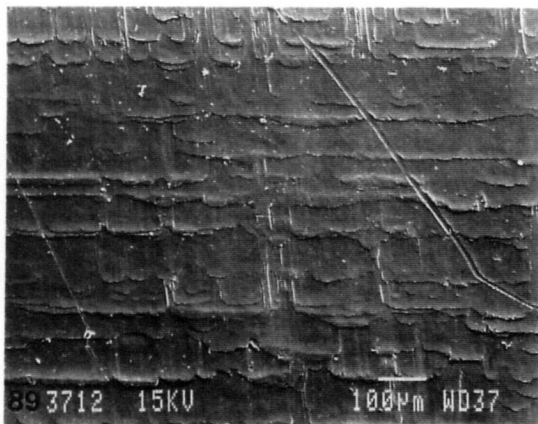
Da neben den auf die Rauheiten wirkenden Normalspannungen auch die Deformation des Werkstoffes zu einer Änderung der definierten Kennwerte führt, ist auch bei den deformierten Proben ein für die Oberflächencharakteristik typisches Reibverhalten zu erwarten. Dieses von der Deformation des Werkstoffes abhängige Reibverhalten soll im folgenden Kapitel untersucht werden.

### 5.1.2 Oberflächen während der Umformung

Für die Deformationsverteilungen und damit die Umformbarkeit des Werkstückes ist, neben dem Adhäsionsverhalten der unterschiedlichen Oberflächentypen, die lokal wirkende Reibschubspannung  $\tau$  entscheidend. Da die Reibschubspannung  $\tau$  von der Normalspannung  $\sigma_n$  und damit vom lokalen Deformationszustand des Werkstückes abhängt, muss neben dem Reibverhalten des Bleches im Ausgangszustand dasjenige bei unterschiedlichen Deformationszuständen  $\epsilon_{ij}$  bestimmt werden. Die lokal auftretenden Spannungen  $\sigma_{ij}$  und Temperaturen  $T_{ij}$  sind dabei von den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Systemkomponenten abhängig. Die folgenden REM-Bilder zeigen die Rauheit der Oberfläche vor und in der Reibzone für verschiedene Deformationszustände bei ähnlichen Normalspannungen am Beispiel der "rillig sich kreuzenden" Oberfläche.

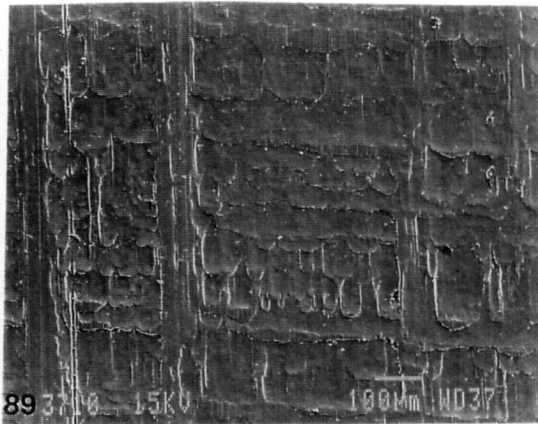
*Vor Reibkontakt*

$$\epsilon_v^0 \approx 0\% \quad \sigma_n = 0. \text{ N/mm}^2$$



*In Reibkontakt*

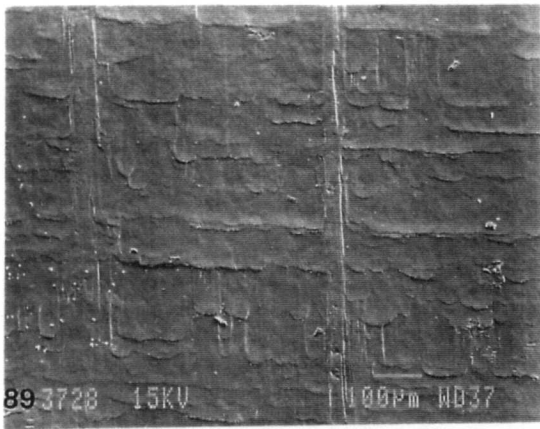
$$\epsilon_v \geq \epsilon_v^0 \quad \sigma_n = 20 \text{ N/mm}^2$$



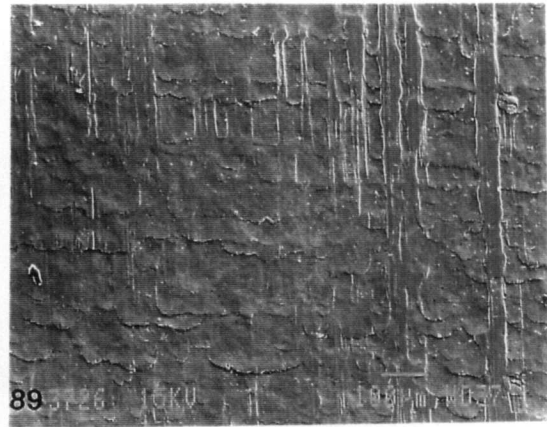
$$\mu_{sz} = 0.075$$



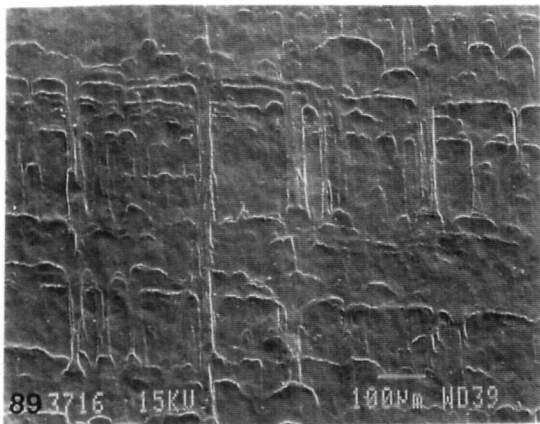
$$\varepsilon_v^0 \approx 10\% \quad \sigma_n = 0. \text{ N/mm}^2$$



$$\varepsilon_v \geq \varepsilon_v^0 \quad \sigma_n = 27 \text{ N/mm}^2$$

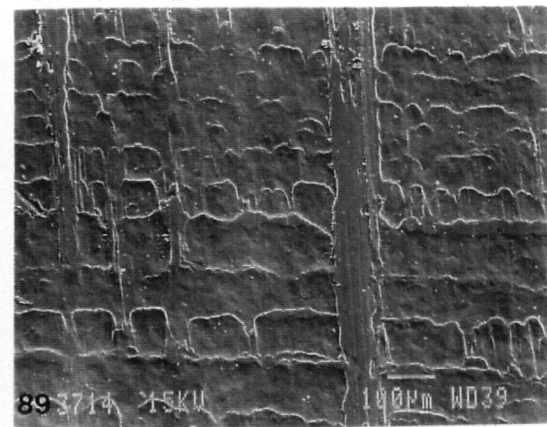


$$\varepsilon_v^0 \approx 20\% \quad \sigma_n = 0. \text{ N/mm}^2$$



$$\mu_{sz} = 0.051$$

$$\varepsilon_v \geq \varepsilon_v^0 \quad \sigma_n = 27 \text{ N/mm}^2$$



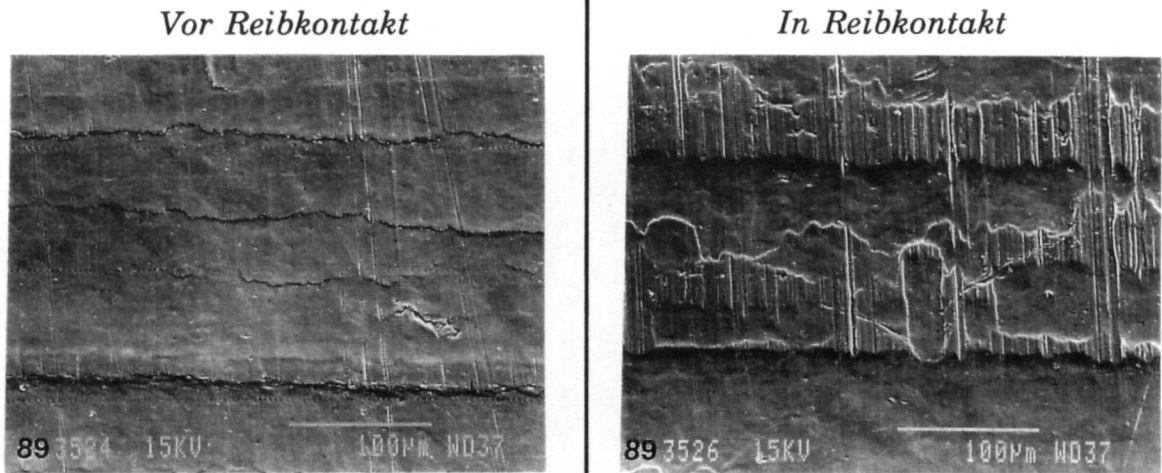
$$\mu_{sz} = 0.070$$

Bild 73 bis 78: Aluminiumoberfläche, Typ rillig sich kreuzend bei unterschiedlicher Deformation  $\varepsilon_{ij}$  und ähnlicher Flächenpressung  $\sigma_n$ . Zwst: Pfinders SK255, Relativgeschwindigkeit 0.2m/s, Kantenradius 10mm, Wz: GG25, geschliffen

Die Bilder auf der linken Seite zeigen die Änderung der Rauheit bei freier Umformung. Die Bilder der rechten Seite zeigen die entsprechende Rauheit in der Reibzone bei gleicher Flächenpressung. Es ist leicht einzusehen, dass für die lokal am Blech wirkende Reibkraft die entsprechende lokale Rauheit direkt vor der Reibzone und nur indirekt diejenige der Ausgangsoberfläche entscheidend ist, denn die lokale Rauheit bestimmt die Geometrie der Mikrokontaktflächen [Ishigaki 1978, Yamaguchi 1987]. Die Ausgangsoberfläche bestimmt jedoch die Charakteristik der Rauheit, welche durch freie Umformung der Bleche nicht verändert wird. Die Aufrauung der Blechoberflächen ist im Anhang durch Tastschnitte dargestellt.

### 5.1.2.1 Rillig gleichgerichtete Oberflächenstruktur

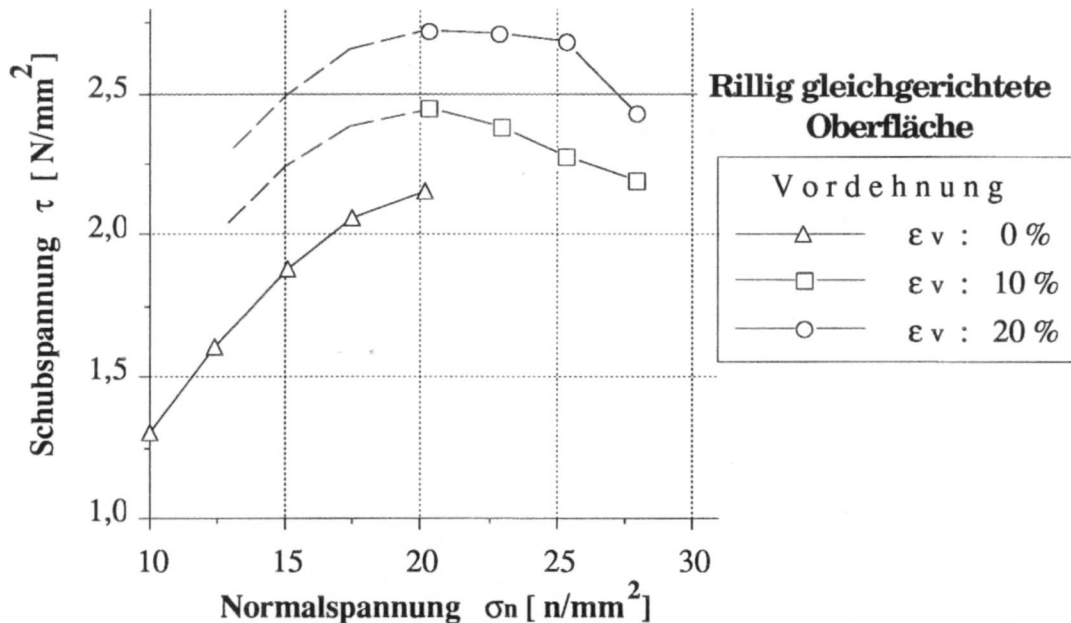
Die folgenden REM-Aufnahmen zeigen rillig gleichgerichtete Rauheitsstrukturen vor und in der Reibzone bei der Umformung.



**Bild 79, 80:** REM-Aufnahme der rillig gleichgerichteten Oberflächen,  $\epsilon_v$ : 20%.  $\sigma_n$ : 25 N/mm<sup>2</sup>. Zwst: Pfinders SK255,  $v$ : 0.2 m/s, Kantenradius 10mm, Wz: GG25

Die Abflachung der Strukturen, wie sie bereits in der Simulation eingeführt wurde, bildet linienförmige Kontaktflächen.

Im folgenden Bild ist das Reibverhalten der rillig gleichgerichteten Rauheit bei unterschiedlicher Deformation des Grundwerkstoffs und der Verwendung von Mineralöl als Zwischenstoff dargestellt.



**Bild 81:** Reibschubspannung der "rillig gleichgerichteten" Oberfläche M1 in Abhängigkeit der Deformation und der Flächenpressung, Zugrichtung =

Mit zunehmender Deformation des Werkstoffes und zunehmender Normalspannung steigen die Reibschubspannungen stark an. Dieses Verhalten ist auf die deformationsinduzierte Rauheitsänderung zurückzuführen.

Bei der rillig gleichgerichteten Oberfläche wird durch die Abflachung vor allem das Leervolumen verringert, während der Flächentraganteil, die Reiblängen, das Wellenverhältnis und der reziproke Benetzungsdurchmesser wenig verändert werden. Durch die Deformation des Werkstoffes wird die Wellenlänge der Werkstückoberfläche quer zur Walzrichtung proportional vergrößert. Dies äussert sich in einem steigenden Wellenverhältnis und, in Kombination mit den grossen, teilweise nicht begrenzten Reiblängen, einem vergrößerten Flächentraganteil. Das geringe Leervolumen der Oberflächen führt in Kombination mit den grossen ungeschmierten Reiblängen dazu, dass trotz der Abflachung die Benetzung der neugebildeten Oberflächen gering ist. Der Zwischenstoffilm an den Mikrokontaktflächen wird mit zunehmender Deformation dünner, was, verstärkt durch die grösseren Normalspannungen, zu lokal höheren Schubspannungen und damit zu einem Anstieg der Reibkraft führt. Diese Effekte sind auf die durch die Deformation induzierten Rauheits- und Spannungsänderungen in der Reibkontaktzone zurückzuführen. An der "rillig gleichgerichteten" Oberfläche entstehen zudem wegen der gerichteten Struktur mit kleiner Periode keine hydrodynamischen Effekte. Dass an der Werkstückoberfläche keine Verschleisspuren auftreten, ist daher auf die gute Trennwirkung des Schmieröls durch seine hohe Viskosität zurückzuführen.

#### 5.1.2.2 *Rillig sich kreuzende Oberflächenstruktur*

Die REM-Aufnahmen der rillig sich kreuzenden Oberflächen vor und in der Reibzone verdeutlichen den Einfluss der Oberflächencharakteristik auf die Form der Mikrokontaktflächen.

Vor Reibkontakt



In Reibkontakt

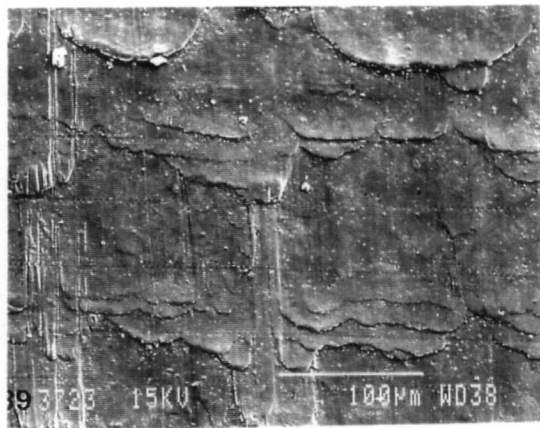


Bild 82, 83: REM-Aufnahme der "rillig sich kreuzenden" Oberfläche.  $\epsilon_v$ : 20%.  $\sigma_n$ : 25 N/mm<sup>2</sup>. Zwst: Pfinders SK255,  $v$ : 0.2 m/s, Kantenradius 10mm, Wz: GG25.

Die sich kreuzenden Rillen sind auch nach der starken Deformation des Grundwerkstoffes deutlich zu erkennen. In der Reibzone bilden sich die für diese Oberflächenstruktur typischen kurzen, gerichteten Mikrokontaktflächen aus.

Das Reibverhalten der "rillig sich kreuzenden" Oberflächen ist im folgenden Bild dargestellt.

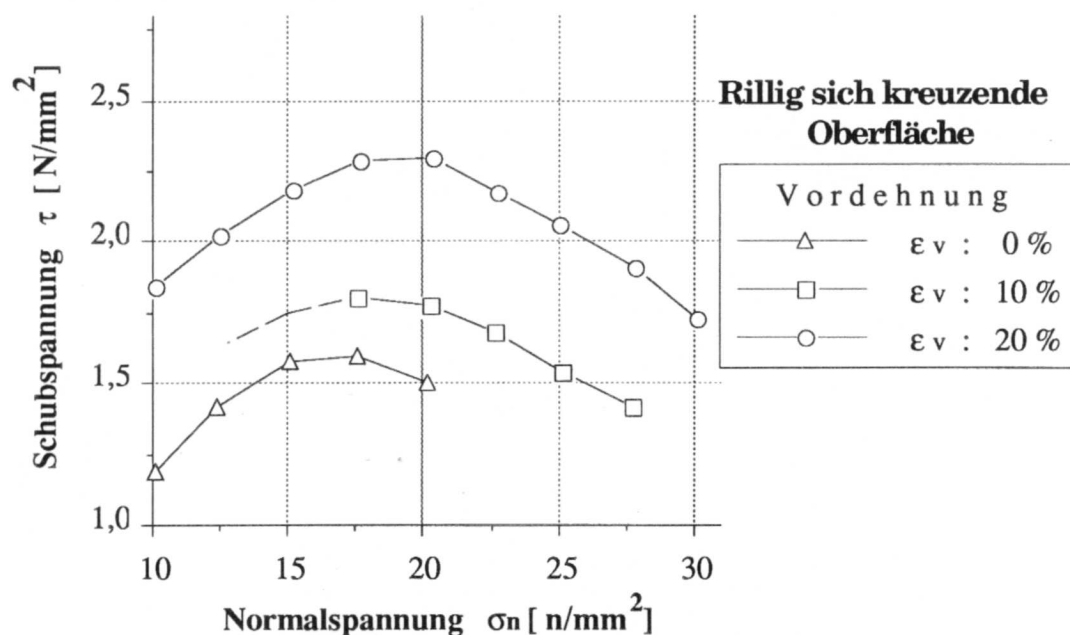


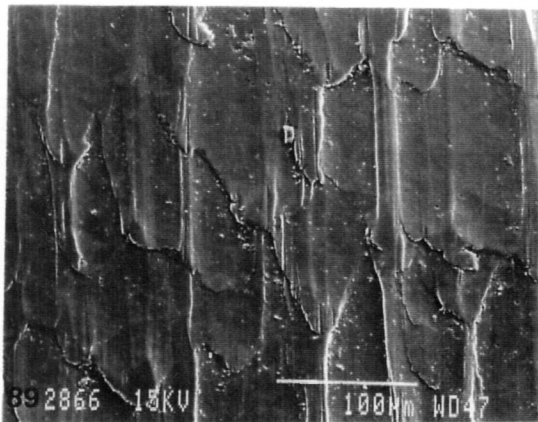
Bild 84: Reibverhalten der Streifenunterseiten der "rillig sich kreuzenden" Oberfläche IAR, Zugrichtung = WR, in Abhängigkeit der Deformation und der Flächenpressung. Zwst: Anticorit 5080,  $v$ : 0.2m/s, Vordehnung 0 bis 20%, Fahrdehnung 10%

Ähnlich wie bei der "rillig gleichgerichteten" Rauheit steigen die Reibschubspannungen mit zunehmender Deformation der Proben stark an. Dieser Anstieg ist einerseits die Folge der Vergrößerung der Wellenlänge, was zu einer Vergrößerung des Wellenlängenverhältnisses und damit zur Zunahme des reziproken Benetzungsdurchmessers führt. Dies verbessert zudem die Benetzbarkeit der Mikrokontaktflächen. Gleichzeitig wird jedoch der Flächentraganteil stark verändert, was zu einer Erhöhung der Oberflächenenergie führt. Dagegen wird die ungeschmierte Reiblänge durch die Deformation kaum verändert und bleibt bei der Zugrichtung immer klein. An der Werkstückoberfläche entstehen wiederum keine Verschleisspuren.

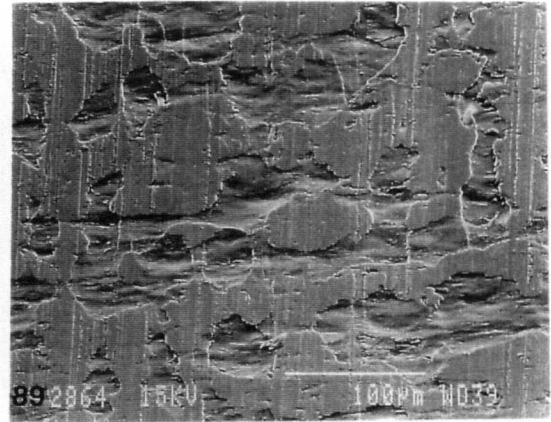
### 5.1.2.3 Muldige Oberflächenstruktur

Die "muldige" Struktur der Oberfläche wird im Reibkontakt, wie dies im Bild rechts der Fall ist, besonders deutlich.

*Vor Reibkontakt*



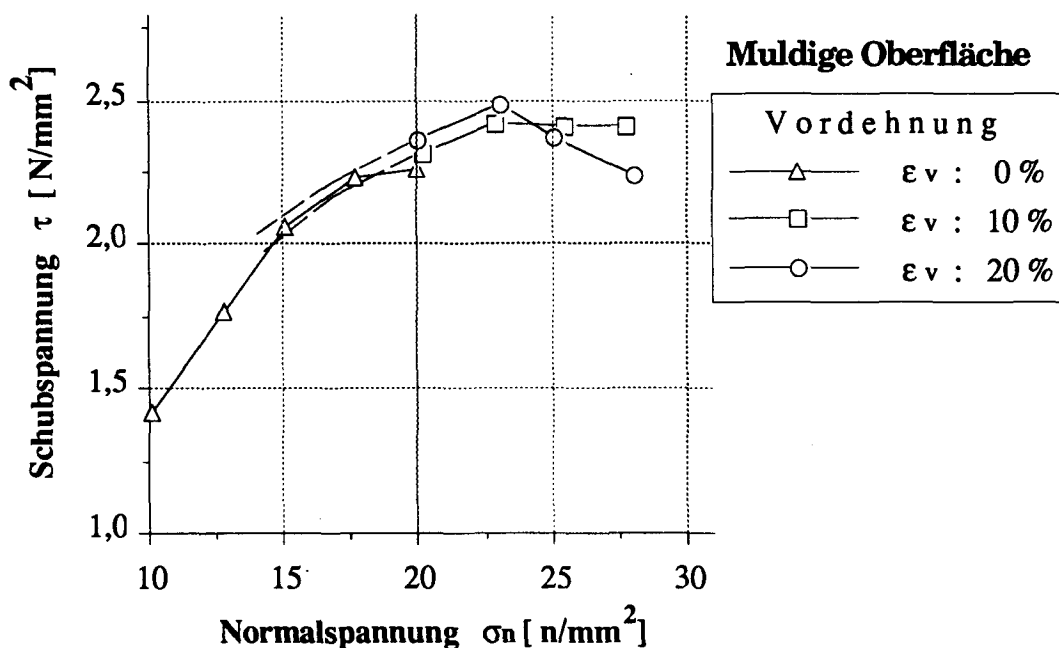
*In Reibkontakt*



**Bild 85, 86:** REM-Aufnahme der "muldigen" Oberfläche,  $\epsilon_v$ : 20%.  $\sigma_n$ : 25 N/mm<sup>2</sup>.  
Zwst: Pfinders SK255,  $v$ : 0.2 m/s, Kantenradius 10mm, Wz: GG25

In der Reibzone bildet sich die für diese Oberflächenstruktur typische, hochplateauartige, zusammenhängende Mikrokontaktfläche aus.

**Muldige Oberfläche; LA; Zugrichtung = WR**



**Bild 87:** Reibverhalten der Streifenunterseiten der muldigen Oberflächen bei *Zugrichtung in WR* in Abhängigkeit der Deformation und der Flächenpressung. Zwst: Anticorit 5080,  $v:0.2\text{m/s}$ , Vordehnung 0 bis 20%, Fahrdehnung 10%. (La)

Die "muldigen" Oberflächen zeigen ein Verhalten, das deutlich von demjenigen der "rilligen" Oberflächentypen abweicht. Die Abhängigkeit der Reibschubspannung von der Flächenpressung bleibt erhalten, während die Deformation des Grundwerkstoffes keinen weiteren Einfluss auf die Höhe der Reibkraft mehr hat. Dieses deformationsunabhängige Reibverhalten ist auf die Grösse und die Geometrie der Kontaktfläche zurückzuführen. Der bereits im Ausgangszustand des Bleches grosse Flächenanteil bewirkt auch bei grossen äusseren Normalkräften nur kleine lokale Normalspannungen an Mikrokontaktflächen. Aus diesen kleinen lokalen Normalspannungen resultiert das reduzierte Einebnungspotential der Rauheiten, welches keine Änderungen der definierten Kennwerte im Reibkontakt und damit des Reibverhaltens zulässt.

Durch die bei der Deformation des Grundwerkstoffes auftretende Aufrauung wird das bereits im Ausgangszustand bestehende Hochplateau in Form einer grossen zusammenhängenden tragenden Fläche kaum aufgelöst. Aus diesem und den oben beschriebenen Gründen ist die Grösse und Geometrie der Kontaktfläche und damit der definierten Kennwerte nur marginal von der Deformation abhängig. Das Reibverhalten respektive die Grösse der Reibkraft wird somit massgeblich durch die Geometrie der Ausgangsoberfläche bestimmt.

## 5.2 Übergangsbereich zum Adhäsionsverhalten

Durch die Verwendung von niedrigerviskosem Zwischenstoff, zum Beispiel von Emulsion, werden die Reibkräfte an der Werkstückoberfläche normalerweise verringert. Dieser Umstand ist auf die geringere Viskosität der wässrigen Emulsion und damit die kleineren Scherspannungen in der Zwischenschicht zurückzuführen. Gleichzeitig verringert sich jedoch wegen der geringeren Druckbeständigkeit auch die Dicke der Zwischenschicht. Dies führt zu erhöhten Anforderungen an die Beständigkeit der Grenzschicht im Reibkontakt zur Vermeidung von Adhäsionserscheinungen.

Das folgende Bild zeigt die Gegenüberstellung der Resultate des Streifenziehversuches mit Öl und Emulsion als Zwischenstoff.

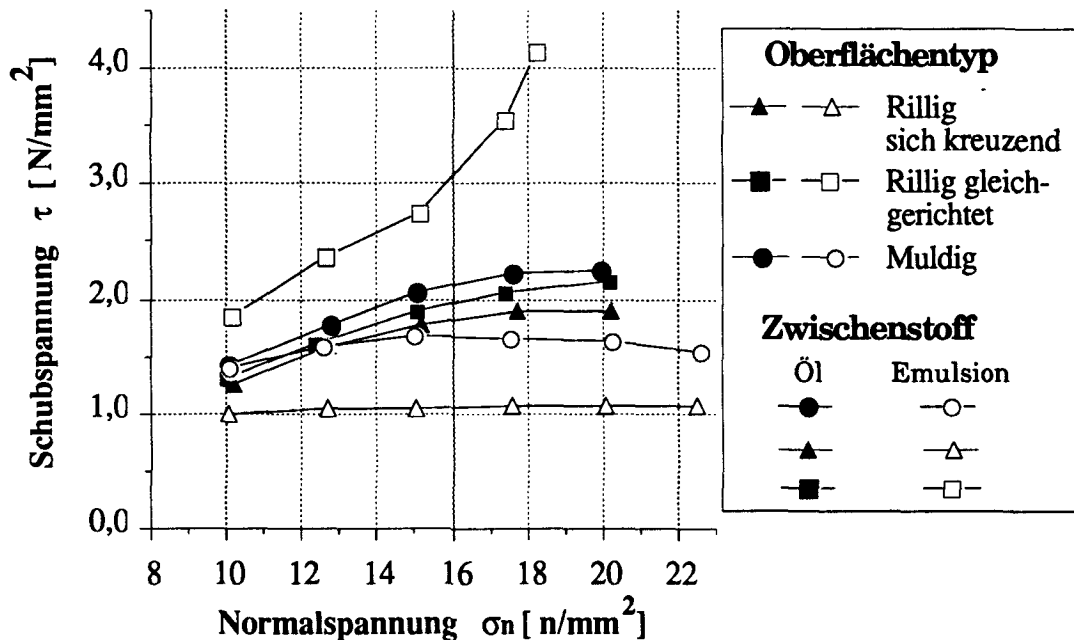


Bild 88: Reibschubspannungen in Abhängigkeit der Deformation und der Flächenpressung bei der Verwendung von Öl und Emulsion als Zwischenstoff. Zwst: Öl: Anticorit5080, Emulsion: SK255, Vordehnung 0, Fahrdehnung 10%

Die Vergleiche der Versuche mit unterschiedlichem Zwischenstoff zeigen, dass an den "rillig sich kreuzenden" und den "muldigen" Oberflächen bei der Verwendung von Emulsion geringere Reibschubspannungen auftreten als bei der Schmierung mit Ziehöl. Bei der "rillig gleichgerichteten" Rauheitsstruktur nehmen die Reibschubspannungen jedoch mit grösser werdender Normalspannung überproportional zu und übersteigen die mit dem Ziehöl erreichten Werte.

Die Untersuchung der Reibflächen nach der Reibzone zeigt, dass bei der "rillig gleichgerichteten" Oberfläche, im Gegensatz zu den "rillig sich kreuzenden" und den "muldigen" Strukturen, Adhäsionserscheinungen in Form von Kohäsion auftreten. Der Grund für den hohen gemessenen Wert der Reibschubspannung  $\tau$  liegt somit beim Versagen der Grenzschicht und den daraus resultierenden Adhäsionserscheinungen. Die entstehenden intermetallischen Bindungen zwischen Werkzeug und Werkstück bewirken an den Reibflächen einen hohen Anteil mechanischer Wechselwirkungen. Sie werden als Längsrinnen am streifenförmigen Werkstück sichtbar und als Riefen bezeichnet. An der Werkzeugoberfläche entsteht metallischer Auftrag. Entscheidenden Einfluss auf den Beginn der Adhäsionserscheinungen hat die niedrigere Viskosität und damit kleinere Tragfähigkeit des Zwischenstoffes. Die Trenn- und Schmierwirkung beruht weitgehend auf der durch den Zwischenstoff gebildeten Grenzschicht. Ihr Aufbau ist, neben den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Zwischenstoffes, von den lokalen Beanspruchungen, das heißt, vor allem von der Struktur der Werkstückoberfläche abhängig.

Aus der Riefenbildung resultieren in der Reibzone lokal stark unterschiedliche Reibschubspannungen, welche überwiegend durch die Geometrie und die Keimwirkung der Verschleissstelle bestimmt werden. Aussagen über das Reibverhalten der Oberflächenstrukturen sind somit nicht mehr möglich. Um den Einfluss der Oberflächenstruktur auf das Adhäsionsverhalten bestimmen zu können, wurde die Riefenbildung an den Probenoberflächen, wie dies im folgenden Kapitel beschrieben wird, quantifiziert. Dies ist wichtig, da neben den Reibkräften am Umformteil der Verschleiss an den Reibflächen die Qualität des Umformteiles bestimmt.

Die Diskussion der gemessenen Reibbeiwerte  $\mu_{sz}$  zeigt, dass im Rahmen der Reibuntersuchung das Adhäsionsverhalten einen wesentlichen Aspekt darstellt. Eine Klassifizierung des Adhäsionsverhaltens ist, wie im folgenden Kapitel beschrieben, durch die Einführung der Parameter Riefenzahl und Riefenart möglich.

### **5.3 Adhäsionsverhalten**

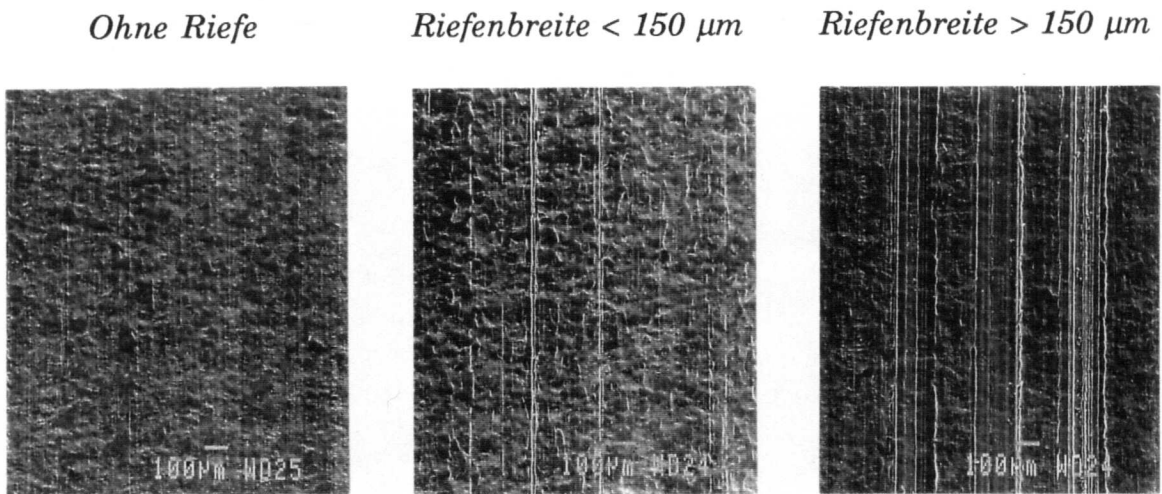
An den Reibflächen treten komplexe Reibzusammenhänge auf. Sie sind die Folge der  $\eta$ - $p$ - $T$ -Abhängigkeit der Zwischenstoffeigenschaften, der  $\epsilon$ - $\dot{\epsilon}$ - $\sigma$ - $T$ -Abhängigkeit der Eigenschaften des Werkstückwerkstoffes sowie der



davon abhängigen Reaktivität des Tribosystems. Im Reibkontakt tritt neben Flüssigkeitsreibung auch Grenzreibung auf. Versagt die Grenzschicht, so entstehen an der Oberfläche Adhäsionserscheinungen durch Kohäsion. Die Anzahl, die Verteilung sowie die Geometrie der dabei am Werkstück entstehenden Riefen ist von der Beanspruchung, dem atomaren Aufbau der Kontaktflächen und der durch die Kennwerte beschriebenen Rauheit abhängig. Im weiteren haben Fehler in der Mikrorauheit, der Kornstruktur, chemisch unterschiedlich reaktive Bereiche sowie die Veränderungen der Oberflächenenergie als Folge der Deformation des Grundwerkstoffes Einfluss auf die Riefenbildung. Da Adhäsionserscheinungen nur stochastisch erfasst werden können, werden zu ihrer Quantifizierung die Anzahl und die Geometrie der an der Streifenoberfläche auftretende Riefen beurteilt und gewichtet. Dabei wurde die folgende Konvention festgelegt:

$$\begin{array}{lll}
 \text{Riefen:} & \text{Breite} > 150 \mu\text{m} & \rightarrow (R_b = 3) \\
 & \text{Breite} < 150 \mu\text{m} & \rightarrow (R_b = 2), \\
 \text{Ohne Riefen} & & \rightarrow (R_b = 1).
 \end{array} \quad (5.1)$$

In den folgenden Bildern sind REM-Aufnahmen der unterschiedlichen Riefengrößen gezeigt.



**Bild 89 + 91:** Richtreihe der Adhäsionserscheinungen an den Oberflächen. Unterscheidung der Riefenstärke, ermittelt mit dem Streifenziehversuch. Zwst: Pfinders SK255,  $v$ : 0.8 m/s, Kantenradius 10mm, Wz: GG25

Da die Struktur der Oberfläche, speziell die ungeschmierte Reiblänge, das Wellenverhältnis und der reziproke Benetzungsdurchmesser einen Einfluss auf die Bildung der Adhäsionserscheinung haben, wurde zusätzlich die Riefengeometrie über den Ziehweg verfolgt und folgendermassen ge-

wichtet:

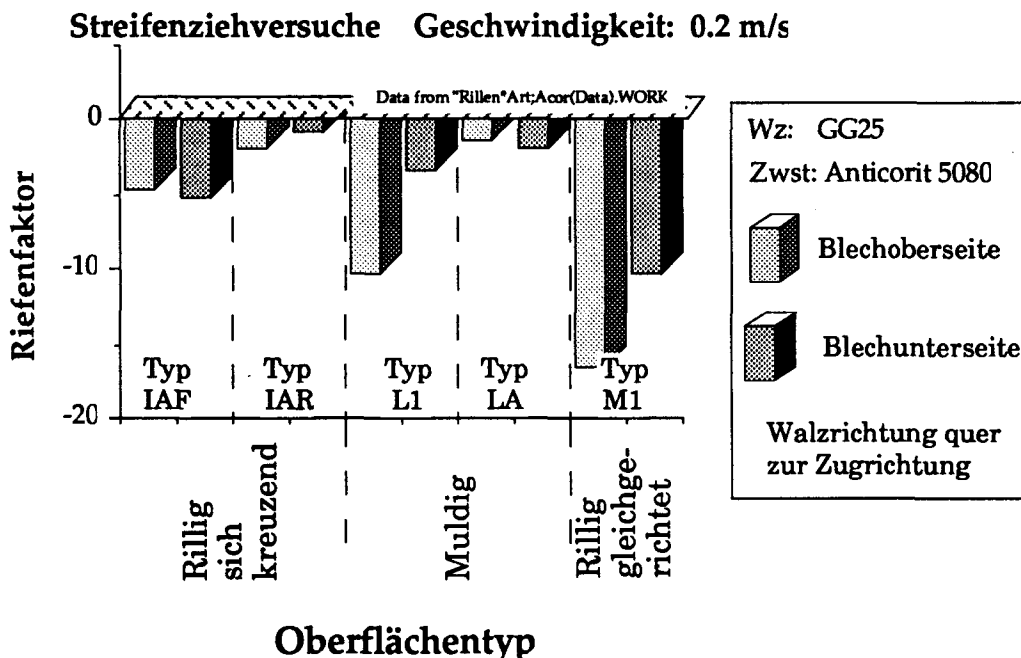
*Riefengeometrie über den Ziehweg*

$$\begin{aligned}
 & \text{zunehmend} && -> && (R_g = 3), \\
 & \text{gleichbleibend} && -> && (R_g = 2) \text{ oder} \\
 & \text{abnehmend} && -> && (R_g = 1)
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Als Riefenfaktor  $R_{Adh}$  wurde die Summe der beiden Faktoren multipliziert mit der Riefenzahl  $N$  festgelegt:

$$R_{Adh} = - (R_b + R_g) * N_{Adh} \tag{5.3}$$

Der so definierte Riefenfaktor  $R_{Adh}$  soll dazu dienen, durch den Vergleich unterschiedlicher Oberflächenstrukturen Aussagen über die Adhäsionsneigung einer Oberfläche zu machen. Dabei wird der Mittelwert des in den Einzelversuchen ermittelten Riefenfaktors gebildet. Das folgende Bild zeigt das Resultat dieser Auswertung bei der Verwendung von hochviskosem Mineralöl als Zwischenstoff. Dabei werden die Resultate der oberen und der unteren Blechseite, welche jeweils dieselbe Oberflächencharakteristik aufweisen, einander gegenübergestellt. Die Relativbewegung erfolgt dabei quer zur Walzrichtung des Bleches.

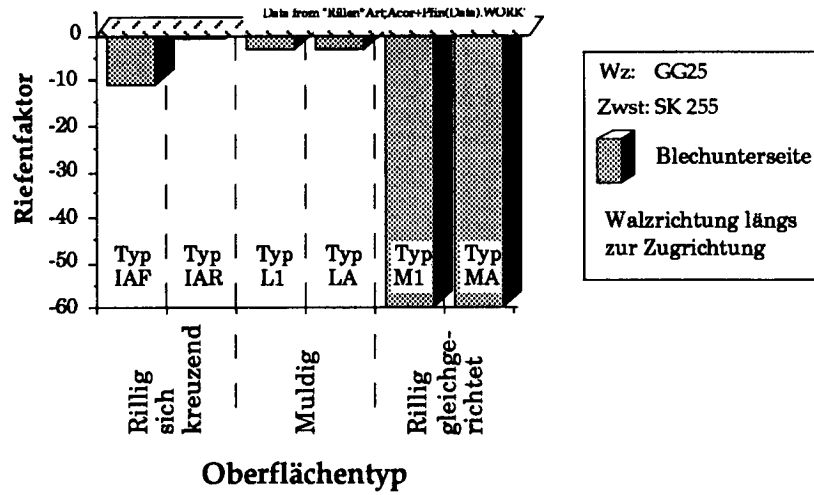


**Bild 92:** Adhäsionsverhalten der Blechoberflächen im Streifenziehversuch mit Umlenkung, dargestellt als Riefenzahl, gewichtet mit dem Riefenfaktor. Zwst: Anticorit 5080,  $v$ : 0.2 m/s,  $\epsilon_v = 0$  bis 20 %,  $\epsilon_f = 10$  %

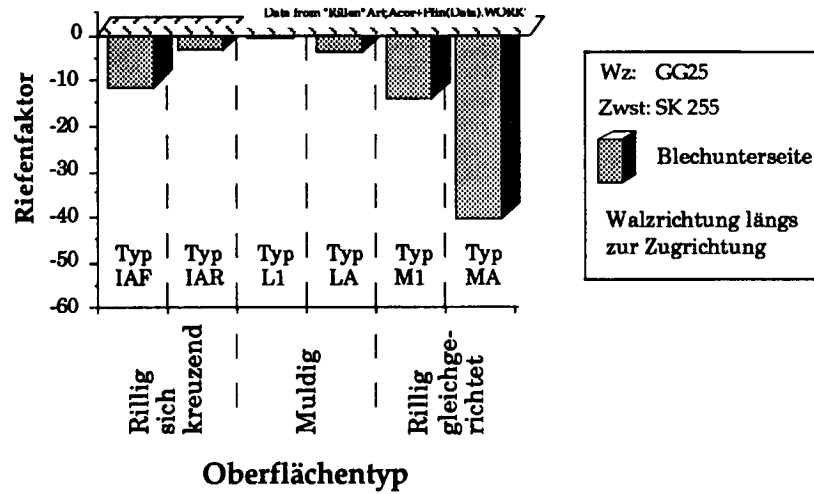
Die stärksten Adhäsionserscheinungen weisen die "rillig gleichgerichte-

ten" Oberflächen auf. Dies ist die Folge des Wellenverhältnisses  $\lambda_\alpha$  von eins zwischen Werkzeug und Werkstück, welches sowohl die Ober- wie auch die Unterseite des Bleches aufweist. Wie bereits beschrieben wurde, wird durch die Verwendung des hochviskosen Zwischenstoffes eine gute Trennwirkung erreicht, sodass bei den anderen Oberflächen die Grenzschicht meistens intakt bleibt und kaum Adhäsionserscheinungen auftreten. Daraus erklären sich die kleinen Riefenfaktoren der Oberflächen. Bei der Schmierung der Reibflächen mit Emulsion beruht, wegen der niedrigen Viskosität, die Trennwirkung der metallenen Kontaktflächen grösstenteils auf der Grenzschicht. Diese wird durch die dem Trägerstoff zulegierten Additive gebildet. Die Wirkung der Additive wird dabei stark durch die Grösse der Umformvariablen beeinflusst. In den folgenden Bildern sind darum neben den Riefenfaktoren der unterschiedlichen Oberflächen diejenigen der unterschiedlichen Relativgeschwindigkeiten einander gegenübergestellt.

Streifenziehversuche Geschwindigkeit: 0.04 m/s



Streifenziehversuche Geschwindigkeit: 0.2 m/s



Streifenziehversuche Geschwindigkeit: 0.8 m/s

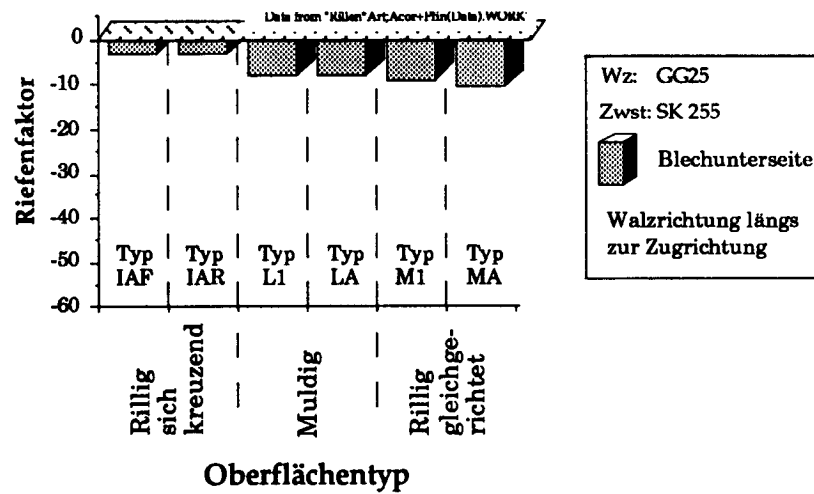


Bild 93 bis 95: Adhäsionsverhalten der Blechoberflächen im Streifenziehversuch mit Umlenkung, dargestellt als Riefenfaktor. Zwst: Pfinders SK255, v: 0.04 , 0.2 und 0.8 m/s,  $\epsilon_v = 0$  bis 30 %,  $\epsilon_f = 10$  %

Die Bilder zeigen deutlich, dass das Adhäsionsverhalten sowohl von der Oberflächenstruktur als auch der Relativgeschwindigkeit in der Reibzone abhängig ist. Die "rillig gleichgerichtete" Oberfläche weist die grösste Adhäsionsneigung auf. Im Gegensatz zur Verschieberichtung quer zur Walzrichtung, wo das Wellenlängenverhältnis von  $\lambda_\alpha=1$  für die grosse Adhäsionsneigung entscheidend war, resultieren bei der Verschieberichtung in Walzrichtung unbeschränkte ungeschmierte Reiblängen. Das kleine Leervolumen verhindert zusätzlich ein kontinuierliches Nachschmieren der Reibkontaktflächen. Dieser Effekt wird durch die Oberflächenvergrösserung als Folge der Deformation des Grundwerkstoffes weiter verstärkt. Aus diesen Gründen bewirkt die grosse ungeschmierte Reiblänge  $S_r$  während des Reibweges in der Ziehkantenrundung einen kontinuierlichen Abbau und damit die Zerstörung der Grenzschicht. Die im Versuch auftretenden intermetallischen Bindungen zwischen Werkzeug und Werkstück sind die unvermeidliche Folge. Die grosse Zahl der bei den "rillig geordneten" Oberflächen während des Versuches auftretenden Riefen lassen keine klare Zuordnung von  $\mu$ ,  $\epsilon$  und  $v$  mehr zu.

Auch die "muldigen" Oberflächen weisen nicht begrenzte ungeschmierte Reiblängen auf. Der Flächentraganteil wie auch das Wellenlängenverhältnis sind jedoch bei diesen Oberflächen deutlich grösser, so dass kleinere lokale Flächenpressungen und weniger Angriffsflächen für mechanische Wechselwirkungen vorhanden sind. Dies führt dazu, dass längere ungeschmierte Reibwege ohne Adhäsionserscheinungen bewältigt werden können, da die Grenzschicht weniger beansprucht wird. Der kleine reziproke Benetzungsdurchmesser ist darum nicht von entscheidender Bedeutung.

Die "rillig sich kreuzende" Oberfläche weist kaum Adhäsionsspuren auf. Obige Betrachtungen verdeutlichen die Überlegenheit der "rillig sich kreuzenden" Oberflächenstruktur mit begrenzten ungeschmierten Reiblängen, relativ kleinem Flächentraganteil, grossem Leervolumen, grossem reziprokem Benetzungsdurchmesser und unterschiedlichsten Wellenlängenverhältnissen.

Für die "rillig gleichgerichteten" wie auch die "muldigen" Oberflächen bestimmen somit die Eigenschaften des Zwischenstoffes die Länge des zulässigen Reibweges. Entscheidenden Einfluss hat dabei das Einebnungspotential der Rauheit, welches sich aus den definierten Kennwerten ableitet.

Die Erhöhung der Relativgeschwindigkeit zwischen der Werkstück- und der Werkzeugoberfläche bewirkt bei den "rillig gleichgerichteten" Oberflächen eine deutliche Verbesserung des Adhäsionsverhaltens. Generell

gilt, dass Oberflächen mit kleinem Leervolumen und sehr kleinem Wellenlängenverhältnis (rillig gleichgerichtete und rillig sich kreuzende Qualitäten) bei kleinen Relativgeschwindigkeiten (0.04 m/s) als ungünstig beurteilt werden müssen, starke Riefenbildung und ein hoher Reibbeiwert sind die Folge.

Mit steigender Ziehgeschwindigkeit verbessern sich die Adhäsionseigenschaften der "rillig gleichgerichteten" Oberflächen, was sich in weniger Verschleiss und einem sinkenden mittleren Reibbeiwert äussert. Die Rauigkeit der "rillig sich kreuzenden" rauhen Oberfläche unten erweist sich auch bei höheren Ziehgeschwindigkeiten als gut, während die "muldigen" Qualitäten als gleich bis schlechter eingestuft werden können. Im folgenden Bild ist der mittlere Riefenfaktor aus allen Versuchen mit der Emulsion für die einzelnen Oberflächentypen mit Zugrichtung längs zur Walzrichtung dargestellt.

Streifenziehversuche Geschwindigkeit: 0.04, 0.2 und 0.8 m/s

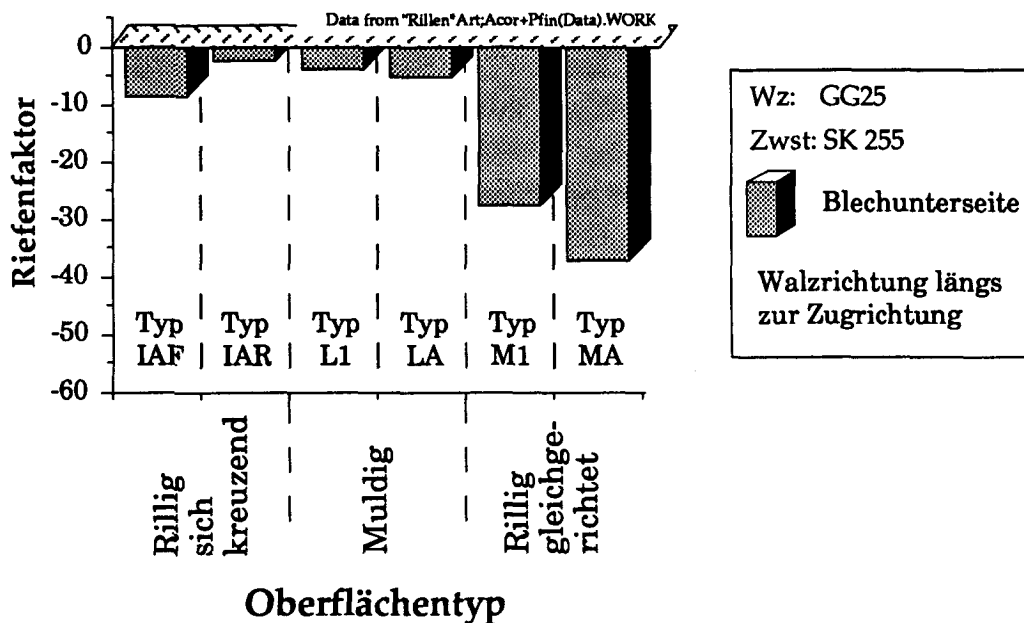


Bild 96: Adhäsionsverhalten aller Unterseiten der Blechoberflächen im Streifenziehversuch, dargestellt als Riefenfaktor, gemittelt über alle Geschwindigkeiten. Zwt: Pfinders Sk255, v: 0.04, 0.2 und 0.8 m/s,  $\epsilon_v = 0 + 30\%$ ,  $\epsilon_f = 10\%$

Die Versuche zeigen, dass das Adhäsionsverhalten eines Reibsystems von der Rauheit und der Charakteristik der Oberfläche wie auch vom Winkel der Relativbewegung zur Walzrichtung abhängt.

Die "rillig sich kreuzende" Oberflächenstruktur mit dem betragsmässig kleinsten Riefenfaktor erreicht über den gesamten Geschwindigkeitsbereich das beste Ergebnis. Die "muldigen" Oberflächen schneiden wenig

schlechter ab. Die "rillig gleichgerichteten" Qualitäten zeigen nur bei hohen Umformgeschwindigkeiten gute Ergebnisse. Aus den Untersuchungen folgt, dass für die Riefenbildung grosse ungeschmierte Reiblängen und Flächenpressungen, Wellenverhältnisse um 1 sowie kleine reziproke Benetzungsdurchmesser günstig sind.

## 6 Folgerungen aus den Untersuchungen unterschiedlicher Rauheitsstrukturen

Die Versuche bestätigen, dass die Variation der Rauheit eines Bleches unterschiedliche Reibeigenschaften induziert, welche bezüglich der Reibkraft sowie der Adhäsion optimiert werden können.

### 6.1 Optimierung des Reibverhaltens

Zur Beurteilung des optimalen Reibverhaltens kann nicht generell von einer minimalen Reibkraft ausgegangen werden. Die Optimierung der Reibeigenschaften muss auf die Umformung sowie das gesamte Umformteil bezogen werden. So ermöglichen zum Beispiel beim Tiefziehen grosse Reibkräfte in der Stempelrundung sowie kleine in der Zieh-ringrundung einen maximalen Gesamtumformgrad und damit eine optimale Ausnützung des Werkstoffes.

Das Reibverhalten der Bleche ist von der Rauheit zum Zeitpunkt der Kontaktbildung und nicht von der Oberflächenbeschaffenheit der undeformierten Probe im Ausgangszustand abhängig. Dies bedeutet, dass die während der Umformung stattfindende Rauheitsänderung bei der Optimierung des Reibverhaltens berücksichtigt werden muss. Die Optimierung des Reibverhaltens ist ein Kompromiss, welcher sowohl die Rauheitsänderung als auch die Anforderungen der Umformzone berücksichtigt. Aus der Variation der Systemkomponenten folgt sofort, dass nicht eine einzige, allgemein verwendbare, optimale Rauheit definiert werden kann. Die am besten geeignete Oberflächenstruktur wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, wie sie durch die definierten Kennwerte berücksichtigt werden. Bei der Variation der Grösse der verschiedenen Oberflächenparameter können folgende Aussagen gemacht werden. Ein kleines relatives Leervolumen  $\Delta XV_T$ , eine grosse Mittlere Ungeschmierte Reiblänge  $\bar{S}_R$ , ein grosser reziproker Benetzungsdurchmesser  $\varnothing_B$  und ein Wellenfaktor  $\lambda_\alpha=1$  wirken sich ungünstig auf das Reibverhalten aus. Ob die Parameter ungünstige Werte annehmen, hängt nicht nur von der Ausgangsoberfläche, sondern ebenfalls von der Umformgeschichte und den Reibkontaktpartnern ab. Wie die bereits ausgeführten Untersuchungen gezeigt haben, muss der gesamte am Realteil auftretende Variationsbereich der Umformvariablen berücksichtigt werden, denn

- *für das Reibverhalten in Abhängigkeit der Systemvariablen ist vor*



*allem die Oberflächencharakteristik massgebend.*

Die Rauheitsänderung im Reibkontakt, das heisst der Anteil der mechanischen und der molekularen Wechselwirkung hängt von der Zusammensetzung des Reibsystemes, speziell vom Grundwerkstoff des Werkstückes, vom Druck-Viskositäts-Temperaturverhalten des Zwst, der Reaktionsschichtbildung, der Art der Grenzschichten sowie den Systemparametern ab. Diese Abhängigkeiten komplizieren die Reibbeschreibung, da die am Umformteil auftretenden Deformationen  $\epsilon_{ij}$ , die Spannungen  $\sigma_{ij}$ , die lokale Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}$ , die Temperatur  $T$  wie auch die Änderung der Oberflächenmikrogeometrien von der Zone vor dem Reibkontakt zur Reibzone miteinander gekoppelt sind und das gesamte Umformsystem dynamisch beeinflussen. Aus den durchgeführten Streifenziehversuche folgt, dass die Reibschubspannungen rilliger Oberflächen stärker von der Deformation  $\epsilon_v$  abhängen, als dies bei nichtrilligen Oberflächen der Fall ist. Auf Grund dieser Messresultate kann angenommen werden, dass die Grösse der Rauheit der Ausgangsoberfläche die Höhe der Reibschubspannung und die Charakteristik der Oberfläche die Änderung der Reibschubspannung in Abhängigkeit der Deformation und der Flächenpressung bestimmt. Mathematisch lässt sich diese Abhängigkeit als

$$\mu = f(\overline{r_a(x)}, r_a(x), \epsilon_{ij}, \sigma_{ij}) \quad (6.1)$$

formulieren, wobei  $\overline{r_a(x)}$  die mittlere Rauhtiefe der Oberfläche ist. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je niedrigerviskos der verwendete Zwischenstoff ist.

Die geringsten Reibschubspannungen erreichen die Oberseiten der "rillig sich kreuzenden" Oberfläche des Typs IAR und derjenigen des Typs IAF, gefolgt von den Blechunterseiten der "rillig sich kreuzenden" Oberflächen der Typen IAR und IAF bei der Verwendung des Ziehöles als Zwischenstoff und geringer Deformation der Probe. Mit zunehmender Deformation des Werkstoffes steigen die Reibschubspannungen an diesen Oberflächen jedoch stark an. Da die Reibschubspannungen der "muldigen" Oberflächen keine Abhängigkeit vom Umformgrad der Probe zeigen, erreichen die an diesen Oberflächen wirkenden Reibkräfte bei grösseren Deformationen die geringsten Werte.

Der Vergleich der Versuche mit unterschiedlich deformierten Platinen zeigt, dass "muldige" Oberflächen mit grossem Flächentraganteil einen konstanten und - über der gesamten Umformung betrachtet - kleineren mittleren Reibbeiwert aufweisen als "rillige" Oberflächen. Aus diesem Verhalten folgt, dass

- *Platinen mit "muldigen" Oberflächen in Reibzonen mit grossen Umformgraden die Umformbarkeit des Werkstoffes verbessern können, wenn geringe Reibschubspannungen gefordert sind.*

Durch die Deformation des Werkstoffes, in unserem Fall durch einfache Dehnung, nimmt der Flächentraganteil, die ungeschmierte Reiblänge wie auch die Zwischenstoffmenge pro Flächeneinheit ab. Gleichzeitig nimmt die Wellenlänge und das Leervolumen zu. Die Versuche mit dem Streifenziehgerät zeigen, dass sich die Reibschubspannungen für alle Oberflächenstrukturen in Abhängigkeit der Flächenpressung verringern. Diese Tendenz kann bei allen Werkzeugwerkstoffe unabhängig vom Zwst (Öl oder Emulsion) und dem Material der Ziehkante beobachtet werden, solange keine Adhäsionserscheinungen auftreten.

## **6.2 Optimierung des Adhäsionsverhaltens**

Das Adhäsionsverhalten der Werkzeugoberfläche bestimmt massgeblich die Standzeit der Werkzeuge sowie, durch seine Kopplung mit den Reibschubspannungen, die Umformbarkeit des Blechwerkstoffes. Dies ist darum der Fall, weil die Riefen das Reibverhalten der Oberflächenstrukturen laufend verändern, was zur Destabilisierung der Umformung durch lokal sehr unterschiedliche Reibschubspannungen führt. Dies äussert sich in Abweichungen von der Sollgeometrie und dem frühen Versagen des Umformteiles. Im weiteren begünstigen diese Oberflächenfehler, wie *Hora [1990]* zeigte, das Werkstoffversagen und verschlechtern somit die Umformbarkeit des Werkstoffes.

Die Auswertung der Versuche führt zu folgenden Erkenntnissen:

- *Rillige Oberflächen ("gleichgerichtet" und "sich kreuzend") zeigen mit zunehmender Geschwindigkeit weniger Adhäsionsverschleiss.*
- *"Muldige" Oberflächen erzielen mit zunehmender Geschwindigkeit kein verbessertes Adhäsionsverhalten.*
- *Die "rillig sich kreuzenden" Rauheiten erreichen für alle untersuchten Geschwindigkeiten gleich gute Eigenschaften.*
- *Die Erhöhung der Viskosität des Zwst verbessert bei kritischen ("rilligen") Oberflächen die Umformeigenschaften deutlich.*

Eine Abhängigkeit der Riefenbildung von der Flächenpressung  $\sigma_n$  konnte

bei Aluminium nicht eindeutig festgestellt werden. Dies ist in der Tatsache begründet, dass Aluminium relativ weich ist. Die Riefenbildung ist neben dem Versagen der Zwischenstoffschicht und der Grenzschicht auf Mikrorisse in der Oberfläche und Abriebpartikel aus Al-Oxid zurückzuführen. Die durchgeführten Streifenziehversuche zeigen deutlich, dass der Reibbeiwert rilliger Oberflächen stärker von der Deformation  $\varepsilon_v$  abhängt, als dies bei nichtrilligen Oberflächen der Fall ist. Dieser Effekt wird umso deutlicher, je niedrigerviskos der Zwst ist. Bei der "rillig gleichgerichteten" Oberflächenstruktur treten dabei das ungünstige Wellenverhältnis ( $\lambda_\alpha \approx 1$ ) und das geringe relative Leervolumen  $\Delta XV_r$  als dominierende Reibwirkung auf, Phänomene also, welche die Adhäsionserscheinungen begünstigen. Bei der "muldigen" Oberflächenstruktur wirken sich die unbegrenzten ungeschmierten Reiblängen und der relativ geringe reziproke Benetzungsdurchmesser ungünstig auf das Adhäsionsverhalten aus. Ein hydrodynamischer Effekt bei grösseren Ziehgeschwindigkeiten, wie er bei "rilligen" Oberflächen auf Grund der gerichteten länglichen Oberflächenstrukturen entstehen kann, ist durch die fehlende Stauwirkung bei den "muldigen" Oberflächenstrukturen kaum möglich.

- *Werden hochviskose Zwischenstoffe verwendet, so verliert die Beschaffenheit der Oberfläche den dominanten Einfluss. Dies zeigt sich vor allem bei der unterschiedlichen Adhäsionsneigung im Tribokontakt der Oberflächentypen deutlich.*

### **6.3 Einfluss unterschiedlicher Grundwerkstoffe**

Die aus den Untersuchungen abgeleiteten Schlüsse haben auch für andere metallische Grundwerkstoffe, wie zum Beispiel Normalstahl, Gültigkeit, wenn die unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften bei der Beurteilung der Reib- und Adhäsionseigenschaften berücksichtigt werden. Versuche mit dem Streifenziehversuch zeigten, dass sich der Reibbeiwert  $\mu_{sz}$  für alle Aluminiumwerkstoffe in Abhängigkeit der Flächenpressung verringert. Gründe für dieses Verhalten sind:

- *Erhöhung der Reaktivität des Zwst als Folge des höheren Drucks und höherer Temperatur an der Reibkontaktfläche.*
- *Frühe Plastifizierung der Rauheit, ausgelöst durch höhere äussere Normalspannungen  $\sigma_n$ .*

Versuche mit St-1405 ergaben dieselbe Tendenz. Wird als Werkstück-

werkstoff nichtrostender Stahl 1.4301 mit einer relativ glatten Oberfläche verwendet, so bleibt der Reibbeiwert  $\mu_{sz}$  in Abhängigkeit der Flächenpressung konstant. Speziell bei diesem Werkstoff konnte ein plötzlicher Anstieg des Reibbeiwertes, zwischenstoffspezifisch und reproduzierbar bei einer bestimmten Flächenpressung, festgestellt werden. Die Tendenz der Abnahme des Reibbeiwertes mit zunehmender Normalspannung gilt für alle untersuchten Werkzeugwerkstoffe, unabhängig vom Zwischenstoff (Öl oder Emulsion) und dem Material der Ziehkante.

## 6.4 Optimierung von Oberflächenstrukturen

Durch die numerische Simulation und Auswertung von Strukturen ist es möglich, die charakteristischen Eigenschaften der Oberflächen auf Grund der unterschiedlichen Kennwerte vorauszusagen. Da dieser vielparametrische Einfluss nicht theoretisch quantifiziert werden kann, ist es notwendig, die Einflüsse parameterspezifisch in Versuchen zu ermitteln. Durch die numerische Simulation können die Rauheit  $r_a(\underline{x})$  der einzelnen Oberflächentypen variiert und die entsprechenden Kennwerte sowie deren Änderung bei der Abflachung gezielt untersucht werden. Allgemein gilt:

- *Wird die Rauhtiefe  $R_a$  variiert, so werden die von ihr abhängigen Kennwerte quantitativ verändert.*
- *Wird die Oberflächenwelligkeit verändert, so ändert sich, neben den Kennwerten, der durch die Abflachung induzierte Kennwertverlauf.*

Einige Voraussagen können auf Grund der bis jetzt angestellten Überlegungen und der Literatur jedoch gemacht werden:

- Die Aufrauung ist abhängig von der Korngrösse, da die Korn-  
grenze bei der Deformation des Werkstoffes das schwächste Glied  
darstellt. Es sind zwei grundlegende Fälle zu unterscheiden:

$$I \rightarrow \bullet R_{max} < \varnothing_{Korn}$$

*Ist die maximale Rauheit  $r_{a_{max}}(\underline{x})$  kleiner als der Korndurchmesser  $\varnothing_{Korn}$ , so verschwindet die Oberflächenstruktur und die Oberflächencharakteristik mit zunehmender Deformation, da die Ausprägung der Rauigkeit direkt von der Kornform abhängig ist.*

II -> •  $R_{max} > \varnothing_{Korn}$

*Ist die maximale Rauheit  $r_{max}(x)$  kleiner als der Korndurchmesser  $\varnothing_{Korn}$ , so bleibt die Oberflächenstruktur und die Oberflächencharakteristik auch mit zunehmender Deformation erhalten, da der Einfluss der Kornform auf die Rauheitscharakteristik klein ist. Die Oberflächencharakteristik wird im Reibkontakt wieder ausgeprägt und sichtbar.*

- Je kleiner die Rauheit der Oberfläche ist, desto kleiner wird der Anteil der mechanischen Wechselwirkungen an der gesamten Reibschubspannung. Entsprechend klein ist auch die lokale Normalspannung. Daraus leiten sich folgende Aussagen ab:
  - > • *bei glatten Oberflächen muss die Scherspannung in der Zwst-Schicht klein sein, um kleine Reibschubspannungen zu erreichen.*
    - *Wegen der kleinen lokalen Flächenpressung ist das Versagen der Zwst-Schicht unproblematisch, und der Zwst muss nicht hoch legiert sein.*
  - > • *Je rauher die Oberflächenstrukturen der Gegenkörper sind, desto grösser ist der mechanische Anteil und desto grösser sind die lokal auftretenden Flächenpressungen, welche durch die Normal- und Scherspannungen induziert werden.*
  - > • *Bei rauhen Oberflächen muss der Zwst hochviskos sein, um die Oberflächen zu trennen und den Anteil der mechanischen Wechselwirkung zu minimieren.*
    - *Die Zwst-Schicht muss sehr druckbeständig sein, um bei hohen lokalen Flächenpressungen in Folge der Rauigkeiten nicht zu versagen.*

Das Mass der optimalen Rauheit wie auch die das Reibverhalten bestimmende Rauheitsänderung hängt weitgehend von den Eigenschaften des Werkzeugwerkstoffes ab.

- *Die Wahl eines Werkstoffes mit höherer Festigkeit führt dazu, dass auch die für das plastische Fliessen des Werkstoffes notwendige Normalspannung ansteigt. Daraus resultiert bei entsprechenden äusseren Flächenpressungen ein kleinerer Flächentraganteil bei*

grösseren lokalen Normalspannungen an den Mikrokontaktflächen. Daraus folgt:

- *Je höher die lokalen Flächenpressungen ansteigen, desto kürzer werden die ungeschmierten Reiblängen, welche zum Versagen der Grenzschicht führen.*
- *je ähnlicher die Festigkeit und je reaktiver der Werkstoff der beiden metallenen Reibpartner ist, desto ungünstiger ist bei der Vermeidung von Adhäsionserscheinungen ein Wellenverhältnis von eins und ein kleiner reziproker Benetzungsdurchmesser.*

Bei Werkstückwerkstoffen mit hoher Festigkeit, kleiner Rauheit und niedriger Reaktivität treten somit wenig mechanische Wechselwirkungen auf. Versuche mit rostfreiem Stahl 1.4301, welche die oben beschriebenen Eigenschaften aufweist, bestätigen, dass der Betrag der molekularen Wechselwirkungen annähernd konstant ist, solange die Zwischenstoffschicht nicht versagt. Das Versagen der Grenzschicht, welches stark vom Zwischenstoff abhängt, führt zu einem steilen Anstieg des Reibbeiwertes.

Bei der Variation der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück treten zusätzlich gegenläufige Effekte auf:

*I -> • Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die Reibwärme an, was zum Sinken der Viskosität und damit der Zwst-Dicke führt.*

$$\text{Es gilt: } \eta = \eta_0 e^{b/k_b T} \quad \text{und weiter} \quad \eta = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (6.2)$$

*Für die Schubspannung gilt im Newton-Fluid:*

$$\tau = \eta \frac{dv}{dh} \quad (6.3)$$

*II -> • Gleichzeitig steigt die Reaktivität des Zwst durch eine Erhöhung der Temperatur an. Dies führt zu einer verstärkten Zwischenschichtbildung und/oder zu einer Veränderung von deren chemischer Zusammensetzung. Daraus resultiert eine verbesserte Trennung der Oberflächen durch eine druckbeständigere Zwischenschicht.*

Der Wahl der für den jeweiligen Umformprozess optimalen Oberflächenstruktur und Rauheit müssen somit, wie obige Ausführungen zeigen, unterschiedlichste Gesichtspunkte zugrunde gelegt werden.

## **7 Zusammenfassung**

Das Ziel der Untersuchung bestand darin, einen Ansatz zur Optimierung von Werkstückoberflächen realer Wst-Zwst-Wz-Systeme zu finden. Die im ersten Kapitel beschriebenen molekularen und mechanischen Wechselwirkungen bilden dabei die Grundmechanismen der in der Berührzone auftretenden Reibung.

Die Grösse und das Verhältnis dieser Wechselwirkungen zueinander hängt stark von den Systemkomponenten und der Variation der einzelnen Systemparameter, das heisst von der Umformung und den davon abhängigen Systemvariablen ab. Um Aussagen über die an der Werkstückoberfläche im Reibkontakt wirkenden Reibschubspannungen machen zu können, wird darum im zweiten Kapitel eine reiborientierte Oberflächenbeschreibung eingeführt. Die dabei neu definierten Kennwerte berücksichtigen die dreidimensionale Struktur rauher Oberflächen und dienen als Grundlage zur Optimierung von Rauheiten. Da die Rauheiten der Werkstückoberfläche im Reibkontakt verändert werden, wurden die Deformationszustände unterschiedlicher realer Blechoberflächen mit Hilfe eines Computers simuliert und die definierten Kennwerte und deren Änderung bei der Abflachung untersucht.

Die im dritten Kapitel dargestellten Resultate zeigten deutlich, dass die Kennwerte der Ausgangsoberflächen der Platinen durch die Abflachung der Rauheiten unterschiedlich verändert werden. Aus diesem Grund werden die Abhängigkeiten der Kennwerte der typologisierten Rauheiten untereinander ermittelt und einander gegenübergestellt.

Da die Wechselwirkungen wegen den komplexen chemischen und physikalischen, an der Reibfläche ablaufenden Mechanismen nicht quantifiziert werden können, werden Versuche mit dem im vierten Kapitel beschriebenen Streifenziehversuch mit Umlenkung durchgeführt. Die verwendeten Bleche weisen einen identischen Grundwerkstoff auf, während die Rauheitsstrukturen unterschiedlich sind.

Da das reale Umformsystem, bestehend aus Werkstück, Werkzeug und Zwischenstoff, wie auch die Systemparameter (Geometrien, Stempelgeschwindigkeit, Niederhalterkraft etc.) vor der Umformung festgelegt und während des betrachteten Umformzyklus nicht verändert werden, hängt das Reibverhalten der Bleche nur von den Systemvariablen ab.

Die Versuche zeigen, dass die am Werkstück während der Umformung lokal auftretenden Dehnungs-, Spannungs- und Geschwindigkeitszu-

stände entscheidenden Einfluss auf das lokale Reibverhalten ausüben. Sie müssen bei der Optimierung des Reibsystems berücksichtigt werden. Die Reibkraft im Reibkontakt hängt während eines Umformzyklus bei definiertem Umformsystem nur von den Systemvariablen ab. Für die Variation der Rauheit im Reibkontakt gilt entsprechend:

$$r_a(\mathbf{x})^t = f(\varepsilon_{ij}, \sigma_n, v_{rel}, T, (r_a(\mathbf{x})^{t=0})) \quad (6.3)$$

Im Reibversuch wird das Reibverhalten der in Kapitel zwei und drei untersuchten Oberflächenstrukturen quantifiziert und in Kapitel fünf dargestellt, wobei zwischen dem Reib- und Adhäsionsverhalten der Oberflächen unterschieden wird. Die Versuche zeigen deutlich, dass neben den Systemvariablen die definierten Oberflächenkennwerte entscheidenden Einfluss auf das Reibverhalten haben. Im sechsten Kapitel werden mögliche Ansätze zur Optimierung unterschiedlicher Oberflächen formuliert.



# **Anhang**

## 8 Anhang

### 8.1 Datenverarbeitung

Um Messdaten unterschiedlichster Erfassungssysteme zur Lösung zu nutzen, Redundanzen bei der Datenermittlung zu vermeiden, die Schnittstelle zur Simulation zu ermöglichen und die Kontinuität der Forschung zu gewährleisten, war es für die Realisierung der vorliegenden Arbeit notwendig, eine *Datenbank* zu schaffen, in welcher die einzelnen Systemkomponenten durch die *Datenbasis* eindeutig beschrieben und gespeichert werden. Die zur Datenbank gehörende *Datenverwaltung* lässt umfassende Vergleiche zu. Die folgende Figur zeigt den Ablauf zur Optimierung des Umformsystems.

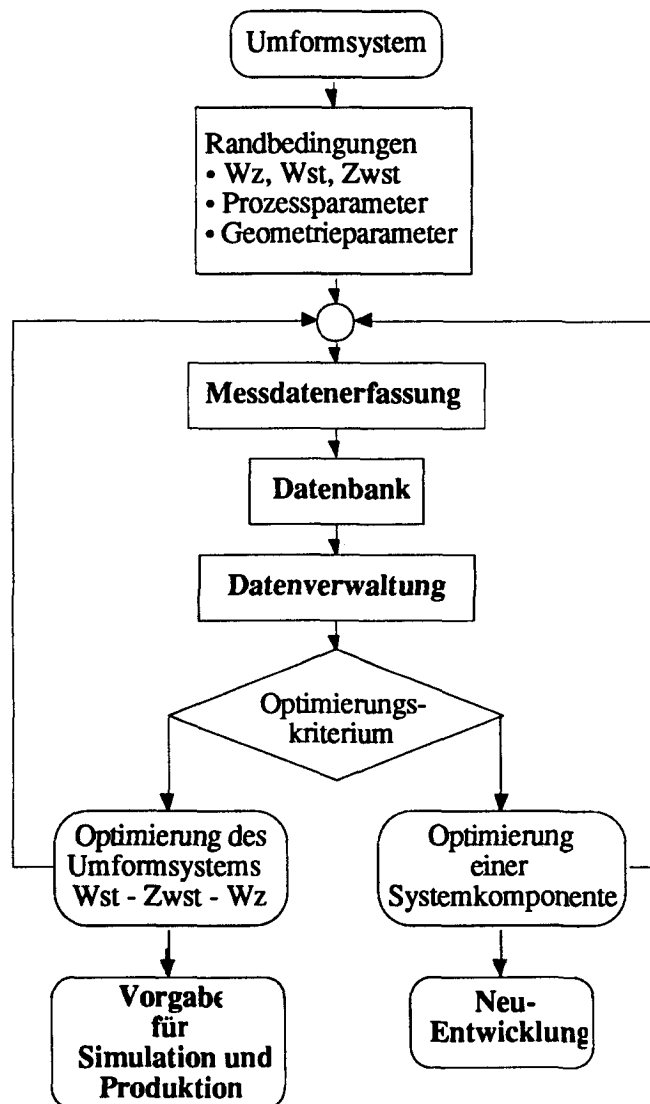


Fig. 97: Abläufe bei der Optimierung der Umformung

Für die Datenstruktur gelten folgende Grundsätze:

- Die *Strukturierung der Daten* in der Datenbasis ist so zu gestalten, dass nur kontrollierte *Redundanz* auftritt und die Datenstruktur einen übersichtlichen inneren Aufbau aufweist, damit sich der Benutzer auf bestimmte Daten und Datengruppen beziehen kann.
- Durch die *Datentrennung*, das heisst die Trennung der Datenspeicherung und -organisation von ihrer Erhebung und Anwendung, wird unabhängiges Arbeiten ermöglicht.
- Die *Datenintegrität* bei der Eingabe und Speicherung ist zu wahren.
- Die *zeitliche Permanenz* der Daten muss gewährleistet sein. Das heisst, die Datenstruktur muss so beschaffen sein, dass sie für die aktuelle wie auch für zukünftige Untersuchungen genutzt werden kann.

Für die Datenerhebung zur Reibuntersuchung leiten sich aus obigen Grundsätzen die folgenden Gesichtspunkte ab:

- Da die Messtechnik laufend verbessert wird, muss es möglich sein, neue Messdaten in die Datenbank zu integrieren.
- Da sich der Erkenntnisstand sowie die Möglichkeiten der Messdatenerfassung und -verarbeitung ständig erweitern, muss es möglich sein, sämtliche Auswertungen mit Hilfe der Datenbank nochmals durchzuführen.
- Es ist notwendig, die einzelnen Messwerte und nicht nur das verdichtete Messergebnis zu speichern.

Diese Vorgaben bedingen, dass die mit dem Messgerät ermittelten Messwerte sowie die für die Versuchsaussage und Identifikation relevanten Parameter permanent als sogenannte *Rohdaten* gespeichert werden und für die statistischen Auswertungen mit der Datenbank jederzeit zugänglich sind. Nur so kann vermieden werden, dass die gespeicherten Daten durch den Fortschritt der Technik unbrauchbar werden.

Zur numerischen Simulation wie auch zur Optimierung der realen Umformung sind neben Informationen über das Reibverhalten weitere Informationen über die Systemkomponenten und den Umformvorgang notwendig. Zur Informationsverarbeitung wurde daher ein Gesamtkonzept erarbeitet, welches die Erfassung und Auswertung aller Informationen über die Umformung erlaubt [Profos 1974, Zehnder 1985, Parsaye 1988]. Die Voraussetzung dafür bildet die reproduzierbare, digitale Beschreibung der Komponenten wie auch der Prozesse, so dass sie für weitere,

verfeinerte Auswertungen ohne weitere Erhebungen verwendet werden können. Die Grundlage für jeden Vergleich, egal ob quantitativ oder qualitativ, bildet die Beschreibung der Proben.

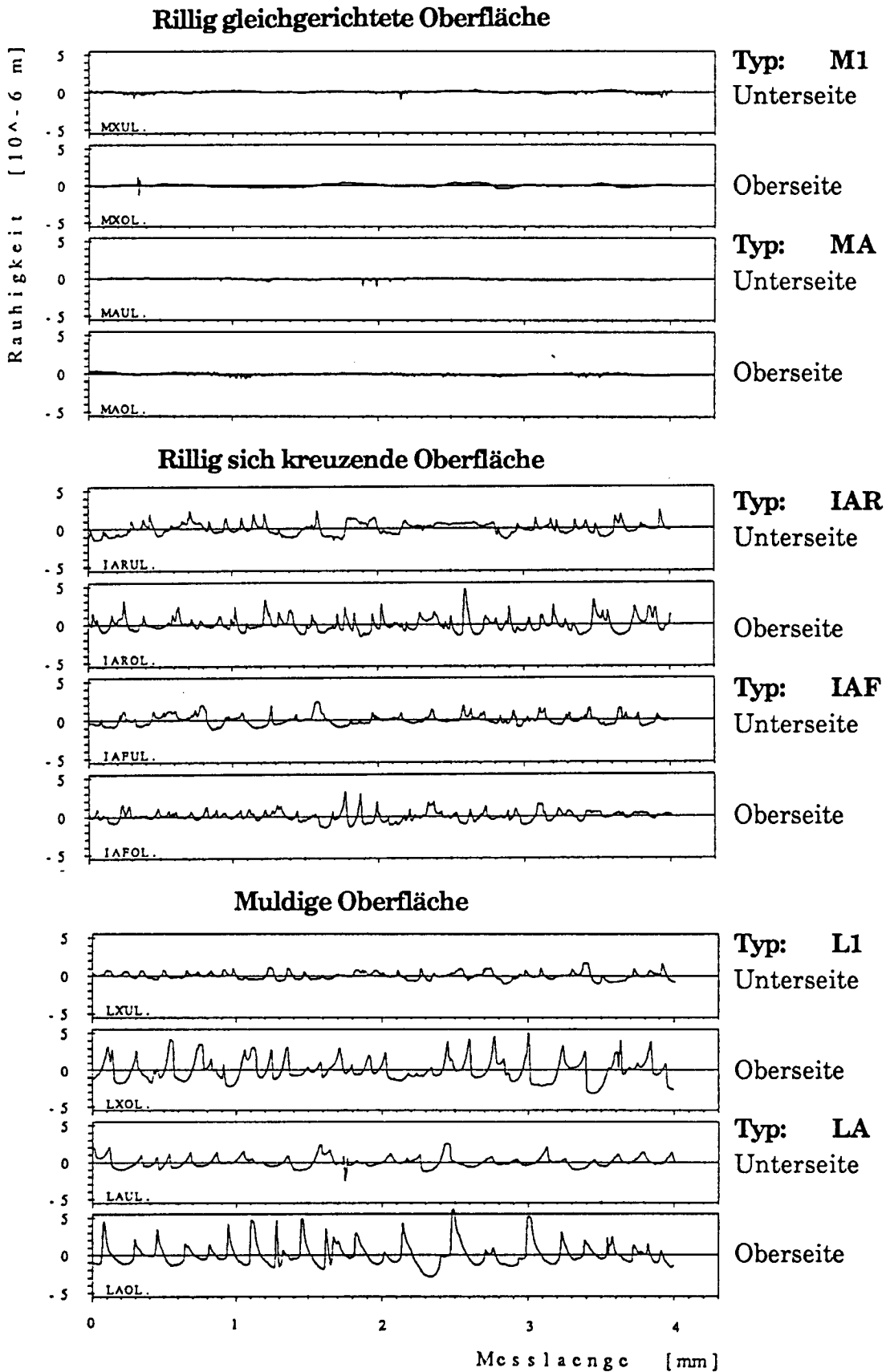
## **8.2 Versuchskomponenten**

### **8.2.1 Versuchswerkstoff**

Zur Visualisierung der Rauheiten der Blechoberflächen zeigen die nächsten Bilder Tastschnittprofile der verschiedenen Ausgangsoberflächen längs und quer zur Walzrichtung.

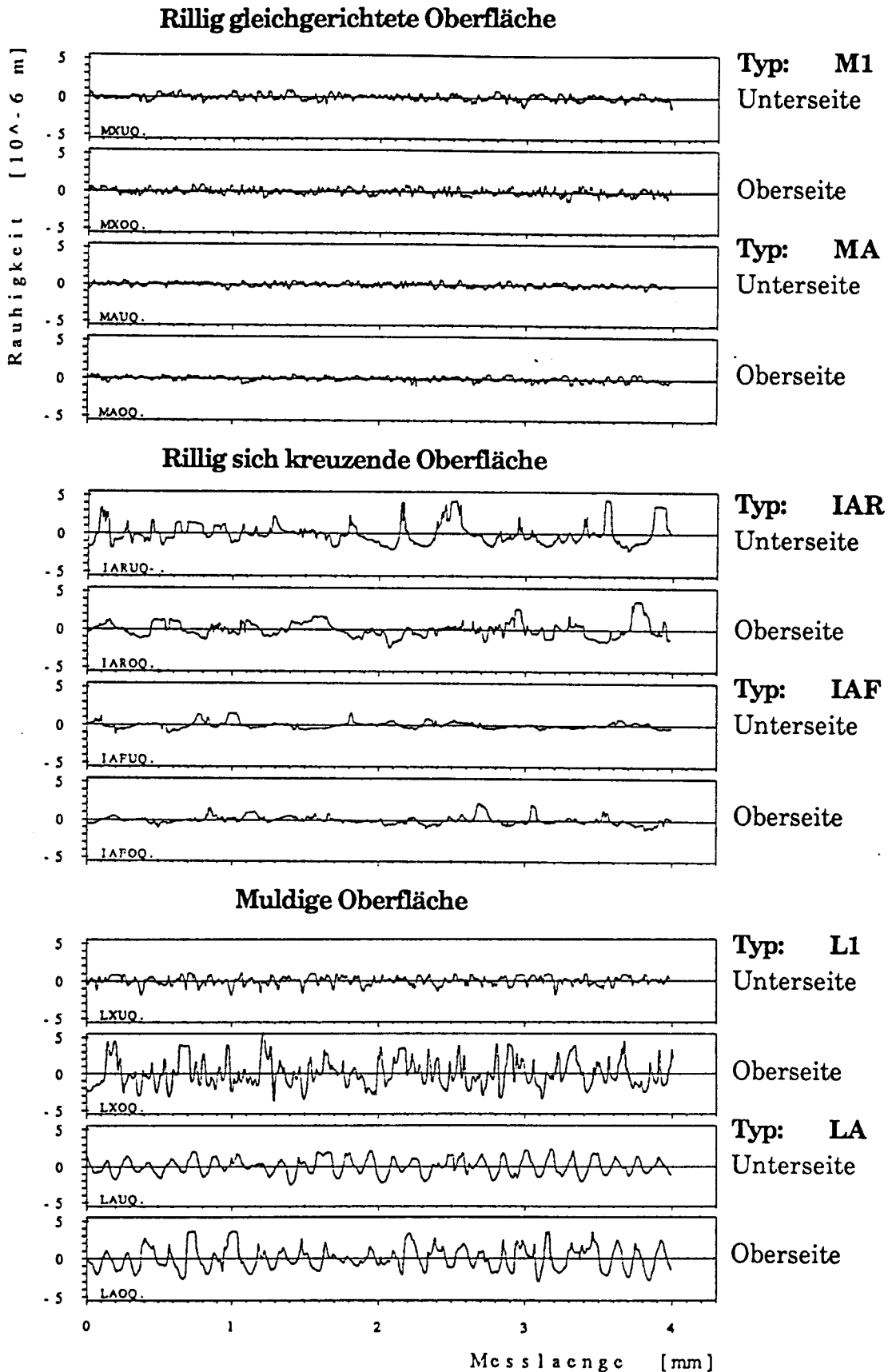
# Tastschnitte der undefor mierten Oberfl ächen

Messrichtung längs Walzrichtung



**Bild 98:** Tastschnitte aller Ausgangsoberfl ächen, längs zur Walzrichtung gemessen, Cut off: 0.8, Filter: Phasen korrigiert

**Tastschnitte der Ausgangsoberflächen**  
Messrichtung quer Walzrichtung



**Bild 99:** Tastschnitte aller Ausgangsoberflächen, quer zur Walzrichtung gemessen, Cut off: 0.8, Filter: Phasen korrigiert

Die Profil-Tastschnitte verdeutlichen die unterschiedlichen Rauheiten sowie den teilweise richtungsabhängigen Aufbau der verschiedenen Ausgangsoberflächen. Die "rillig gleichgerichteten" Qualitäten weisen gemäss den Tastschnittprofilen die kleinste Rauigkeit und die stärkste Richtungsabhängigkeit auf, gefolgt von den "rillig sich kreuzenden" und den "muldigen" Oberflächen.

Die folgenden Bilder zeigen die Traganteilkurven der Ausgangsoberflächen der getesteten Aluminiumbleche. In Tiefenrichtung wurden die Achsen der Traganteilkurven mit der mittleren maximalen Rauhtiefe  $R_{tm}$  in Tiefenrichtung und mit dem mittleren Abstand der Profilunregelmässigkeiten  $S_m$  in Längsrichtung multipliziert. Diese Darstellung verdeutlicht die Unterschiede der Oberflächen in Bezug auf die Amplitude, Periodizität und die Richtungsabhängigkeit der Oberflächenstruktur.

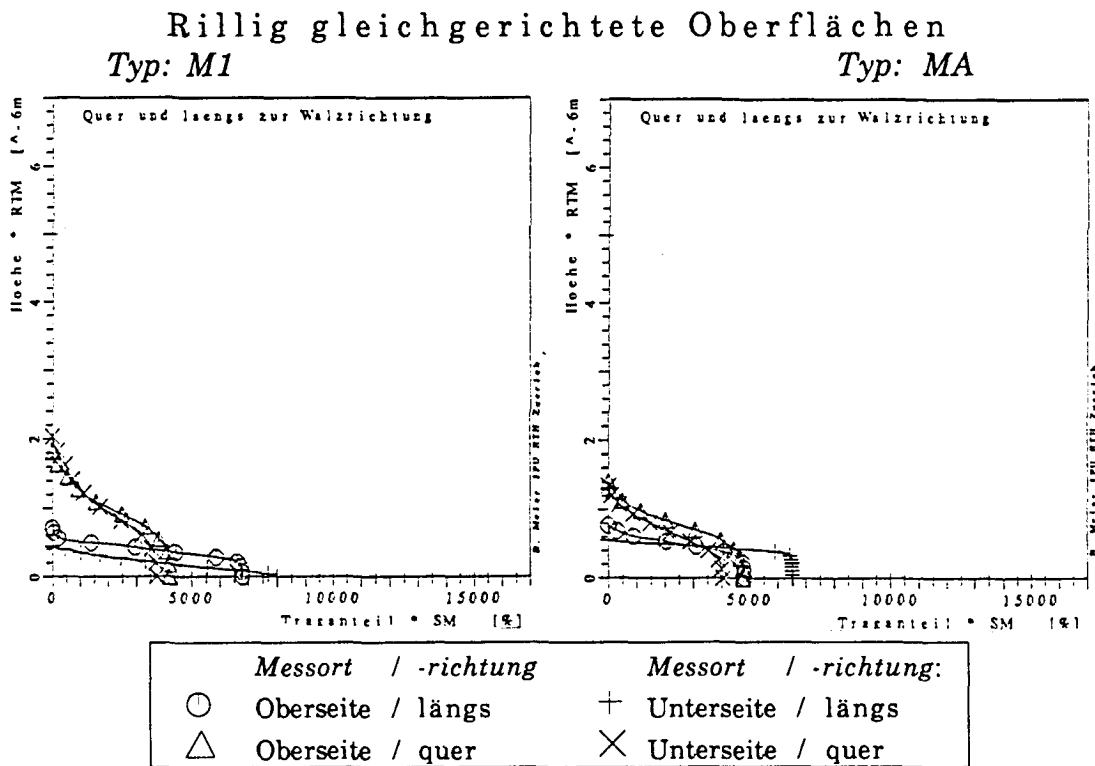


Bild 100 + 101: Traganteilkurven der "rillig gleichgerichteten" Oberflächen, multipliziert mit dem mittleren Abstand der Profilunregelmässigkeiten  $S_m$  und der mittleren maximalen Rauhtiefe  $R_{tm}$

## Rillig sich kreuzende Oberflächen

Typ: IAF

Typ: IAR

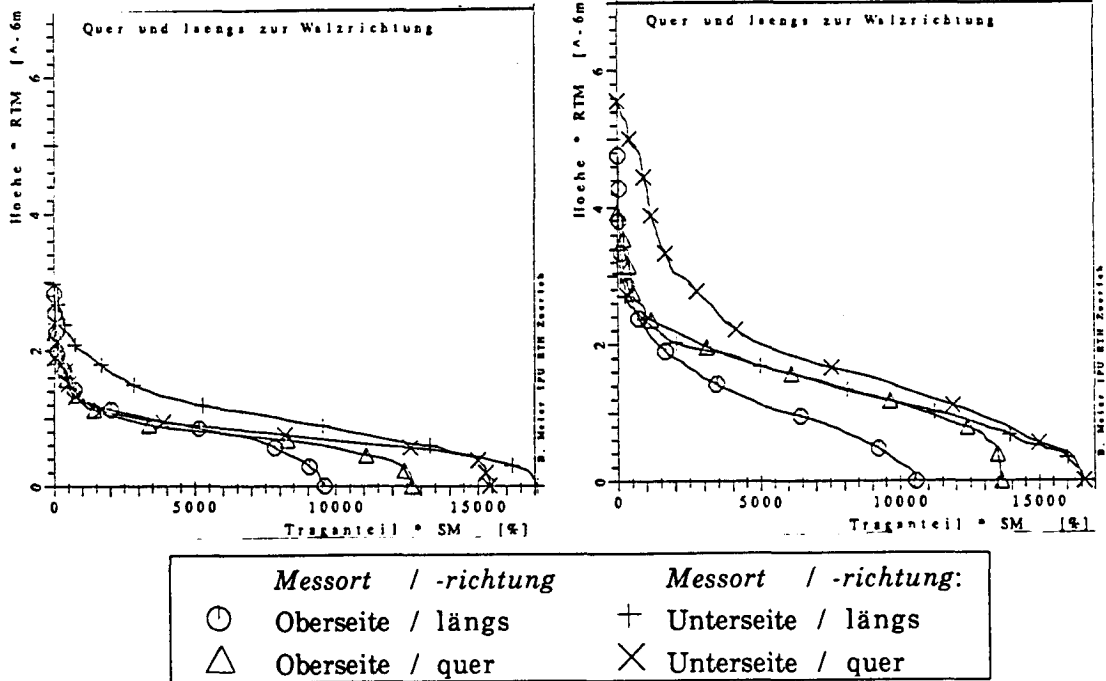


Bild 102 + 103: Traganteilkurven der "rillig sich kreuzenden" Oberflächen, multipliziert mit dem mittleren Abstand der Profilunregelmässigkeiten  $S_m$  und der mittleren maximalen Rauhtiefe  $R_{tm}$

## Muldige Oberflächen

Typ: L1

Typ: LA

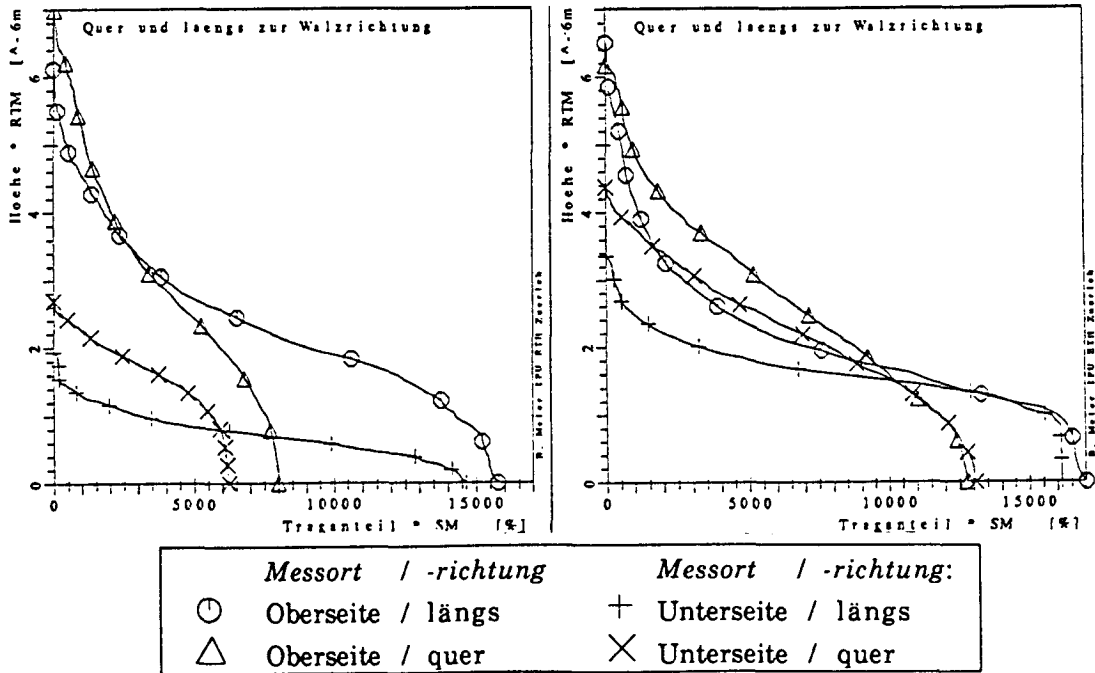


Bild 104 + 105: Traganteilkurven der "muldigen" Oberflächen, multipliziert mit dem mittleren Abstand der Profilunregelmässigkeiten  $S_m$  und der mittleren maximalen Rauhtiefe  $R_{tm}$



Werden die Profilschriebe mit den REM-Aufnahmen verglichen, so wird deutlich, dass die tatsächliche Oberflächenstruktur, wie sie in den REM-Aufnahmen deutlich erkennbar ist, durch einzelne Tastschnitte kaum nachvollzogen und beschrieben werden kann.

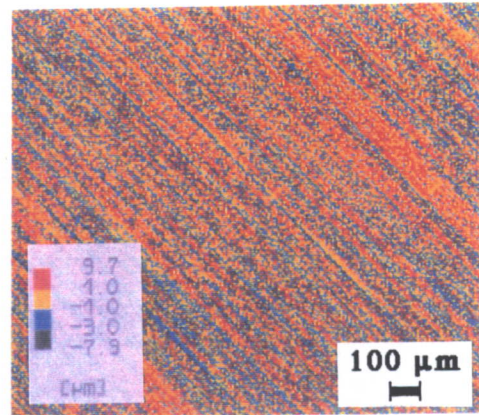
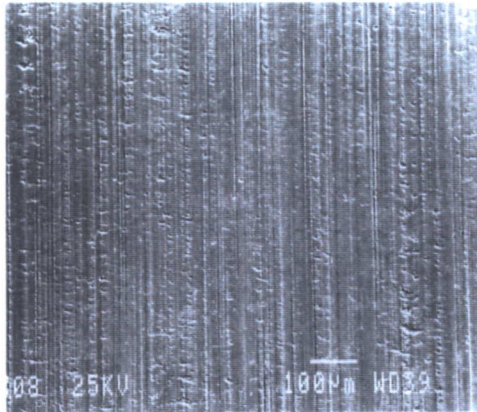
Mit Hilfe der optischen 3-D-Abtastung der Oberfläche wird die Topographie rauher Oberflächen berührungslos dreidimensional mit Hilfe des Fokussierverfahrens abgetastet. Die Resultate von drei unterschiedlichen Oberflächentypen sind in den nächsten Bildern dargestellt. Die Bilder links zeigen REM-Aufnahmen, die Bilder rechts die entsprechenden, mit dem Laserfokussierverfahren digitalisierten und als Höhenflächen dargestellten Oberflächenstrukturen. Die digitalisierte Oberfläche mit einer Seitenlänge von 1.5mm\*1.6mm wurde dabei mit 200\*200 Punkten aufgelöst.

REM - Aufnahmen

optisch digitalisiert

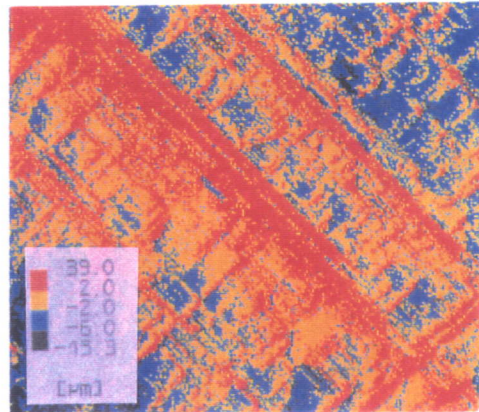
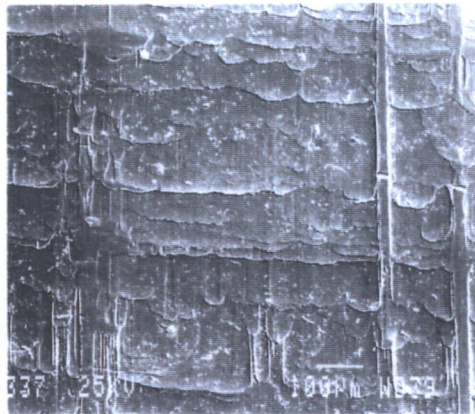
Typ MA:

*Rillig  
gleich-  
gerichtet*



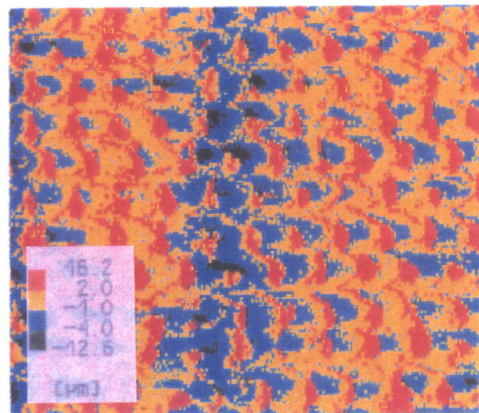
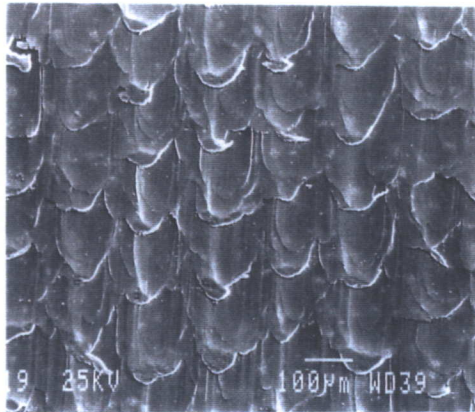
Typ IAR:

*Rillig  
sich  
kreuzend*



Typ LA:

*Muldig*



**Bild 106 bis 111:** Dreidimensionale Darstellung der Ausgangsoberflächen.

Um die Aufrauung der Bleche in Abhängigkeit der Deformation zu erfassen, wurden Zugversuche durchgeführt. Die folgenden Bilder der verformten Oberflächen zeigen deutlich, dass die Aufrauung von der Größe der Anfangsrauigkeit abhängig ist. Glatte Oberflächen rauhen stärker auf, sehr raue Oberflächen werden eher glatter. Die "rillig sich kreuzende" Qualität-Typ IAR oben wird scheinbar nicht aufgeraut.

# Tastschnitte der um $\epsilon_v$ gedehnten, rillig gleichgerichteten Bleche

Messrichtung längs der Walz- und Zugrichtung  
 Rillig gleichgerichteten Oberflächen, Typ: M1

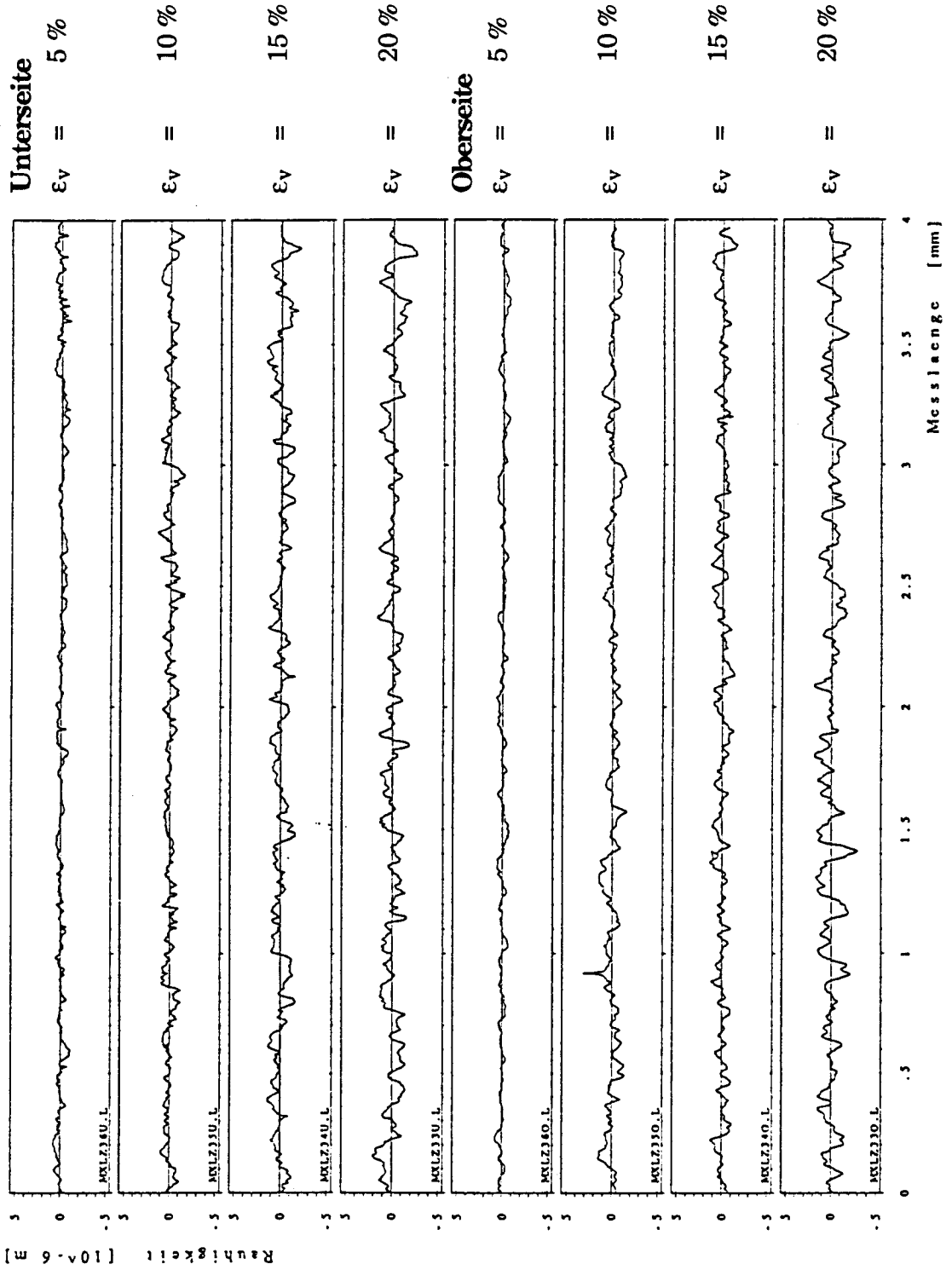


Bild 112: Oberflächenänderung der "rillig gleichgerichteten" Oberflächen bei unterschiedlichen einachsigen Deformationszuständen, dargestellt durch Tastschnitte

**Tastschnitte der um  $\epsilon_v$  gedehnten, rillig sich kreuzenden Bleche**  
 Messrichtung längs der Walz- und Zugrichtung  
 Rillig sich kreuzenden Oberfläche, Typ: IAR

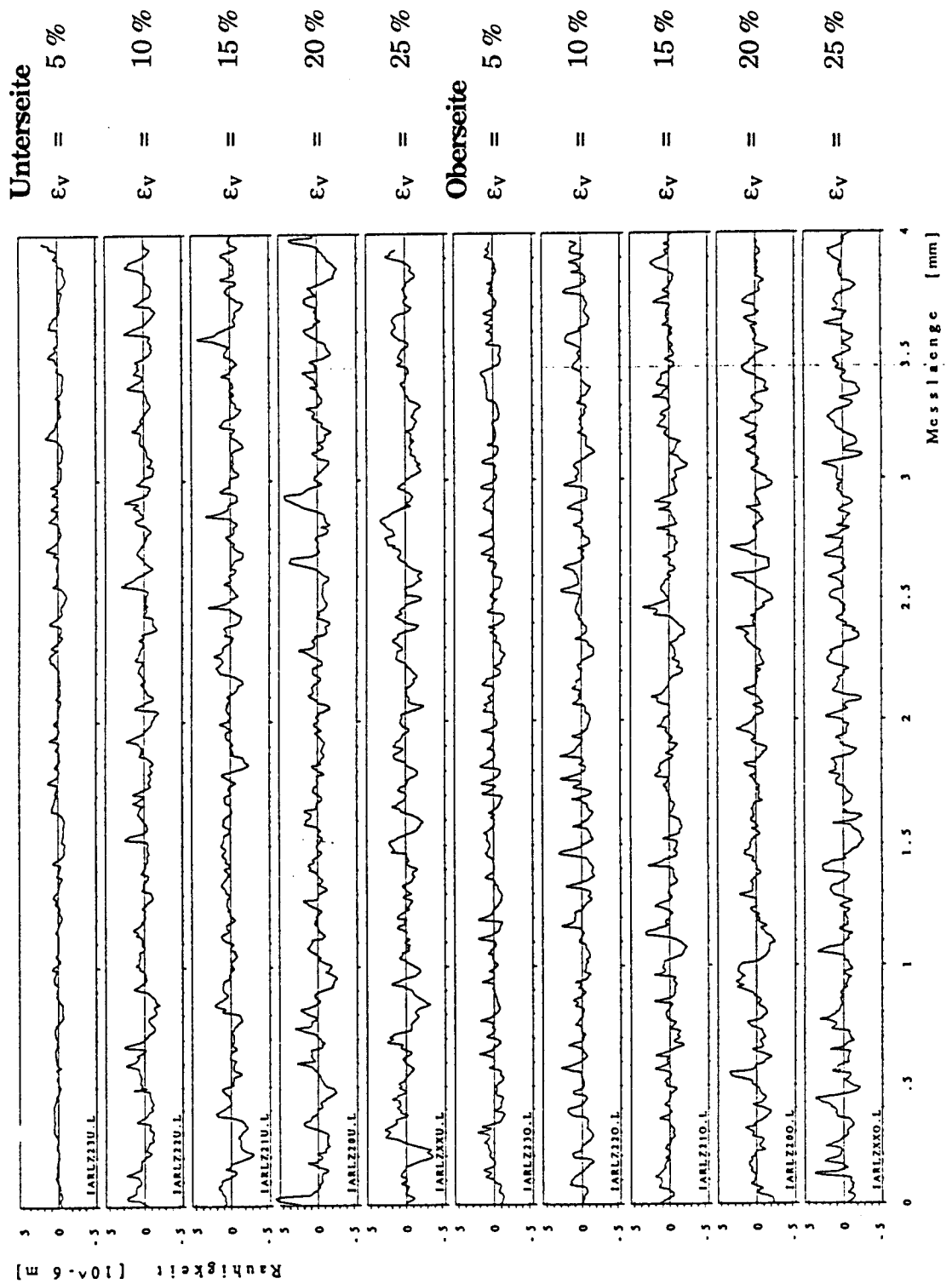
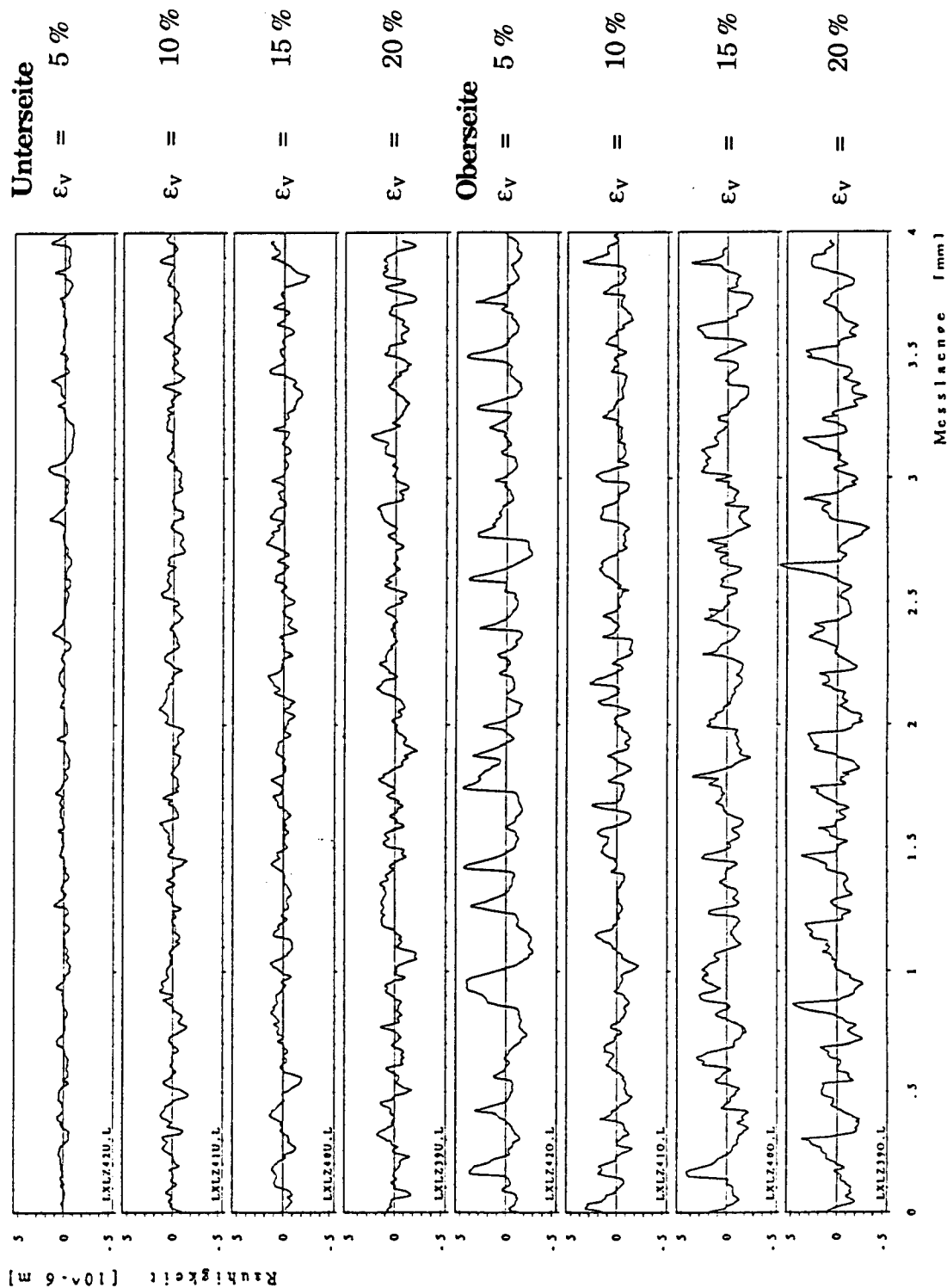


Bild 113: Oberflächenänderung der "rillig sich kreuzenden" Oberflächen bei unterschiedlichen einachsigen Deformationszuständen, dargestellt durch Tastschnitte

**Tastschnitte der um  $\epsilon_v$  gedehnten, muldigen Bleche**  
 Messrichtung längs der Walz- und Zugrichtung  
 Muldige Oberfläche, Typ: L1



**Bild 114:** Oberflächenänderung der "muldigen" Oberflächen bei unterschiedlichen einachsigen Deformationszuständen, dargestellt durch Tastschnitte

## 8.2.2 Zwischenstoff

### 8.2.2.1 Mineralöl

**Bezeichnung:** Anticorit 5080

**Hersteller:** Fuchs Interoil GmbH, D-

**Beschreibung:** Korrosionsschutzöl mit sehr guter Entfernbarkeit in wässrigen Neutralreinigern und alkalischen Reinigern.

#### **Eigenschaften:**

Dichte		0,884	g/cm <sup>3</sup>	DIN 51757
Viskosität	bei 20 °C	145	mm <sup>2</sup> /s	DIN 51562
	bei 40 °C	42	mm <sup>2</sup> /s	
	bei 60 °C	26	mm <sup>2</sup> /s	
Flammpunkt		195	°C	DIN 51376
Neutralisationszahl		0.3	mgKOH/g	DIN 51558
Verseifungszahl		4	mgKOH/g	DIN 51559
Sulfatasche		1,4	% Masse	DIN 51575
Wassergehalt		< 0,05	% Masse	DIN 51582
Chlorgehalt		< 0,02	% Masse	DIN 51577
Filmgewicht		6.5	g/m <sup>2</sup>	Fuchs-Labor

### 8.2.2.2 Emulsion

**Bezeichnung:** SK 255

**Hersteller:** August Pfinders Nachfolger GmbH + Co, D-7030 Böblingen

**Beschreibung:** Wässrige Emulsion (65% Wasser) aus Mineralöl, Fettsäurederivaten, Korrosionsschutzzusätzen und Netz- sowie Hilfsmittel auf Seifen- und Polymerbasis

#### **Eigenschaften:**

Dichte		0,965	g/cm <sup>3</sup>	DIN 51757
Viskosität	bei 20 °C	35	mm <sup>2</sup> /s	DIN 53211
	bei 40 °C	42	mm <sup>2</sup> /s	
	bei 60 °C	26	mm <sup>2</sup> /s	
Löslichkeit		wassermischbar		
Flammpunkt		entfällt		
Trockenfilmdicke		20	µm	
pH-Wert		7,85		

## **Literaturverzeichnis**

## Literaturverzeichnis

- Azushima, Kudo H., 1987:** Interaction of Surface Microstructure and Lubricant in Metal-Forming Tribology, Advanced Technology of Plasticity, Vol.I., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Balbach, R., 1988:** Optimierung der Oberflächenmikrogeometrie von Aluminiumfeinblechen für das Karosserieziehen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Bodschwina, H., 1988:** Rauheitskennwerte aus der Abbot-Kurve zur funktionsbezogenen Beschreibung der Oberflächengestalt. VII. Oberflächenkolloquium, Karl-Marx-Stadt.
- Boulding, K.E., 1956:** General system theory - the skeleton of science, Management science, 2 (1956) 197.
- Brendel, H., 1978:** Wissensspeicher Tribotechnik. Fachbuchverlag, Leipzig.
- Büchel, H., 1965:** Die Mikrohärteprüfung und ihre Anwendung. Dt. Verl. der Wiss., Berlin .
- Buckley, D. H., 1981:** Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication. Elsevier; Amsterdam, Oxford, New York.
- Buckley, D. H., 1968:** The influence of the atomic nature of cristalline materials on friction. Elsevier; Amsterdam, Oxford, New York.
- Coulomb, C. A., 1785:** Die Theorie einfacher Maschinen. Mémoires de mathématique et de physique de l'Académie des sciences, 161-331, Paris.
- Czichos, H., 1978:** Tribology.- Elsevier Verlag, Amsterdam, Oxford, New York.
- Czichos, H., 1982:** Technische Materialforschung und -prüfung. Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm. Basic technological research, Berlin.
- Czichos, H.; u.a., 1982:** Reibung und Verschleiss von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen. Expert Verlag, Grafenau.
- Czichos, H., 1985:** Materials, technologies and techno-economic development (Deutsche Stiftung für internationale Entwicklung). Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin.



- Czichos, H., 1985;** Petersohn, D.; Schwarz W.: Technische Oberflächen. Oberflächenatlas. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen und Profildiagramme, DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Köln.
- Dannenmann, E., 1980:** Oberflächen- und Randzonenbeeinflussung durch Umformen und Schneiden. Techn. Mitt. - Organ des Hauses der Technik e. V. Essen - 73 (1980), Essen.
- Dowson, D., 1977:** Elastohydrodynamic lubrication : the fundamentals of roller and gear lubrication. - Pergamon Press, Oxford.
- Dubbel, 1981:** Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Frontzek, 1985:** 2. Umformtechnisches Kolloquium in Darmstadt. UKD '85, 6.-7. März, Darmstadt.
- Giessner, H.; Schneider, R., 1977:** Grundlagen der Schmierstoffe. - In: Katalog Reibung, Schmierung, Verschleiss / Hrsg.: VEB WTZ Getriebe und Kupplungen. - Dresden.
- Grahnert, R.; Doege, E., 1985:** Ergebnisse der Untersuchung der Reibverhältnisse beim Tiefziehen rechteckiger Ziehteile. Fortschrittberichte VDI, Reihe 2 Nr. 105. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Greenwood, J. A.; Williamson, J. B. P., 1970:** Contact of nominally flat surfaces. Proc. Inst. Mech. Eng., 185 (1970/71) 48, London.
- Habig, K. H., 1980:** Verschleiss und Härte von Werkstoffen. Hanser-Verlag, München, Wien.
- Hora, P. 1990:** Numerische Simulationsmodelle zur Voraussage des Versagens bei duktilen Blechwerkstoffen. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Interner Bericht IFU, 1988:** Optimierung des Tiefziehprozesses für Aluminium. Institut für Umformtechnik, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Ishigaki, H., 1978:** Deformation analysis of large sized panels in the press shop. Symp. on Mech. of Sheet Metall Forming, 1977. Plenum Press, New York.
- Israelachvili, J. N., 1985:** Intermolecular and surface forces, Academic Press, ISBN 0-12-375180-2, London.
- Israelachvili, J. N.; Marcelja, S.; Horn, R.G., 1980:** Physical principles of membrane organization. Quarterly reviews of biophysics, vol.13, no.2, pp.121-200 Cambridge, New York.

- Jürgen, H.; Peitgen, H.-O.; Saupe, D., 1989:** Fraktale - eine neue Sprache für komplexe Strukturen. Spektrum der Wissenschaft, September, Heidelberg.
- Kaffanke, K.; Czichos, H., 1973:** Die Bestimmung von Grenztemperaturen bei tribologischen Vorgängen. BAM-Berichte Nr.19, Berlin.
- Kienzle, O.; Mietzner, K., 1967:** Atlas umgeformter Oberflächen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Kragels`skij, I., 1973:** Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiss. Hanser Verlag, München.
- Kragels`skij, I.V.; Demkin, N.B., 1960:** Ermittlung der realen Berührungsfläche bei rauhen Oberflächen, Reibung und Verschleiss bei Maschinen. Band XIV. Verlag der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, S.37-62, Moskau.
- Mang, T., 1983:** Die Schmierung in der Metallbearbeitung. Vogel-Buchverlag, Würzburg.
- Meier, B. T.; Kopietz, J.; Wollrab, P.-M.; Reissner, J., 1988:** Die Übertragbarkeit von Streifenreibzahlen auf reale Tiefziehteile. 6. Int. Colloqu., Jan 12-14, Esslingen.
- Meier, B. T., 1988:** Einfluss der Oberfläche auf das Reibverhalten feinkristalliner Blechwerkstoffe. Bericht aus dem Institut für Umformtechnik, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Meier, B. T.; Bloeck, M.; Reissner, J., 1990:** Einfluss der Werkstückoberfläche auf das Reibverhalten während der Umformung. IDDRG Schweden, Borlänge.
- Müller, K., 1975:** Erklärungsversuch für die Streuung der Verschleissergebnisse im Mischreibungsgebiet. Tribologie und Schmierungs-technik, 22. Jahrg. Nr. 5, Hannover.
- Müller, K., 1985:** Zur quantitativen Beschreibung nichtebener Oberflächen von Werkstoffen Diss., Univ. Erlangen-Nürnberg, Erlangen.
- Noppen, G.; Czichos, H.; u.a., 1981:** Technische Oberflächen (Teil 1: Oberflächenbeschaffenheit; Zeichnungsangaben - Erläuterungen für Konstruktion, Fertigung, Prüfung; Teil 2: Oberflächenatlas; Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen und Profildigramme. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Köln.

- Noppen, G.; Sigalla, J., 1985:** Technische Oberflächen; Teil 1: Oberflächenbeschaffenheit: Zeichnungsangaben - Erläuterungen für Konstruktion, Fertigung, Prüfung. DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Köln.
- Parsaye, K., 1988;** Chigell, M.: Expert systems for Experts. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Pfeifer, T.; Schüller, H.; Elzer, J., 1987:** Fertigungsintegrierte Oberflächenmessung. Industrie-Anzeiger, 45, Essen.
- Prager, W.; Hodge, P. G., 1954:** Theorie idealplastischer Körper. Springer Verlag, Wien.
- Profos, P., 1974:** Handbuch der industriellen Messtechnik. Vulkan Verlag, Essen.
- Rabinovicz, E., 1965:** Friction and Wear of Materials. Wiley Verlag, New York, London, Sydney.
- Reissner, J., 1982:** Friction Condition in Lubricated Deep-drawing Process. 3. Int. Colloqu., Jan 12-14, Esslingen, Vol.1 19.1-19.15, Esslingen.
- Schey, J. A., 1983:** Tribology in Metalworking. American society for metals, Ohio.
- Schmaltz, G., 1936:** Technische Oberflächenkunde. Springer Verlag, Berlin.
- Shin-nosuke, U., 1979;** Hisayoshi, S.; Masanori, O.: Two dimensional measurement of surface roughness by the light sectioning method. CIRP, Vol. 28/1, Berlin.
- Staufert, G., 1980:** Die genaue parametrische Beschreibung von Profilschrieben technischer Oberflächen in Hinsicht auf die Funktionsfähigkeit des Werkstückes. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Staufert, G.; Matthias, E., 1979:** Characterization of Random Roughness-Profiles. CIRP, Vol. 28/1.
- Streidl, M.; Kopietz, J.; Breun, F., 1988:** On the behaviour of the microsurface structure of sheets in free and constrained forming condition. IDDRG, Budapest.
- Suh, N. P.; Sin, H. C., 1981:** The genesis of friction. Wear 69, Lausanne.
- Tabor, D., 1979:** Gases, liquids and solids. Cambridge University Press, Cambridge.

- Thomann, H.H., 1980:** Strömungslehre I und II, Vorlesung Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- VSM-58070, 1976:** Oberflächentypologie. Eingetragene Norm der Schweizerischen Norm-Vereinigung. SNV 258070.
- Whitehouse, D. J.; Phillips, M. J., 1978:** Discrete properties of random surfaces. Phil. Trans. Soc. London. A 305, 267-298, London.
- Whitehouse, D. J.; Phillips, M. J., 1982:** Two-dimensional discrete properties of random surfaces. Trans. R. Soc. London. A 305, 441-468, London.
- Witthüser, K.-P., 1980:** Untersuchung von Prüfverfahren zur Beurteilung der Reibungsverhältnisse beim Tiefziehen. Diss., Univ. Hannover, Hannover.
- Wollrab, P. M.; Kopietz, J.; Streidl, M., 1987:** Changes in the Surface Structure of Deep Drawing Sheet Steels Subject to Various Forming Stresses, IDDRG, Working Groups Meeting CH-Schaffhausen.
- Wuttke, W., 1987:** Tribophysik, Hanser Verlag, München.
- Yamaguchi, K.; Takakura, N.; Fukuda, M., 1987:** FEM Simulation of Surface Roughening and its Effects on Forming Limit in Stretching of Aluminium Sheets, Advanced Technologie of Plasticity vol.II. Springer Verlag, Stuttgart.
- Zehnder, C.A., 1985:** Informationssysteme und Datenbanken. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart.

## **Lebenslauf**

### **Personalien:**

**Name:** Meier, Beat Thomas  
**Bürgerort:** Birmenstorf AG  
**Eltern:** Meier Fritz und Meier-Siegrist Julia,  
Berninastrasse 9 , 5430 Wettingen AG  
**Wohnadresse:** Waschhausgraben 6, 5600 Lenzburg  
**geboren:** 14. Oktober 1961

### **Ausbildung:**

1968 - 1973 fünf Jahre Primarschule in Wettingen, AG.  
1973 - 1977 vier Jahre Bezirksschule in Wettingen, AG.  
1977 - 1980 dreieinhalb Jahre Kantonsschule in Baden, AG.  
1980 Matura Typ C in Baden, AG.  
1980 - 1985 Maschineningenieurstudium an der ETH - Zürich mit  
Spezialisierung in Mess- und Regeltechnik sowie me-  
chanischer Verfahrenstechnik.  
1981 - 1985 Hilfsassistenttätigkeit am Institut für Umformtechnik  
der ETH - Zürich.  
1985 Diplomierung als Maschineningenieur in Zürich.  
1985 - 1990 Assistenttätigkeit am Institut für Umformtechnik. Be-  
treuung diverser industrieller Forschungsvorhaben in  
Zusammenarbeit mit Daimler-Benz, Sindelfingen (1986-  
1987), Franke AG, Aarburg (1988-1989) und Alusuisse-  
Lonza AG, Neuhausen (1988-1989).  
  
1983 - Ingenieur-Bureau Oscar Kihm AG, Baden, AG.

## **Nachwort**

Die vorliegende Arbeit über den Einfluss der Werkstückoberfläche auf die Reibung während der Umformung entstand in der Zeit von 1986 bis 1991.

Prof. Dr. J. Reissner danke ich für die Anregung und die Begleitung der Arbeit. Prof. Dr. E. Freitag danke ich für die Übernahme des Korreferates, sein Interesse und die Durchsicht der Arbeit.

Speziellen Dank gebührt Dr. Pavel Hora für seinen grossen persönlichen Einsatz und die vielen kreativen Diskussionen. Beigetragen zur Realisierung des Datenkonzeptes und der Versuche haben auch Jörg Spichtig, Ralph Ehrismann und Waldemar Kubli.

Den Firmen Alusuisse-Lonza in Neuhausen, BMW in München und Franke in Aarburg danke ich für die Unterstützung der Forschungsarbeiten im Rahmen der gemeinsamen Projekte.

Bei dieser Gelegenheit möchte ich auch allen hier nicht namentlich erwähnten Freunden und Kollegen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meiner Familie und Bettina Gantenbein danke ich speziell für das entgegengebrachte Vertrauen und die grosse Geduld.

Lenzburg, im Juli 1991