

Beurteilung der Topografie von Blechen
im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Johannes Staeves

aus Bad Orb

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. D. Schmoeckel
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Dr. h.c. Dipl.-Ing. H. E. Exner
Tag der Einreichung:	07.07.1998
Tag der mündlichen Prüfung:	09.09.1998

Darmstadt 1998

D17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Schmoeckel, gilt mein besonderer Dank für die Möglichkeit zur Bearbeitung der Forschungsprojekte, die eingeräumte eigenverantwortliche Arbeitsweise und die wohlwollende Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Dipl.-Ing. H. E. Exner danke ich für die Übernahme des Ko-referats und die kritische Durchsicht der Arbeit sowie für seine ständige Bereitschaft zu wissenschaftlichen Diskussionen.

Weiterhin danke ich allen Kollegen, Mitarbeitern und Studenten, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hervorzuheben sind hier besonders Frau Wei Yao und Herr Taofen Wang, die mit der Entwicklung der Software einen wesentlichen Beitrag geleistet haben.

Mein besonderer Dank gilt den Projektpartnern aus dem „Verbundprojekt Tribologie“ und dem EFB-Forschungsvorhaben „Schmierstoffminimierung“, die diese Arbeit durch Anregungen, Hinweise und Aufträge aus der Praxis unterstützt haben. Allen voran seien hier Herr Dr. K. J. Schwethelm (Adam Opel AG) und Herr Dipl.-Ing. S. Faller (Daimler-Benz AG) genannt.

Danken möchte ich auch meinen Eltern, die meinen gesamten Ausbildungsweg großzügig unterstützt haben.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Frau, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt hat.

Hanau, im September 1998

Johannes Staeves

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse	3
2.1	Dressiervverfahren	5
2.2	Prüfmethode	10
2.3	Untersuchungen zum Einfluß der Topografie auf die Reibung	18
1.4	Oberflächenwandlung	22
1.5	Vermessung der Oberflächen	26
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	39
4	Bedeutung der Topografie in der Blechumformung	43
4.1	Befragung von Firmen	43
4.2	Modellversuche	44
5	Reibmodell zur Beschreibung der Wirkmechanismen der Topografie	47
5.1	Begriffe	50
5.2	Untersuchung der Wirkmechanismen der Topografie	63
5.3	Anforderungen an die Topografie	70
5.4	Anforderungen an tribologische Prüfmethode	73
5.5	Anforderungen an Oberflächenkenngrößen	73
6	Auswahl der Prüfmethode für die Beurteilung tribologischer Eigenschaften	75
6.1	Auswahl des Prüfprinzips und der Meßgrößen	75
6.2	Auswahl der Ausführung der Anlage	83
6.3	Auswahl der Beanspruchungsbedingungen	85
6.4	Auswahl der Meßgrößen und der Auswertungsweise	86
7	Auswahl der Meßmethode für die Beurteilung geometrischer Eigenschaften der Blechoberfläche	87
7.1	Auswahl der Oberflächenkenngrößen	87
7.2	Auswahl des Meßverfahrens	92
7.3	Auswahl der Meßbedingungen	92
7.4	Auswahl der Filterung der Meßdaten	93
8	Vergleich von tribologischen und geometrischen Kenngrößen	99
8.1	Vergleich der Oberflächenkenngrößen	99
8.2	Vergleich der tribologischen Kenngrößen	106
8.3	Vergleich der tribologischen und geometrischen Eigenschaften	110
8.4	Vergleich der Filter	119
9	Überprüfung des Reibmodells anhand der Versuchsergebnisse	125
10	Auswahl der Kriterien und Kenngrößen	129
10.1	Tribologische Kriterien und Kenngrößen	129
10.2	Oberflächenkenngrößen	130
11	Zusammenfassung	133
12	Literaturverzeichnis	137
13	Anhang	149

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A_f	m^2	Größe der Fläche mit Festkörperkontakt
A_g	m^2	Größe der Fläche im Zustand der Grenzreibung
$c(N_{clm})$	μm	Durchdringung bei der max. Anzahl geschl. Leerflächen
$c(N_{mam})$	μm	Durchdringung bei der maximalen Anzahl von Materialflächen
$c(N_{vom})$	μm	Durchdringung bei der maximalen Anzahl von Leerflächen
c_{clm}	μm	Durchdringung beim maximalem geschl. Leerflächenanteil α_{clm}
dx	mm	Abstand der Meßpunkte in Koordinatenrichtung x
dy	mm	Abstand der Meßpunkte in Koordinatenrichtung y
F_{df}	N	Reibungskraftanteil durch hydrodynamische Effekte an Flanken einzelner Rauheitserhebungen
F_{dmf}	N	Reibungskraftanteil durch hydrodynamisch wirkende makroskopische Schmierflanken
F_{dms}	N	Reibungskraftanteil durch hydrodynamisch wirkende makroskopische Stufen in der Werkzeug- und Blechgeometrie
F_{ds}	N	Reibungskraftanteil durch elasto- und plasto-hydrodynamische Effekte z.B. an Stufen und Kanten der Topografie
F_f	N	Reibungskraft durch Festkörperkontakt
F_{fu}	N	Reibungskraftanteil durch die Furchung der Kontaktfläche
F_g	N	Reibungskraftanteil aus der Grenzreibung
F_K	N	vom Kugelfilter simulierte Kraft auf die Oberfläche
F_N	N	Gesamt-Normalkraft
F_{Ndf}	N	Normalkraftanteil durch mikro-hydrodynamische Effekte an Flanken einzelner Rauheitserhebungen
F_{Ndmf}	N	Normalkraftanteil durch hydrodynamisch wirkende makroskopische Schmierflanken
F_{Ndms}	N	Normalkraftanteil durch hydrodynamisch wirkende makroskopische Stufen
F_{Nds}	N	Normalkraftanteil durch elasto- und plasto- hydrodynamische Effekte an Stufen und Kanten der Topografie
F_{Nf}	N	Normalkraftanteil durch Festkörperkontakt
F_{Ng}	N	Normalkraftanteil der Kontaktflächen im Zustand der Grenzreibung
F_{Nq}	N	Normalkraftanteil durch lokale Quetschströmungen
F_{Nqm}	N	Normalkraftanteil durch makroskopische Quetschströmungen
F_{Ns}	N	Normalkraftanteil durch hydrostatisch wirkende Schmier-taschen
F_{Nsm}	N	Normalkraftanteil durch hydrostatisch wirkende Makro-schmier-taschen
F_R	N	Gesamt-Reibungskraft
h	m	Höhe des Schmierpalts
h_1	m	Höhe der hydrodynamisch wirkenden Stufe am Einlauf

Zeichen	Einheit	Bedeutung
h_2	m	Höhe der hydrodynamisch wirkenden Stufe am Auslauf
h_a	m	Höhe des Schmierkeils am Auslauf
h_e	m	Höhe des Schmierkeils am Einlauf
k	μm	Durchdringung des Kugelfilters (Eindringtiefe der Kugel)
k_f	N/mm^2	Fließgrenze des Blechwerkstoffs
l_1	m	Länge der hydrodynamisch wirkenden Stufe am Einlauf
l_2	m	Länge der hydrodynamisch wirkenden Stufe am Auslauf
M_{r1}	%	Materialanteil Spitzen
M_{r2}	%	Materialanteil Täler
n	-	Anzahl eindringender Punkte
$N_{cl}(c)$	-	Anzahl der geschl. Leerflächen bei Durchdringung c
N_{clm}	-	max. Anzahl geschl. Leerflächen
$N_{ma}(c)$	-	Anzahl der Materialflächen bei vorgegebener Durchdringung c
N_{mam}	-	max. Anzahl Materialflächen
$N_{vo}(c)$	-	Anzahl der Leerflächen bei vorgegebener Durchdringung c
N_{vom}	-	max. Anzahl Leerflächen
p	μm	Perkolationstiefe
P	MPa	Druck im Schmierpalt
PC	-	Spitzenzahl
$P_{\max}$	MPa	Maximaler Druck im Schmierpalt
$\bar{P}$	MPa	Mittlerer Druck im Schmierpalt
R	m	Radius des Stempels, Radius des Kugelfilters
R_a	μm	arithmetischer Mittenrauhwert
R_k	μm	Kernrauheit
R_p	μm	Glättungstiefe
R_{pk}	μm	reduzierte Spitzenhöhe
R_{pk}^*	μm	Spitzenhöhe
R_{pm}	μm	mittlere Glättungstiefe
R_q	μm	quadratischer Mittenrauhwert
R_t	μm	Rauhtiefe
R_{vk}	μm	reduzierte Riefentiefe
R_{vk}^*	μm	Riefentiefe
R_y	μm	maximale Profilhöhe
R_z	μm	gemittelte Rauhtiefe
S_a	μm	arithmetischer 3D-Mittenrauhwert
S_k	μm	3D-Kernrauheit
S_{ku}	μm	3D-Kurtosis
S_m	μm	mittlerer Abstand der Profilunregelmäßigkeiten
S_{pk}	μm	reduzierte 3D-Spitzenhöhe
S_{pk}^*	μm	3D-Spitzenhöhe

Zeichen	Einheit	Bedeutung
S_q	μm	quadratischer 3D-Mittenrauhwert
S_{r1}	μm	3D-Materialanteil der Spitzen
S_{r2}	μm	3D-Materialanteil der Täler
S_{rk}	μm	3D-Materialanteil bei Durchdringung des Kugelfilters
S_{sk}	μm	3D-Schiefe
S_t	μm	3D-Rauhtiefe
S_{vk}	μm	reduzierte 3D-Riefentiefe
S_{vk}^*	μm	3D-Riefentiefe
S_z	μm	gemittelte 3D-Rauhtiefe
S_{z2}	μm	über Felder gemittelte 3D-Rauhtiefe
v	m/s	Gleitgeschwindigkeit
v_{BH}	m/s	Geschwindigkeit des Niederhalters
V_{cl}	$\mu\text{m}^3/\text{m}^2$	geschlossenes Leervolumen
$V_{cl}(c)$	$\mu\text{m}^3/\text{m}^2$	geschlossenes Leervolumen unterhalb der Durchdringung c
v_p	m/s	Stempelgeschwindigkeit
V_{vo}	$\mu\text{m}^3/\text{m}^2$	Leervolumen
$V_{vo}(c)$	$\mu\text{m}^3/\text{m}^2$	Leervolumen unterhalb der Durchdringung c
W_t	μm	Wellentiefe
$z_K(i,j)$	μm	Die Höhe des Punktes der Kugel des Kugelfilters mit den Koordinaten $x=i$ und $y=j$
$z_W(i,j)$	μm	Die Höhe des Punktes des Welligkeitsprofils mit den Koordinaten $x=i$ und $y=j$
α	-	Flankenwinkel des Schmierkeils
$\alpha_{cl}(c)$	%	geschlossener Leerflächenanteil bei Durchdringung c
α_{clf}	%	max. Anteil eingläteter und geschlossener Leerflächen
α_{clm}	%	Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils
$\alpha_{ma}(c)$	%	Materialflächenanteil bei vorgegebener Durchdringung c
$\alpha_{vo}(c)$	%	Leerflächenanteil bei vorgegebener Durchdringung c
η	Pa s	dynamische Viskosität des Schmierstoffs
λ_c	mm	Grenzwellenlänge
π	-	Kreiskonstante
τ_f	N/mm^2	Scherfestigkeit des weicheren Kontaktpartners
τ_g	N/mm^2	Scherfestigkeit der Grenzschicht

1 Einleitung

Die Blechumformung gehört in der durch den Automobilbau geprägten deutschen Industrie zu den bedeutendsten Fertigungsverfahren. Neue Werkstoffe und komplexere Bauteile machen im Spannungsfeld zwischen Kosten, Bauteilqualität, Prozeßsicherheit, Verfahrensgrenzen, Ausbringung und Umweltverträglichkeit intensive Forschungsarbeiten erforderlich, um neue Fertigungsverfahren zu entwickeln und bestehende zu optimieren [1-6].

Beim Karosserieumformen hat sich neben den plastomechanischen Werkstoffeigenschaften die Tribologie als eine wesentliche Einflußgröße erwiesen [7]. Während der Umformung muß niedrige Reibung zwischen Blech und Werkzeug sicherstellen, daß hohe Umformgrade ohne Reißen des Bleches erreicht werden. Je nach Bauteilgeometrie kann es erforderlich sein, die Reibung in einzelnen Bereichen des Werkzeugs gezielt zu erhöhen, um den Materialfluß und die Blechdicke zu steuern. Das tribologische System (Blech, Werkzeug, Schmierstoff und Umgebungsmedium) legt fest, in welchen Grenzen der Ziehprozeß beeinflußt werden kann und wie störend sich Schwankungen in den Prozeßbedingungen auswirken.

Neue Entwicklungen von Werkzeugbeschichtungen und Schmierstoffen haben bereits zu deutlichen Fortschritten geführt [8]. Für Bleche wurden Verfahren entwickelt, um Oberflächenstrukturen mit Mikroschmieraschen zu erzeugen, die den Schmierstoff während der Umformung in der Oberfläche halten und bei hoher Beanspruchung als Schmierstoffreservoir dienen.

Als schwierig erweist sich die Optimierung der mit diesen Verfahren herstellbaren Topografien, da zur Zeit nicht bekannt ist, welche geometrischen Eigenschaften eine aus tribologischer Sicht optimierte Topografie aufweisen sollte (Bild 1).

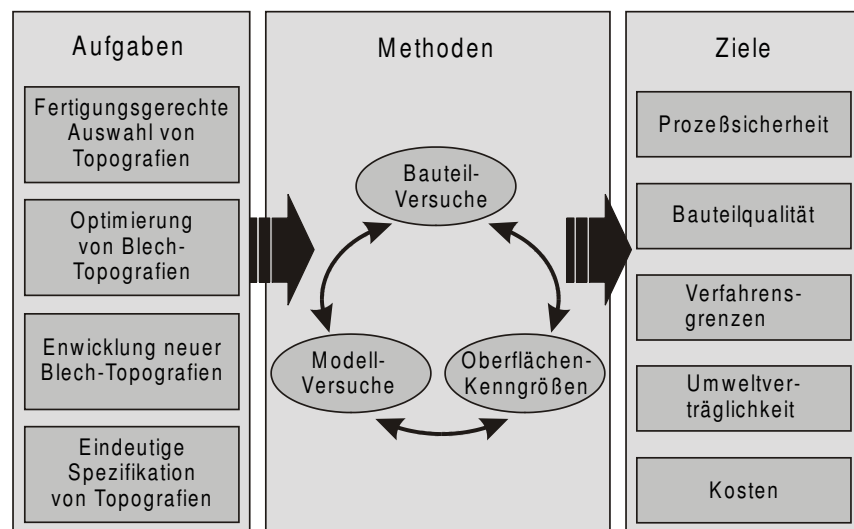


Bild 1: Forschungsthemen auf dem Gebiet der Topografie von Umformblechen

Voraussetzung zur Weiterentwicklung der Topografien sind Methoden zur Beurteilung der tribologischen Eigenschaften.

Die Untersuchung der Topografie im Realprozeß bietet übertragbare Ergebnisse, ist aber zum einen sehr aufwendig und zum anderen durch die geringe meßtechnische Zugänglichkeit eingeschränkt. Im Gegensatz dazu lassen sich Rauheitsmessungen mit geringem Aufwand durchführen, es liegen aber nur wenige Erkenntnisse darüber vor, wie das tribologische Verhalten anhand von Rauheitskenngrößen beurteilt werden kann. Tribologische Modellversuche liegen bezüglich Übertragbarkeit und Aufwand zwischen Realteilversuchen und der Oberflächenvermessung und bieten die Möglichkeit, die tribologischen Mechanismen unter verschiedenen Beanspruchungsbedingungen zu untersuchen. Widersprüchliche Ergebnisse verschiedener Anlagen haben jedoch gezeigt, daß die Übertragbarkeit auf den Realprozeß nicht immer gegeben ist.

Wenn es gelingt, durch den parallelen Einsatz mehrerer Methoden und den Vergleich der Ergebnisse ein verbessertes Verständnis über die Wirkungsweise der Topografie zu erlangen, dann können daraus sowohl geeignetere tribologische Prüfmethoden als auch geeignetere Oberflächen-Meßmethoden abgeleitet werden. Diese Methoden bieten dann eine Basis zur Entwicklung, Auswahl und Optimierung sowie zur eindeutigen Beschreibung der Topografie von Blechen.

2 Stand der Erkenntnisse

Thema dieser Arbeit ist die Beurteilung der geometrischen Eigenschaften von Blechoberflächen und deren Einfluß auf die Reibung während der Umformung.

Mit Bild 2 wird zunächst die Abgrenzung zu benachbarten Forschungsgebieten dargestellt. Die mittlere Spalte enthält die im Rahmen dieser Arbeit behandelten Themen von der Auswirkung der geometrischen Eigenschaften auf die tribologischen Systemeigenschaften bis zur Reibung während der Umformung. In der linken Spalte sind Gebiete angegeben, deren Kenntnis vor der Beurteilung der Topografie erforderlich ist. Die rechte Spalte enthält die Gebiete neben der Reibung, auf die sich die Topografie zusätzlich auswirkt. Bei der Beurteilung von Topografien sind diese Gebiete zu berücksichtigen, da sie zusätzliche und zum Teil gegensätzliche Anforderungen an die Eigenschaften der Topografie stellen.

In Bild 2 sind die Gebiete in 8 Gruppen eingeteilt und numeriert, um sie im folgenden kurz zu beschreiben. Weiterführende Literatur ist im Bild angegeben.

1. Ein an das Thema dieser Arbeit angrenzendes Gebiet betrifft die Herstellung der Bleche [9-23]. Die Kenntnis der Herstellungsverfahren ist Voraussetzung für die Beurteilung der Blechoberfläche. Eine Vielzahl von Arbeiten beschäftigt sich mit den Verfahren zur Erzeugung der Struktur der Walzen und andere mit dem Walzprozeß [24-26] sowie dem Übertragungsverhalten der Topografie von der Walze auf das Blech [27-29]. Es liegen keine neueren Literaturstellen vor, in denen die aktuellen Verfahren verglichen werden, weshalb Kapitel 2.1 eine Gegenüberstellung der aktuellen Dressierverfahren enthält.
2. Es ist bekannt, daß tribologische Eigenschaften nicht anhand eines einzelnen Elementes des tribologischen Systems beurteilt werden können, da tribologische Eigenschaften Systemeigenschaften sind, bei denen Grundkörper, Gegenkörper, Schmierstoff und Umgebungsmedium in Wechselwirkung stehen [30, 31]. Zur Beurteilung des tribologischen Verhaltens der Blech-Topografien müssen gleichzeitig Blechoberfläche, Werkzeugoberfläche [32-38], Schmierung [39-41] und Umgebung [42] berücksichtigt werden. Die Beurteilung unterschiedlicher Topografien mit einem Schmier- und Werkzeugwerkstoff ist nicht in jedem Fall auch für andere Schmier- und Werkzeugwerkstoffe gültig.
3. Zusammen mit der tribologischen Systemstruktur bildet das Beanspruchungskollektiv das tribologische System (DIN 50320). Um die tribologischen Mechanismen des Realprozesses korrekt abzubilden, ist die Kenntnis der tribologischen Beanspruchung in realen Bauteilen erforderlich.
4. Auf die Verfahrensgrenzen der Blechumformung hat die Reibung einen deutlichen Einfluß, gleiches gilt aber auch für Werkzeugkonstruktion [43-45], Umformverfahren [1-3, 46, 73] und Prozeßparameter wie Niederhalterkräfte und Hubzahlen [8, 47]. Für die Entscheidung, ob der Aufwand zur Optimierung der Topografie gerechtfertigt ist, müssen auch die Möglichkeiten dieser Gebiete berücksichtigt werden.

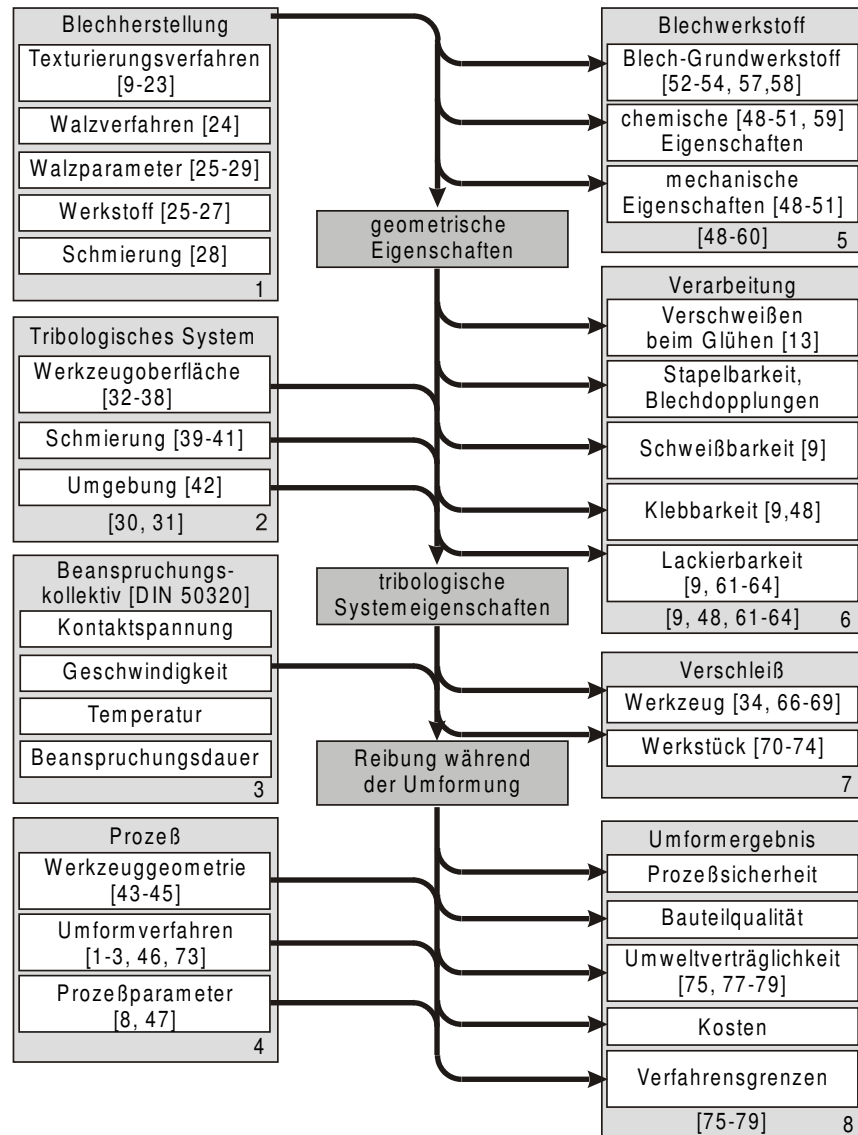


Bild 2: Abgrenzung zu benachbarten Forschungsthemen

5. Mit der Topografie werden im Rahmen dieser Arbeit nur die geometrischen Eigenschaften der Blechoberfläche untersucht. Weitere Arbeiten behandeln die chemischen und mechanischen Oberflächeneigenschaften, die ebenfalls die tribologischen Mechanismen und damit die Reibung beeinflussen [48-60].

6. Das tribologische Verhalten des Bleches zu verbessern ist nur ein Ziel, das mit der Aufbringung der Topografie erreicht werden soll. Die in der Tandemstraße erzeugte Topografie muß während des anschließenden Glühens des zum Coil aufgewickelten Bleches sicherstellen, daß die aufeinanderliegenden Oberflächen nicht verkleben [13]. Nach dem Glühen wird im Dressierstich eine weitere Dickenreduktion vorgenommen, um zum einen die gewünschte Topografie zu erzeugen, und zum anderen um die durch das Glühen entstandene Streckgrenzenüberhöhung rückgängig zu machen. Weitere Kriterien sind die Lackierbarkeit, Haftung von Klebern und die Schweißbarkeit des Bauteils, die ebenfalls von den geometrischen Eigenschaften der Blechoberfläche beeinflußt werden [9, 48, 61-64].
7. Neben der Reibung bestimmt die Topografie auch den Verschleiß [65]. Der Schwerpunkt der Verschleißuntersuchungen in der Blechumformung lag bisher auf der Seite der Werkzeuge [34, 66-69]. Durch den steigenden Anteil verzinkter Bleche werden aber auch zunehmend Untersuchungen des Abriebs von Blechoberflächen durchgeführt [70-74]. Der Einfluß der Topografie auf den Verschleiß von Werkzeug und Blech ist nicht Inhalt dieser Arbeit.
8. Neben den durch die Reibung beeinflußten Verfahrensgrenzen sind weitere Kriterien zur Beurteilung der Topografie anwendbar. Für eine hohe Auslastung der Umformsysteme wird eine hohe Prozeßsicherheit gefordert. Die Topografie muß trotz kleinerer Schwankungen in den Prozeßbedingungen eine konstant hohe Bauteilqualität sicherstellen. Eine Topografie, die wenig Schmierstoff benötigt, ist aus ökonomischen und ökologischen Gründen günstiger zu beurteilen als eine, die bei gleichen tribologischen Leistungen mehr Schmierstoff aufnimmt [75-79].

Diese Darstellung verdeutlicht, daß es sich beim Einfluß der Topografie auf die Reibung um ein sehr begrenztes Teilgebiet der Blechumformung handelt, und daß bei der Entwicklung von Topografien komplexe Randbedingungen zu berücksichtigen sind. Wie Erfahrungen aus Preßwerken zeigen, hat die Topografie einen entscheidenden Einfluß auf die Prozeßsicherheit und das Umformergebnis. Bereits prozeßbedingte Schwankungen in der Qualität der Topografie können zum Versagen des Bauteils und zu Pressenstillständen führen.

Um die Blechtopografien beurteilen zu können, werden in den folgenden Kapiteln die Herstellung (Kapitel 2.1), tribologische Modellprüfmethoden (Kapitel 2.2) und die Methoden zur Vermessung der Blechoberflächen (Kapitel 2.5) beschrieben.

2.1 Dressierv Verfahren

Seit den letzten Veröffentlichungen, in denen die Texturierungsmethoden vergleichend gegenübergestellt wurden, sind einige Neuerungen hinzugekommen, weshalb die aktuell zur Verfügung stehenden Verfahren im folgenden beschrieben werden. Die Daten stammen aus verschiedenen Veröffentlichungen [10-23, 80] und Gesprächen mit Anwendern von Texturierungsanlagen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

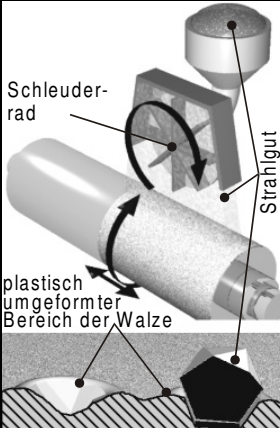
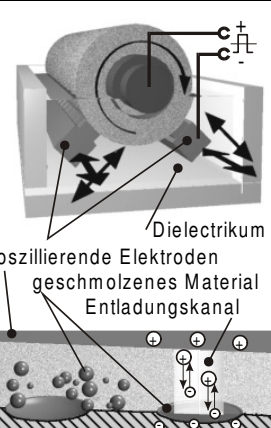
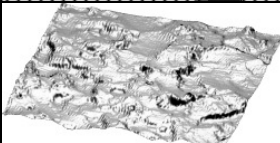
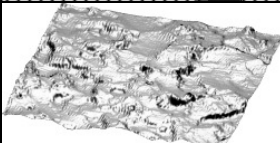
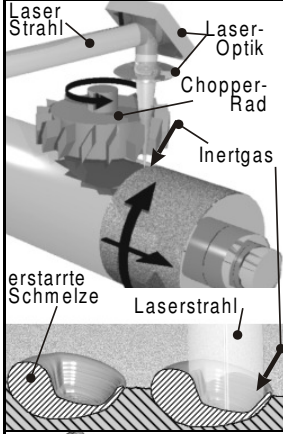
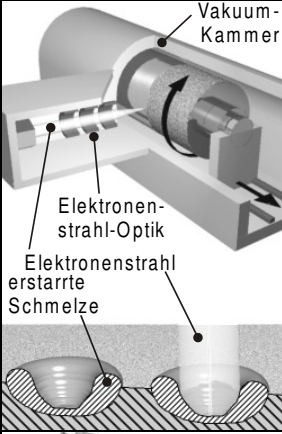
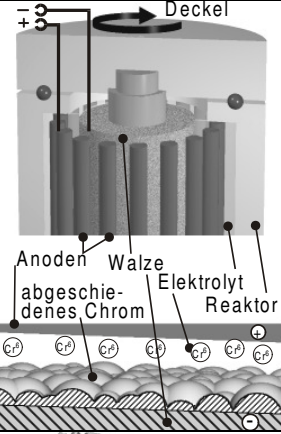
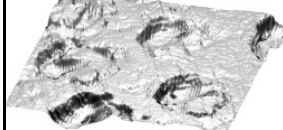
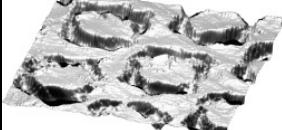
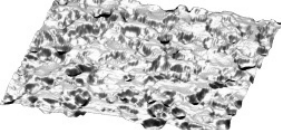
Bezeichnung	SBT Shot Blast Texturing	EDT Electrical Discharge Texturing
Anlagenprinzip		
Mechanismus der Strukturzeugung auf Walze		
Topografie auf Blech Fläche 660x660µm² Höhe 5 x überhöht		
Regelmäßigkeit	stochastisch	stochastisch
Rauheit der Walzen	R _a 1-6 µm	R _a 0,8-10 µm
Spitzenzahl (PC)	niedrig bis mittel	hoch
Abhängigkeit von PC u. R _a	deutlich voneinander abhängig	PC abhängig von R _a
Übertragungsverhalten trocken / naß	eingeschränkt / reduziert	gut / reduziert
Reproduzierbarkeit	schlecht	gut
Herstellungsdauer	20 min / Walze	25-60 min / Walze
Kosten pro Walze	gering	mittel
technologischer Aufwand	gering	mittel

Tabelle 1: Gegenüberstellung der aktuellen Dressierverfahren

LT Laser Texturing	EBT Electron Beam Texturing	Pretex Preussag Texturing
		
		
(semi-) deterministisch (pseudostochastisch ist möglich)	deterministisch oder pseudostochastisch	stochastisch
R_a 0,8-10 μm , Kraterabstand 40-420 μm	R_y bis 25 μm , Krater $\varnothing$ 90 - 530 μm	R_a 0,2-20 μm
niedrig, bis hoch für pseudostochastisch	mittel, bis hoch für pseudostochastisch	hoch
PC gering abhängig von R_a	PC gering abhängig von R_a	PC gering abhängig von R_a
deutlich reduziert / stark reduziert	gut / deutlich reduziert	gut / kaum reduziert
gut	gut	gut
30-90 min / Walze, pseu- dostochastisch länger	30 min / Walze, pseu- dostochastisch länger	120 min / 2 Walzen
hoch	hoch	mittel
hoch	hoch	gering

Fortsetzung von Tabelle 1: Gegenüberstellung der aktuellen Dressierverfahren

Nach dem Kaltwalzen werden die Bleche gegläht, um für das Tiefziehen die volle Umformbarkeit wiederherzustellen. Damit die einzelnen Lagen der Coils beim Glühen nicht verkleben, kann das letzte Walzenpaar der Kaltwalzstraße aufgeraut werden. Während des Walzvorgangs wird die Rauheit der Walzen auf das Blech aufgeprägt. Nach dem Glühen weist das Blech eine ausgeprägte Streckgrenze auf, was bei der Umformung zu Fließfiguren führen kann. Durch das Nachwalzen des Bleches im

Dressiergerüst können diese Effekte vermieden werden. Gleichzeitig wird das Nachwalzen dazu genutzt, die endgültige Oberflächenrauheit herzustellen. Die Struktur der Dressierwalzen ist der durch das Kaltwalzen aufgebrachten Struktur überlagert.

Zum Aufrauen der Walzen stehen zur Zeit 5 Verfahren zur Verfügung. Das Schleifen wird noch für Aluminium verwendet, es soll aber zunehmend durch andere Verfahren ersetzt werden.

Beim Shot Blast Texturing (SBT) wird ein kantiges Strahlmittel von einem Schleuderrad auf die Walze beschleunigt. Beim Auftreffen auf die Walze deformieren die Strahlkörner die Walzenoberfläche plastisch und schlagen Partikel heraus. Die Rauheit der Walze kann durch die Geschwindigkeit des Schleuderrads, das Strahlmittel, Walzenhärte, Strahlmitteldurchsatz und Bearbeitungsdauer variiert werden.

Beim Electrical Discharge Texturing (EDT) werden Elektroden radial an die rotierende Walzenoberfläche herangefahren und in axialer Richtung oszilliert. Durch den Erodierimpuls formieren sich die Partikel im Dielektrikum zwischen Walze und Elektrode zu einer Dipolbrücke, und es fließt Strom. Ein kleiner Bereich der Walzenoberfläche wird aufgeschmolzen, und im Dielektrikum bildet sich eine Gasblase. Bei Ausschalten des Erodierimpulses implodiert die Gasblase und der geschmolzene Walzenwerkstoff wird herausgeschleudert. Die Rauheit kann unabhängig von der Walzenhärte über Parameter wie Spannung, Steuerzeiten und Abstand der Elektroden variiert werden. Im Vergleich zu SBT lassen sich mit EDT höhere Spitzenzahlen und geringere Rauheiten mit höherer Reproduzierbarkeit herstellen.

Beim Laser Texturing (LT) wird ein Laserstrahl auf die Walze fokussiert und schmilzt einen kleinen Bereich der Oberfläche auf. Ein Chopperrad unterbricht den Strahl und die Schmelze wird durch den Druck des Plasmas und ein Inertgas ausgeblasen. Dabei sammelt sich die Schmelze entweder zu einem Wulst um den Kraterrand oder wird an einer Seite des Kraters angehäuft und erstarrt dort. Die Walze rotiert und wird langsam in axialer Richtung vorgeschoben. Zur Einstellung der Rauheit werden Laserleistung, Vorschub, Walzen- und Chopperdrehzahl sowie das Inertgas genutzt.

Das Electron Beam Texturing (EBT) verwendet zum Aufschmelzen des Walzenwerkstoffs einen Elektronenstrahl. Ein Teil des aufgeschmolzenen Volumens verdampft, so daß der Dampfdruck die Schmelze zu einem Ring um den Krater anhäuft. Die Walze wird in einer Vakuumkammer rotiert und axial verschoben. Es ist möglich, die Drehung der Walze und die Schußfrequenz so zu synchronisieren, daß die Krater in allen Richtungen regelmäßig angeordnet sind. Wie auch beim Laser Texturing lassen sich die Krater so weit überlappend anordnen, daß die regelmäßige Struktur nicht mehr zu erkennen ist. Diese Oberflächen werden pseudostochastisch genannt.

Die neueste und noch am wenigsten bekannte Textur ist Pretex. Sie wurde in Zusammenarbeit der Preussag Stahl AG, der Winterthurer Metallveredelung AG und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung entwickelt. Zur Herstellung der mit Pretex bezeichneten Blechttopografie wird die Walze mit dem Topochrom-Verfahren elektrolytisch hartverchromt. Dazu wird die Walze in einem Re-

aktor mit einem Chromelektrolyten umgeben. Die Steuerung der Spannung zwischen dem Anodenkäfig und der als Kathode geschalteten Walze führt dazu, daß auf der Walze kugelabschnittförmige Strukturelemente abgeschieden werden.

Die Angabe der Herstellungsmethode einer Blechoberfläche reicht für eine funktionsgerechte Beschreibung nicht aus. Um die Oberfläche eindeutig zu beschreiben, müssen zu jedem Herstellungsverfahren andere Prozeßparameter angegeben werden. Ein direkter Vergleich der Dressierverfahren ist nur schwer möglich. In Tabelle 1 wird dennoch versucht, die wichtigsten Merkmale der Verfahren gegenüberzustellen. Der Vergleich der Lackierbarkeit wurde in diese Tabelle nicht mit aufgenommen, da noch keine gesicherten Ergebnisse über den Einfluß der Dressierverfahren vorliegen. Es ist davon auszugehen, daß für das Lackierergebnis vor allem längerwellige Anteile der Topografie relevant sind, die weniger vom Dressierverfahren als von der Vorbehandlung der Walzen und vom Walzprozeß abhängen.

Ebenso wurde ein Vergleich der Standzeiten nicht vorgenommen. Bei SBT ist die Härte der Walzen begrenzt, weshalb sie im allgemeinen schneller verschleifen. Mit den übrigen Verfahren lassen sich härtere und damit verschleißfestere Walzen bearbeiten. Dieser Vorteil ist aber nicht voll nutzbar, wenn Topografien mit höheren Spitzenzahlen hergestellt werden, da die feineren Spitzen schneller verschleifen. Spröde Ränder von mit Laser Texturing hergestellten Kratern verschleifen bereits während des Dressierens der ersten Coils. Nach dieser Einlaufphase kann die Oberflächenqualität über einen längeren Zeitraum konstant bleiben. Zur Erhöhung der Standzeiten ist es möglich, die Walzen nach dem Dressieren zu verchromen. Die Topochrom-Schicht zur Herstellung von Pretex ist bereits eine Chrom-Schicht. Gegenüber nicht verchromten SBT-Walzen wird trotz höherer Spitzenzahlen bei Pretex von über 10-fach höheren Standzeiten berichtet [11].

2.2 Prüfmethoden

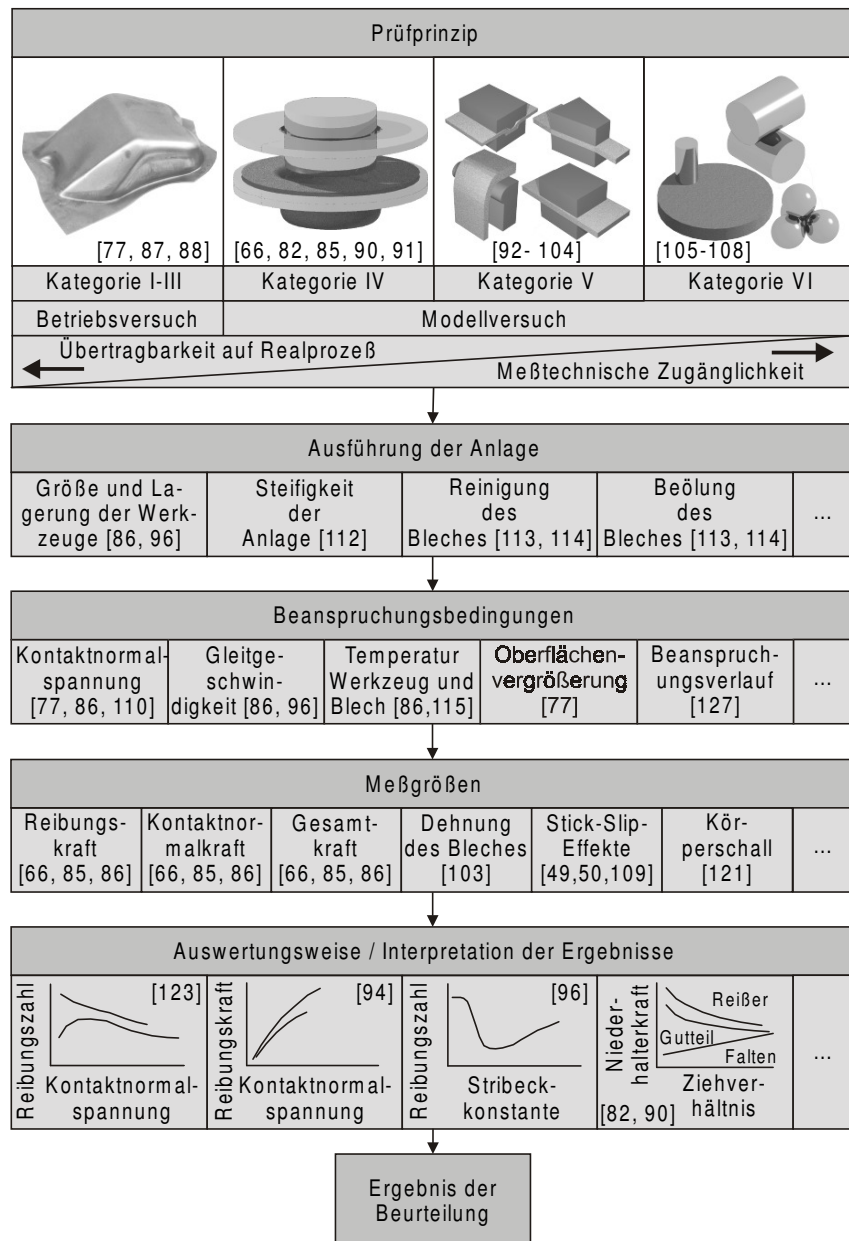


Bild 3: Prüfmethoden zur Beurteilung tribologischer Systemeigenschaften in der Blechumformung

Experimentelle Untersuchungen stellen zur Zeit die einzige Möglichkeit dar, die tribologischen Eigenschaften von Blech-Topografien praxisgerecht zu beurteilen. Die Reibmodelle erlauben es noch nicht, die wesentlichen in der Blechumformung beobachteten Phänomene als Funktion der Topografie mit ausreichender Genauigkeit mathematisch zu beschreiben.

Einen Überblick über die in der Blechumformung üblichen Prüfmethoden bieten neben einigen Büchern [31, 81, 82] vor allem Artikel in Zeitschriften und Tagungsbänden [83, 84] sowie die Dissertationen von Witthüser [85] und Netsch [86].

Die Genauigkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Realprozeß hängt in entscheidendem Maße vom verwendeten Prüfprinzip ab. In Bild 3 sind die in der Blechumformung üblichen Prinzipien entsprechend der DIN 50322 in Kategorien eingeteilt. In dieser Darstellung wird deutlich, daß sich die Anforderungen nach meßtechnischer Zugänglichkeit und Übertragbarkeit auf den Realprozeß widersprechen. Für die Auswahl eines Prüfprinzips muß ein geeigneter Kompromiß zwischen allen Anforderungen gefunden werden, und je nach Untersuchungsziel sind unterschiedliche Prinzipien einzusetzen. Bei einem Modellversuch zur Beurteilung eines tribologischen Systems sind die Anforderungen anders zu gewichten als für die Bestimmung der Parameter eines Reibmodells oder für die Untersuchung grundlegender tribologischer Mechanismen. Um die Parameter eines Reibmodells zu bestimmen muß die Reibung quantitativ als physikalische Größe erfaßt werden, während für die Beurteilung eines tribologischen Systems auch ein qualitativer Vergleich ausreichen kann. Zur Untersuchung tribologischer Mechanismen ist eine hohe meßtechnische Zugänglichkeit erforderlich, während bei der Beurteilung tribologischer Systeme die Übertragbarkeit auf den Realprozeß im Vordergrund steht.

2.2.1 Prüfprinzipien

Bauteilversuche (Bild 3, Kategorie I-III)

Untersuchungen an Realteilen in Preßwerken bieten die höchste Übertragbarkeit der Ergebnisse. Das Umformergebnis läßt sich anhand von Ausschußquote, Ausmaß der Faltenbildung oder Häufigkeit und Größe von Reißern oder Einschnürungen beurteilen. Die Ergebnisse von Pfestorf [87, 88] zeigen, daß es mit dieser Methode möglich ist, die mit unterschiedlichen Blech-Topografien erzielten Umformergebnisse zu vergleichen.

Der Aufwand zur Durchführung dieser Versuche ist im allgemeinen wesentlich höher als bei vereinfachten Modellversuchen. Die laufende Serienproduktion sollte nicht beeinträchtigt werden.

Näpfe und Modellteile (Bild 3, Kategorie IV)

Vereinfachte Bauteile wie rechteckige oder rotationssymmetrische Näpfe bieten praxisnahe tribologische Untersuchungen im Labormaßstab [85]. Je nach Werkzeuggeometrie können höhere Tief- oder Streckziehanteile erreicht werden. Als Maß für die Güte des tribologischen Systems dient in den meisten Fällen die Ziehtiefe des Bauteils bei Reißerbeginn [89, 90]. Aussagekräftigere Ergebnisse bei größerem Ver-

suchsaufwand bietet die Erstellung eines Arbeitsdiagramms, bei dem die Falten- und Reißergrenzen in Abhängigkeit von Niederhalterkraft und Blechgeometrie ermittelt werden [82, 90].

Wegen der vereinfachten Geometrie lassen sich verschiedene Ansätze zur Abschätzung von Umformkräften, Dehnungen und Werkzeugbeanspruchungen anwenden [66]. Die Werkzeuge kann man mit entsprechender Meßtechnik versehen, ohne die Serienproduktion zu beeinträchtigen.

Grahner hat in seinen Untersuchungen an einem rotationssymmetrischen Napf mit Drucksensoren im Werkzeug die Entstehung von sogenannten Makroschmiertaschen nachgewiesen [91]. Während des Ziehvorgangs dickt die Ronde am Rand infolge der tangentialen Druckspannungen auf und behindert das Entweichen des Schmierstoffs aus dem Raum zwischen Rondenrand und Matrizenrundung. Zu stark abstrahierte Modellversuche können diese Effekte nicht abbilden. Ob in einem realen Bauteil Makroschmiertaschen entstehen, hängt von der Werkzeuggeometrie ab. Untersuchungen an einem rechteckigen Napf zeigen, daß in den Ecken des Bauteils das Blech nicht am äußeren Rand des Flansches, sondern innen aufdickt [91]. In diesem Fall können keine Makroschmiertaschen entstehen.

Ausschnitte aus Werkzeugen (Bild 3, Kategorie V)

Die zeitlich und örtlich variierenden Beanspruchungen in realen Werkzeugen, Näpfen und Modellteilen beschränken die Möglichkeiten zur Beurteilung des tribologischen Systems. Je nach Umformvorgang sind an verschiedenen Stellen des Werkzeugs unterschiedliche Reibungszahlen vorhanden [86, 92]. Um die tribologischen Eigenschaften an diesen Stellen beurteilen zu können, werden Anlagen eingesetzt, die jeweils einen einzelnen Ausschnitt aus dem Werkzeug abbilden [83, 84, 93].

Der tribologische Kontakt zwischen Werkzeug und Blech in einem ebenen Ausschnitt des Werkzeugs kann simuliert werden, indem ein Werkzeug unter Normalkraft linear [94, 95] oder rotatorisch [96, 88] über ein auf einer festen Unterlage montiertes Blech bewegt wird. Diese Versuche mit einseitigem Werkzeugkontakt berücksichtigen den Spannungszustand in Blechebene nicht [94]. Streifenziehversuche, bei denen der Blechstreifen zwischen zwei ebenen Werkzeugen hindurchgezogen wird, simulieren beidseitigen Werkzeugkontakt [97, 86]. Hohe Beanspruchungen können zur Dehnung des Blechwerkstoffs zwischen den Werkzeugen führen, was die Einglättung durch Kontaktnormalspannungen deutlich verstärkt [98-100]. Eine Variante des Streifenziehversuchs in der Flachbahn stellt der Multi-Frottement-Test dar, bei dem einer der beiden Werkzeugkörper durch einen quer zur Ziehrichtung angeordneten Zylinder gebildet wird [101].

Die Zugspannungen mit überlagerten Biegespannungen durch das Ziehen des Bleches um die Kanten von Matrize und Stempel werden mit dem Umlenkversuch simuliert [66]. Um den im Flanschbereich eines Tiefziehwerkzeugs vorherrschenden Zug-Druck-Spannungszustand zu berücksichtigen, lassen sich beim Umlenk- und beim Flachbahnversuch zusätzliche seitliche Werkzeuge anbringen, die das Blech während des Versuchs seitlich stauchen [83].

Eine hohe tribologische Beanspruchung wird mit dem Ziehsickenversuch erreicht [102]. Die mehrfache Wechselbiegung des Bleches führt zur Verfestigung des Werkstoffs und zu mehrfacher Beanspruchung einzelner Stellen der Blechoberfläche. Beim Umlenk- und beim Ziehsickenversuch sind in der Zugkraft sowohl Anteile der Reibung als auch Anteile aus der Umformung des Bleches enthalten. Ein übliches Verfahren zur Trennung beider Anteile besteht darin, die zur Umformung benötigte Kraft zu berechnen und von der gemessenen Gesamtkraft abzuziehen [66, 93]. Die Berechnung der Umformkraft ist jedoch wegen der notwendigen starken Vereinfachungen unsicher [86]. Um die Umformkraft genauer zu bestimmen, bieten verschiedene Anlagen die Möglichkeit, die Versuche mit quasi reibungsfrei gelagerten Walzen durchzuführen. Die Geometrie des Walzen-Werkzeugs führt dabei zu der gleichen Umformung des Bleches wie das reibungsbehaftete Werkzeug. Die am reibungsfrei gelagerten Werkzeug gemessene Zugkraft entspricht weitgehend der Umformkraft. Stehen keine Walzenwerkzeuge zur Verfügung, kann das von Witthüser beschriebene Zwei-Bleche-Verfahren angewendet werden [85].

Eine weitere Möglichkeit, die Reibungskraft unabhängig von der Umformkraft zu ermitteln, wird beim für die Simulation von Streckzieh-Vorgängen vorgesehenen modifizierten Duncan-Shabel-Test angewendet [103, 94]. In der ursprünglichen Version werden keine Kräfte, sondern nur Dehnungen in dem der Zarge entsprechenden Bereich gemessen. Bei niedriger Reibung fließt mehr Material über die feststehenden Rollen, und die gemessene Dehnung ist niedriger als bei hoher Reibung. Der reibungsfreie Fall wird mit drehbar gelagerten Rollen simuliert. Der modifizierte Duncan-Shabel-Test mißt zusätzlich bei feststehenden Rollen das durch die Reibung induzierte Drehmoment. Dieses Moment entspricht der mittleren Reibungskraft über dem Radius und enthält keine Anteile aus der Umformung. Diese Methode ist auch beim Verschleißprüfstand am Institut des Autors realisiert, da beim Ziehsickenversuch das Drehmoment an dem durch eine Welle abgebildeten Sickenstab gemessen wird. Modellversuche, bei denen die Werkzeuge wie bei diesem Prüfstand aus mehreren hintereinander angeordneten Werkzeugausschnitten bestehen, erfordern besondere Aufmerksamkeit, weil sich die Bereiche gegenseitig beeinflussen. Die beim Umlenkversuch gemessenen Reibkräfte hängen davon ab, ob das Blech unbelastet in die Rundung einläuft oder ob die Topografie, wie in realen Ziehwerkzeugen, bereits durch flache oder gar Sicken-Werkzeuge verändert wurde.

Das Stülpdücken von Rohren bietet die Möglichkeit, Reibungsuntersuchungen an einem Bauteilausschnitt unter Zug-Druck- oder Druck-Druck-Spannungszuständen bei gleichzeitig überlagerter Biegung durchzuführen [104]. Um die Anteile von Umformung und Reibung zu trennen, werden sowohl das freie als auch das werkzeuggebundene Stülpdücken eingesetzt. Da beim freien Stülpdücken kein Werkzeugkontakt vorliegt, entspricht die gemessene Kraft der Umformkraft. Die Reibung im werkzeuggebundenen Versuch kann aus der Differenz der Kräfte bei freiem und werkzeuggebundenem Stülpdücken ermittelt werden. Das Stülpdücken bietet die Möglichkeit, selbst unter komplexen und der Realität nahekommenden Spannungs-

zuständen im Blech die Anteile der Reibung aus den gemessenen Kräften zu trennen. Es erfordert jedoch viel Erfahrung, die Versuchsbedingungen so zu wählen, daß das Rohr unter den verschiedenen Bedingungen nicht ausknickt, und daß beim freien und gebundenen Stülpen die gleiche Bauteilgeometrie erreicht wird.

Allgemeine tribologische Modellversuche (Bild 3, Kategorie VI)

Noch weiter abstrahierte Prinzipien sind in Modellversuchen realisiert, die nicht speziell für die Blechumformung entwickelt wurden, sondern allgemeine tribologische Untersuchungen ermöglichen sollen. Stift-Scheibe-Tribometer [105, 106], Kugel-Platte-Prüfsysteme [DIN 50324], Vier-Kugel-Apparate [DIN 51350, 94, 107, 108] und die Prüfstände nach Brugger [106] sind Beispiele dieser Prinzipien. Zur Beurteilung von Umformschmierstoffen werden diese Anlagen vereinzelt eingesetzt, es ist jedoch bekannt, daß die Ergebnisse nur sehr bedingt auf reale Ziehprozesse übertragbar sind [39, 106-108]. Die Untersuchung von Blechen unterschiedlicher Topografien ist mit diesen Prinzipien nicht vorgesehen.

2.2.2 Ausführung der Anlage

Im Streifenziehversuch können Stick-Slip-Effekte ein Indiz für kritische tribologische Bedingungen sein und kurzzeitiges Zusammenbrechen des Schmierfilms anzeigen. Das tribologische System regt Stick-Slip-Effekte besonders stark an, wenn große Unterschiede zwischen Haft- und Gleitreibung bestehen [109], oder die Reibungszahl mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit stark abnimmt [31].

Mehrere Untersuchungen bestätigen, daß das Umformverhalten von tribologischen Systemen mit geringer Neigung zu Stick-Slip günstiger zu beurteilen ist [49, 50, 110]. Ob und unter welchen Beanspruchungen in Modellversuchen Stick-Slip-Effekte auftreten, hängt neben dem tribologischen System von den Eigenfrequenzen der Prüfeinrichtung und damit von den Massen und Steifigkeiten auch des Bleches und der Werkzeuge ab [49, 105, 111]. Da ein reales Werkzeug im allgemeinen steif ist und nur selten zu Stick-Slip neigt, sollte auch die Versuchseinrichtung möglichst steif aufgebaut sein [112].

Die Art der Reinigung des Bleches beeinflusst ebenfalls die Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen [113, 114]. Auf dem Blech können, bedingt durch den Herstellungsprozeß oder den Transport, Verunreinigungen vorhanden sein, die Reibung und Verschleiß beeinflussen. Bei der Durchführung von Modellversuchen werden die Bleche unterschiedlich gereinigt. Während für manche Versuche das Blech mit Reinigungsmitteln entfettet wird, reinigt man in anderen Untersuchungen die Bleche durch Abwischen mit Lappen. Darüber, wie sich diese Reinigungsmethoden auf die Ergebnisse auswirken, liegen nur wenige Erkenntnisse vor [77].

Auch wenn man auf einer Anlage alle Versuchsbedingungen konstant hält und nur die Größe der Werkzeuge variiert, werden nicht vergleichbare Reibungszahlen gemessen [86]. Allein die Größe der Werkzeuge bewirkt nach Untersuchungen von Emmens Unterschiede in den Reibungszahlen bis über 100 % [96].

2.2.3 Beanspruchungen

Um die gleichen tribologischen Mechanismen wie im Realprozeß zu erreichen, muß der Modellversuch vergleichbare tribologische Beanspruchungen simulieren. Die wichtigsten tribologischen Beanspruchungskenngößen sind nach DIN 50320 Flächenpressung, Gleitgeschwindigkeit, Temperatur und Beanspruchungsdauer.

Flächenpressung

Die Flächenpressung beeinflusst direkt die Einglättung der Topografie. Unter dem Niederhalter von Ziehwerkzeugen werden unter normalen Bedingungen Flächenpressungen von einigen N/mm^2 eingestellt. Durch das partielle Aufdicken des Bleches differieren die lokalen Beanspruchungen deutlich [85, 96, 107]. An aufgedickten Stellen können Kontaktnormalspannungen in der Größenordnung der Fließgrenze des Bleches entstehen, die dazu führen, daß der Niederhalter angehoben wird, so daß andere Stellen des Bleches nicht mehr mit dem Werkzeug in Kontakt stehen. Mit der Methode der Finiten Elemente wurde die Verteilung der Kontaktnormalspannung über Werkzeuggradien berechnet. Die Ergebnisse zeigen, daß einfache Berechnungsansätze, wie die häufig verwendete Eytelweinsche Gleichung, die komplexe Verteilung der Kontaktnormalspannung über dem Radius nur ungenügend abbilden können [69, 77, 86].

Gleitgeschwindigkeit

Die Gleitgeschwindigkeit läßt sich über die Stempelgeschwindigkeit abschätzen oder durch an den Platinenrand angeschweißte Drähte und Meßzungen messen. Typische Werte liegen im Bereich zwischen 50 und 200 mm/s, in Einzelfällen werden Modellversuche auch mit 1000 mm/s durchgeführt [96].

Temperatur

Die Temperatur im Schmierspalt ist wegen der starken Temperaturabhängigkeit der Viskosität der üblichen Schmierstoffe von entscheidender Bedeutung für die Reibung [86, 115]. Ein Schmierstoff mit hoher Viskosität kann von der Topografie besser in der Umformzone gehalten werden als ein niedrigviskoser. Die Temperatur der Bleche und Werkzeuge steigt durch die Umform- und Reibwärme deutlich an. Da die an der Oberfläche entstehenden Reibwärme innerhalb sehr kurzer Zeit in das Blech und das Werkzeug abfließt, sind die Maximalwerte nicht meßbar. Berechnungen von Blitztemperaturen lassen auch unter den Bedingungen der Blechumformung Temperaturerhöhungen von mehreren hundert Grad vermuten [31, 116].

Um im Modellversuch das Ausfließen des Schmierstoffs aus der Topografie richtig abzubilden, muß sichergestellt werden, daß Reib- und Umformwärme in der gleichen Größenordnung wie im Realprozeß vorliegen. Für die Reibwärme sind insbesondere Kontaktnormalspannung und Gleitgeschwindigkeit genau abzubilden. Die Umformwärme simuliert man durch plastische Umformung des Blechwerkstoffs. Läuft der Modellversuch nicht im Dauerbetrieb, dann ist die Erwärmung der Werkzeuge durch eine externe Temperierung zu simulieren.

Beanspruchungsdauer

Die Beanspruchungsdauer während einer Umformung beträgt im Realprozeß nur wenige Zehntelsekunden. In dieser Zeit variieren die Beanspruchungskenngrößen als Funktion der Zeit und des Ortes.

Durch die hohen in der Blechumformung üblichen Stückzahlen verändern sich die Verläufe der Beanspruchungen auch über der Lebensdauer des Werkzeugs. Nach der Erwärmung der Werkzeuge und nach dem Einlaufverschleiß wird ein Zustand erreicht, in dem das Werkzeug mehr oder weniger kontinuierlich bis zum Versagen verschleißt. Allein durch die Beanspruchungsdauer nach DIN 50320 lassen sich diese Beanspruchungsverläufe nicht beschreiben.

Der zunehmende Verschleiß im Werkzeug führt zu einer Veränderung der Werkzeugtopografie und damit der Reibung. Will man den Verschleißzustand des Werkzeugs für Reibungsuntersuchungen korrekt abbilden, sind ähnlich viele Beanspruchungszyklen wie bei realen Bauteilen durchzuführen. Um den dafür erforderlichen Versuchsaufwand zu umgehen, werden Reibuntersuchungen oft mit neuen Werkzeugen durchgeführt, oder das Einlaufen wird durch eine mehr oder weniger große Zahl von Versuchen vor Beginn der Messungen simuliert. Es liegen kaum Erkenntnisse darüber vor, wie sich diese Vereinfachungen auf die Ergebnisse der Reibversuche auswirken.

2.2.4 Meßgrößen

Zur Beurteilung der Reibung werden Kräfte und Wege bzw. Geschwindigkeiten gemessen. Einige Modellversuche sind zusätzlich mit spezieller Meßtechnik zur genaueren Untersuchung der tribologischen Mechanismen ausgerüstet. Azushima [117, 118] verwendet durchsichtige Werkzeuge und kann so den Schmierstofffluß während der Umformung beobachten. Am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie in Erlangen wurde ein Verfahren entwickelt, das anhand reflektierter Ultraschallwellen die Kontaktfläche während des tribologischen Kontakts mißt [119, 120].

Stick-Slip-Effekte werden üblicherweise qualitativ anhand des akustisch wahrnehmbaren Schalls beurteilt. Niedrige Frequenzen lassen sich auch in mit hoher Abtastrate aufgenommenen Kraftsignalen nachweisen. Körperschall, der durch tribologische und plastomechanische Vorgänge während der Umformung erzeugt wird, erreicht Frequenzen im MHz-Bereich und erfordert eine spezielle Meßtechnik. Von Terzyk und Haenel [121] wurde untersucht, inwieweit die Körperschallsignale eines Tiefziehwerkzeugs zur Prozeßüberwachung und Regelung eingesetzt werden können, und sie verweisen auf eindeutige Korrelationen zu den tribologischen Bedingungen.

2.2.5 Auswertungsmethode und Interpretation der Ergebnisse

Bei der Versuchsdurchführung fallen im allgemeinen viele Meßdaten an, die anschließend so ausgewertet werden müssen, daß wenige, dafür aber aussagekräftige Kenngrößen übrigbleiben. Dabei besteht die Gefahr, wichtige in den Meßdaten enthaltene Ergebnisse zu verlieren.

Bei Napfziehversuchen kann die maximale Stempelkraft oder bei Streifenziehversuchen die mittlere Reibungszahl über einen Zeitraum mit konstanten Beanspruchungsbedingungen ausgewertet werden. In diesen Daten sind keine Informationen über die Haftreibung zu Beginn des Versuchs enthalten. Die Haftreibung kann jedoch das Ziehergebnis entscheidend beeinflussen.

In der Literatur erwähnte Kenngrößen sind:

- Gleitreibungszahl [66, 85, 86],
- Haftreibungszahl [86, 87, 122],
- Stick-Slip-Beginn [DIN 50323, 49, 50, 109, 110],
- Aufschweißungsbeginn [49, 51, 94]
- maximale Kontaktnormalspannung [77, 86, 110]
- Änderung der Reibungszahl über der Kontaktnormalspannung [89, 96, 123]
- Einfluß der Geschwindigkeit auf die Reibungszahl [86, 96]
- Eindringweg [124, 125]
- Grenzziehverhältnis [89, 92, 126]

Werden mehrere tribologische Kenngrößen ermittelt, dann führt die Wichtung häufig zu unterschiedlicher Interpretation der Ergebnisse.

Aus den berechneten Kenngrößen können weitere kombinierte Kenngrößen wie das Verhältnis von Haft- zu Gleitreibung abgeleitet werden [87, 89]. Welche Bedeutung den einzelnen Kenngrößen zukommt, wird sehr unterschiedlich beurteilt und hängt vom Bauteil ab.

Für die graphische Darstellung der Ergebnisse können die Reibungskraft [94] oder die Reibungszahl [77, 96] über der Kontaktnormalspannung [77, 94] oder über der Stribeck-Konstante [96] aufgetragen werden.

2.2.6 Folgerungen

Der Stand der Erkenntnisse bezüglich Prüfprinzipien und insbesondere die wenig einheitlichen Auswertungs- und Interpretationsmethoden der Versuchsergebnisse machen deutlich, daß keine der Prüfmethode für die Beurteilung von Blech-Topografien als allgemein anerkannt gelten kann.

Die Ergebnisse eines komplexen Bauteils sind nur bedingt auf Bauteile anderer Geometrie übertragbar. Mit stark abstrahierten Prinzipien wie Stift-Scheibe-Tribometern lassen sich die tribologischen Mechanismen des Realprozesses nicht gut genug abbilden. Im Extremfall kann das dazu führen, daß die Ergebnisse dieser Prüfverfahren mit Schmierstoffadditiven verbessert werden können, die unter den Beanspruchungen des Realprozesses nicht reagieren.

Die Erfahrungen mit der großen Zahl der weltweit eingesetzten Modellprüfstände zeigen, daß insbesondere die auf vereinfachten Modellteilen und Streifenziehversuchen beruhenden Anlagen grundsätzlich zur Beurteilung tribologischer Systeme geeignet sind. Mit Modellversuchen erstellte Rangfolgen oder Klassifizierungen tribologischer Systeme können oft durch Preßwerkergesultate bestätigt werden und rechtfertigen dadurch ihren Einsatz [84, 110, 127].

Als schwierig erweist sich noch der Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Anlagen. Bereits geringe Unterschiede im Prinzip oder der Geometrie der Werkzeuge können aufgrund des stark nichtlinearen Verhaltens tribologischer Systeme zu deutlichen Unterschieden führen.

Da auch die Beurteilung verschiedener Schmierstoffe, Werkzeug- und Blech-Beschichtungen hinsichtlich ihres Reibungs- und Verschleißverhaltens in der Praxis ähnlich große Schwierigkeiten bereitet, wird zur Zeit am Institut des Autors ein Verbundprojekt mit mehreren Partnern aus der Industrie durchgeführt, um die Ursachen für die teilweise widersprüchlichen Ergebnisse verschiedener Modellversuche näher zu untersuchen. Einige Ergebnisse aus diesem Projekt, die direkt die Beurteilung von Blech-Topografien betreffen, werden in Kapitel 6 vorgestellt. Sie begründen die Auswahl der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Prüfmethode.

2.3 Untersuchungen zum Einfluß der Topografie auf die Reibung

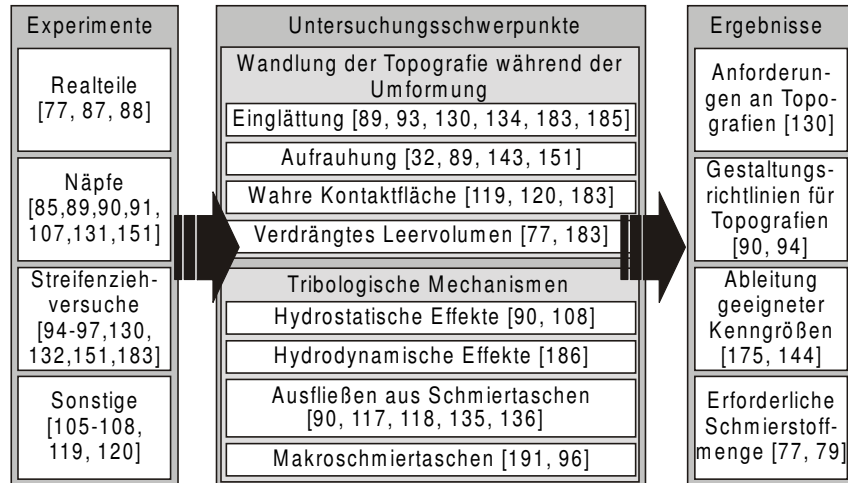


Bild 4: Untersuchungen zum Einfluß der Topografie auf die Reibung

Schon Coulomb erklärt 1785 den Mechanismus der Reibung mit dem Verhaken der Rauheitsspitzen der Kontaktpartner [128, 129]. In der Blechumformung wurden Untersuchungen des Einflusses der Topografie 1960 von Fischer durchgeführt [130]. Seine Ergebnisse zeigen, daß die Topografie die tribologischen Bedingungen und das Ziehergebnis deutlich beeinflusst. Die Rauhtiefe R_t und der arithmetische Mittenrauhwert R_a allein sind nicht geeignet, diese Zusammenhänge allgemeingültig zu beschreiben. Erst die Auswertung der Materialanteilkurve zeigt, daß Bleche mit schlanken Spitzen zu besseren Ziehergebnissen führen. Fischer schreibt, daß ein für die spanlose Formgebung geeignetes Blech schlanke und gleichmäßig verteilte Spitzen aufweisen soll, die während des tribologischen Kontakts gut umgeformt werden können, so daß das Werkzeug verhältnismäßig tief in das Profil einsinkt.

Wiegand und Kloos beurteilen verschiedene Möglichkeiten, die Reibung in Umformvorgängen mit Modellversuchen zu messen. Sie weisen darauf hin, daß der zwischen den gleitenden Flächen eingeschlossene Schmierstoff unter Grenzreibungsbedingungen einen hydrostatischen Druck aufbauen kann und einen Teil der Normalkräfte trägt [108]. Als Kenngröße zur Beurteilung der Topografie nutzen sie wie auch Fischer den Traganteil bei einer festen Schnittiefe.

Fukui [131] untersucht die Einflüsse von Blech- und Werkzeugrauheit auf das maximale Ziehverhältnis eines rotationssymmetrischen Napfes. Sowohl für die Rauheit des Bleches als auch des Werkzeugs stellt er fest, daß mit niedrigerer Rauheit höhere Ziehverhältnisse erreicht werden, bei höherviskosen Schmierstoffen kann jedoch auch eine Mindestrauheit von wenigen μm erforderlich sein. Rauheiten über $10\text{ }\mu\text{m}$ verschlechtern die Ziehergebnisse. Diesen Effekt führt er darauf zurück, daß bei rauhen Oberflächen der Schmierstoff der Kontaktzone nicht gleichmäßig genug zugeführt werden kann. Schmierstoffviskosität und Rauheit des Werkzeugs wirken sich stärker auf das Ziehergebnis aus als die Rauheit des Bleches.

Littlewood und Wallace [132] kommen durch Streifenziehversuche mit Umlenkung ebenfalls zu dem Ergebnis, daß rauhe Oberflächen die Reibung erhöhen. Zu glatte Bleche verstärken die Gefahr von Aufschweißungen. Littlewood und Wallace ermitteln eine Rauheit von etwa $40\text{ }\mu\text{in CLA}$ als optimal (entspricht einem Mittenrauhwert von ca. $R_a=1\text{ }\mu\text{m}$). Additive auf Chlor- und Schwefel-Basis verringern die Gefahr von Aufschweißungen, wirken sich aber nicht nachweisbar auf die Reibung aus. Für hohe Geschwindigkeiten nimmt die optimale Schmierstoffviskosität mit steigender Blechrauheit zu, während bei niedrigen Geschwindigkeiten eine hohe Viskosität generell zu niedrigerer Reibung führt. Über dem Ziehweg beobachten Littlewood und Wallace bei rauhen Oberflächen und niedrigen Viskositäten ein Ansteigen der Reibung und erklären diesen Effekt mit dem Herausquetschen des Schmierstoffs aus der Wirkfuge.

Messungen von Kasik und Reissner [107] zeigen, daß das unter dem Niederhalter aufdickende Blech deutlich einglättet und zu erhöhten Reibungszahlen führt. Eine Absenkung der Reibungszahlen ist mit hochviskosen polaren Schmierstoffen sowie mit gesteigerten Ziehgeschwindigkeiten möglich. Die Verbesserung der Druckfestigkeit des Schmierstoffs durch Additive hat kaum einen Einfluß auf die Reibungszahlen, wenn nicht gleichzeitig die Viskosität erhöht wird.

Mössle untersucht die Oberflächenwandlung von Aluminiumblechen mit Zugversuchen, Biegeversuchen, Streifenziehversuchen und Näpfen [151]. Die Aufrauung infolge freier Dehnung wurde als entscheidende Einflußgröße auf die Ausbildung der Oberfläche festgestellt. Die Aufrauung des Bleches während der Umformung kann dazu führen, daß der Schmierstoff nicht mehr ausreicht, das Volumen zwischen Blech und Werkzeug auszufüllen, so daß sich die tribologischen Bedingungen verschlechtern. Die Aufrauung wird von der Korngröße und von der größten Hauptformänderung des Bleches bestimmt.

Mössle weist darauf hin, daß das Niveau der Reibungszahlen und das Auftreten von Kaltaufschweißungen nicht korrelieren. Während die Viskosität das Risiko von Kaltaufschweißungen nicht nachweisbar beeinflusste, wurden mit zunehmender Viskosität deutlich geringere Reibungszahlen gemessen.

Zur Beschreibung der Blechoberfläche nutzt Mössle vorwiegend die Kenngrößen R_z (gemittelte Rauhtiefe) und R_{pm} (mittlere Glättungstiefe). Bezüglich einer für die Umformung geeigneten Oberfläche für Aluminiumblech empfiehlt er isotrope Topografien mit einer Mindestrauheit von R_z zwischen 5 und 10 μm sowie einen hohen Profil-leeregrad, was den Ergebnissen an Stahl von Fischer und Wiegand entspricht.

Ebenfalls mit der Oberflächenkenngröße R_{pm} zeigt Emmens Zusammenhänge zum tribologischen Verhalten unterschiedlich texturierter Stahlbleche auf. In seinen Modellversuchen variiert er die tribologischen Bedingungen in weiten Grenzen und stellt die Ergebnisse in Form von Stribeck-Diagrammen dar. In dieser Darstellungsform wird deutlich, daß unterschiedliche Verzinkungsverfahren sich auf das Niveau der Reibungszahl im Grenzreibungsgebiet auswirken [49]. Mit zunehmender Glättungstiefe R_{pm} der Bleche wird der Übergang von der Grenz- zur Mischreibung in Richtung hydrodynamischer Schmierung verschoben. Werden die Werte der Abszisse des Stribeck-Diagramms durch das Quadrat der Oberflächenkenngröße R_{pm} dividiert, dann verlaufen die Kurven von Topografien vergleichbaren Typs, aber unterschiedlicher Rauheit weitgehend deckungsgleich. Emmens schließt daraus, daß die Reibungseigenschaften von Stahlblech-Oberflächen eines Typs allein mit der Oberflächenkenngröße R_{pm} beschrieben werden können [133].

In neueren Untersuchungen weist Emmens auf die im Vergleich zu Stahlblechen deutlich stärkere Einebnung der Topografie von Aluminiumblechen hin [134]. Er zeigt, daß die Oberflächenkenngrößen zur Beurteilung des tribologischen Verhaltens nicht am unbelasteten sondern am eingeglätteten Blech gemessen werden müssen, um ähnlich gute Zusammenhänge zum tribologischen Verhalten aufzuzeigen wie bei den Stahlblechen. Aus dem Vergleich der Ergebnisse von mill-finish- und EDT-Oberflächen schließt er, daß bei starker Einglättung der untersuchten EDT-Topografie ein tribologischer Mechanismus wirkt, der nicht allein durch die Oberflächenkenngröße R_{pm} beschrieben werden kann. Emmens erklärt diesen Effekt mit dem hydrostatischen Traganteil der durch die Einglättung entstehenden abgeschlossenen Schmierstofftaschen der EDT-Struktur.

Neben diesem hydrostatischen Mechanismus wird von Balbach [90] ein weiterer tribologischer Mechanismus der abgeschlossenen Schmieraschen beschrieben. Danach wirken die abgeschlossenen Schmieraschen zusätzlich durch das Herausfließen des Schmierstoffs aus den Taschen in die Kontaktzone. Beobachtungen an transparenten Werkzeugen und Messungen der Werkstückoberfläche der in Ziehrichtung hinter einer Schmierasche liegenden Kontaktzone zeigen aufgeraute Oberflächen [117, 118, 135]. Sie lassen auf einen mikro-plasto-hydrodynamischen Schmierfilm schließen. In Zonen, die nicht direkt hinter einer geschlossenen

Schmierfette liegen, kann sich unter ansonsten gleichen tribologischen Bedingungen kein entsprechender Mikro-Schmierfilm ausbilden [88].

Wanheim [136] beschreibt einen Mechanismus, bei dem die Topografie während des Ziehvorgangs kontinuierlich einglättet. Der Schmierstoff wird so lange aus der Topografie herausgedrückt, bis das Einglättungsvermögen der Topografie erschöpft ist und es zu Aufschweißungen kommt.

Balbach [90] untersucht Aluminiumbleche mit verschiedenen Topografien und formuliert Anforderungen an eine aus tribologischer Sicht optimale Oberflächenstruktur. Neben hohen Spitzenzahlen soll eine niedrige Rauheit und ein ausreichendes Einglättungsvermögen vorhanden sein. Er weist darauf hin, daß geeignete Oberflächenkenngrößen fehlen.

Um die von Balbach qualitativ beschriebenen Eigenschaften der Oberflächen quantitativ beurteilen zu können, entwickelt Wagner [94] 3D-Oberflächenkenngrößen. Seine Ergebnisse mit Streifenziehversuchen und einem segmentierten Tiefziehwerkzeug zeigen, daß die 3D-Vermessung eine genauere und funktionsorientierte Beschreibung der Blechoberfläche ermöglicht, wenn verschiedene 3D-Kenngrößen im Zusammenhang gesehen werden.

Wagner beurteilt die folgenden Eigenschaften als günstig:

- eine isotrope Oberflächentextur,
- einen kleinen Feinspitzenbereich,
- viele kleine gleich hohe Rauheitserhebungen,
- weit oben liegende abgeschlossene Schmierstofftaschen und
- eine Mindestrauheit

Um den tribologischen Mechanismus des hydrostatischen Druckaufbaus in abgeschlossenen Schmierfetttaschen quantifizieren zu können, wurden von Pfestorf [88] und vom Autor [137] 3D-Oberflächenkenngrößen zur Beschreibung der Flächenanteile und Volumina der abgeschlossenen Schmierfetttaschen entwickelt. Sowohl in Streifenziehversuchen [137, 176], als auch durch Ergebnisse im Preßwerk [87] konnte nachgewiesen werden, daß Bleche mit höheren Anteilen abgeschlossener Leervolumina günstigere tribologische Eigenschaften zeigen.

Folgerungen

Die experimentellen Untersuchungen haben wesentlich zu einem verbesserten Verständnis der tribologischen Mechanismen in der Blechumformung beigetragen.

Demnach muß die Topografie die folgenden Funktionen erfüllen:

- Schmierstoff in die Umformzone transportieren
- Schmierstoff in der Umformzone halten
- Hydrostatische Effekte unterstützen
- Hydrodynamische Effekte unterstützen
- Schmierstoff- bzw. Einglättungsreserve zur Verfügung stellen
- Verschleißpartikel einbetten und abtransportieren
- Keine zu starke Aufrauhung infolge freier Dehnung sicherstellen
- Richtungsunabhängige (isotrope) Eigenschaften aufweisen

Die Fragen, welche Mechanismen unter welchen Bedingungen die Reibung beeinflussen, und welche Eigenschaften die Topografie aufweisen sollte, erfordern noch umfangreiche Untersuchungen:

- Es werden feine schlanke Spitzen angestrebt, die es dem Werkzeug ermöglichen, leicht in das Blech einzudringen und ein ausreichendes Einglättungsvermögen zur Verfügung stellen [60, 89, 125, 130]. Dem scheint der Wunsch nach einem kleinen Feinspitzenbereich und einer Topografie ohne überlagerte Mikrorauheit [94, 186] zu widersprechen.
- Unklarheit besteht darüber, unter welchen Bedingungen die Topografie so weit einglättet, daß sich hydrostatisch wirkende Schmieraschen ausbilden und inwieweit auch in stochastischen Strukturen abgeschlossene Schmieraschen entstehen [134, 138].
- Höhere Geschwindigkeiten führen im allgemeinen zu niedrigerer Reibung, was auf hydrodynamische Effekte zurückgeführt wird. Die Ausprägung der hydrodynamischen Effekte hängt neben der Viskosität des Schmierstoffs von der Topografie ab [108], aber welche Merkmale der Topografie dafür entscheidend sind, ist nicht bekannt.

Voraussetzung zur Klärung der Frage, welcher Mechanismus unter welchen Bedingungen wirken kann, ist ein verbessertes Verständnis der Wandlung der Oberflächenfeingestalt während der Umformung. Im folgenden Kapitel wird der Stand der Erkenntnisse zur Oberflächenwandlung beschrieben.

2.4 Oberflächenwandlung

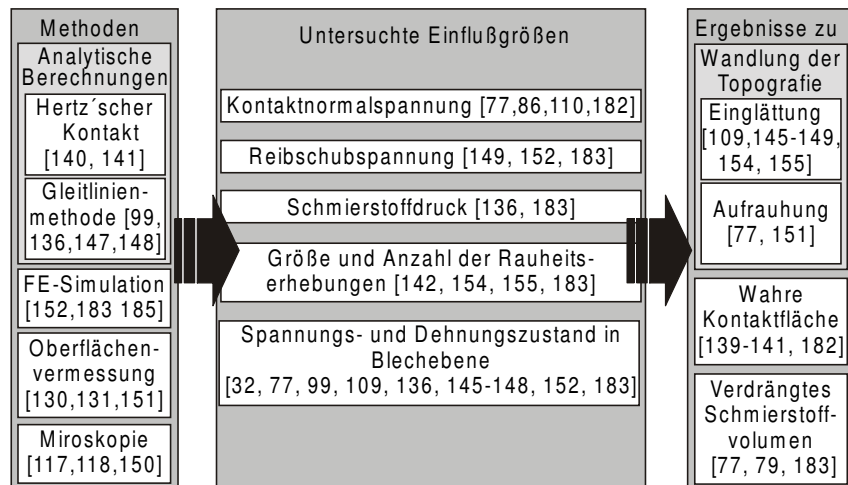


Bild 5: Untersuchungen zur Oberflächenwandlung während der Umformung

Bowden und Tabor gehen von einem Ansatz aus, bei dem die Kontaktfläche linear mit der Kontaktnormalspannung ansteigt [182] (junction growth equation). Kragelski [139] erweitert dieses Modell, und weiterführende Ansätze berücksichtigen Hertz'sche Spannungszustände bei der Berührung einzelner Rauheitserhebungen [140] sowie elastisch-plastisches Werkstoffverhalten. Archad [141] zeigt, daß nicht nur die wahre Kontaktfläche die Reibung beeinflusst, sondern auch Verteilung und Größe der Kontaktstellen. Greenwood und Williamson untersuchen die Anzahl der Mikrokontakte und entwickeln ein Modell zur Beurteilung der Anteile von elastisch und plastisch deformierten Kontaktstellen [142].

Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen der Verformungsgeschichte und deren Auswirkungen auf die Bauteiloberflächen wurden von Kienzle und Mietzner in ihrem Oberflächenatlas dokumentiert. Zur Untersuchung der freien Oberflächenwandlung [143] schlagen sie die Rauhleiter vor, eine Zugprobe mit kurviger Seitenbegrenzung, die es ermöglicht, die Aufrauung bei unterschiedlichen Dehnungen an einer einzelnen Probe zu messen [144, 64].

Greenwood und Rowe [145] sowie Fogg [146] beschreiben, daß ein Grundwerkstoff, der sich im plastischen Fließen befindet, die Spitzen der Rauheit nicht so gut unterstützen kann wie ein rein elastisch nachgebender. Eine Topografie auf einem plastisch fließenden Grundwerkstoff glättet demzufolge stärker ein, als eine Topografie auf einem ungedehnten Blech.

Wanheim und Bay [99, 136, 147, 148] nutzen die Gleitlinienmethode und Experimente, um diesen Effekt näher zu untersuchen. Nebeneinanderliegende und ineinander übergehende Spitzen beeinflussen sich bei der Einglättung gegenseitig. Die Spitzen der Topografie werden eingelättet und die Täler angehoben. Die Flankenwinkel der Topografie ändern sich dabei kaum. Mit zunehmendem Reibweg glättet die Topografie stärker ein, was mit dem Herausquetschen des Schmierstoffs aus den von Wiegand und Kloos [108] beschriebenen abgeschlossenen Schmieraschen erklärt wird. Die Viskosität des Schmierstoffs beeinflusst die Schmierstoffmengen, die beim ersten Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück eingeschlossen und während des Gleitens in der Wirkfuge gehalten werden.

Für geringe Kontaktnormalspannungen stellt Bay nur geringe Einglättungen fest und schließt daraus, daß der Schmierstoff unter den in der Blechumformung üblichen Bedingungen ungehindert aus der Kontaktzone entweichen kann und die wahre Kontaktfläche nicht beeinflusst.

Bei rauen Werkzeugen beschreibt Avitzur zusätzlich zu dem Mechanismus des Pflügens (Furchens) der Werkstückoberfläche das sogenannte wave model [149]. Vor einer Spitze der Werkzeugrauheit kann Werkstückmaterial wie zu einer Bugwelle angehäuft und verschoben werden. Bei zu steilen Winkeln der Werkzeugrauheit werden die Blechspitzen abgeschert.

Kawai, Kondo, Nakamura [150] verwenden ein Lichtmikroskop, um die Größe der wahren Kontaktfläche zu beurteilen. Bei Proben an Näpfen stellen sie eine 2,5 bis 3

mal höhere Einglättung fest als bei Streifenziehversuchen und führen das auf die höhere Plastifizierung des Grundwerkstoffes bei den Näpfen zurück.

Sengupta, Fogg und Ghosh [109] bestätigen den Einfluß der Zugspannungen im Grundwerkstoff auf die Einglättung beim Ziehen eines Napfes. Für den Bereich des Stempelbodens weisen sie nach, daß die Topografie bereits bei niedrigen Flächenpressungen weit einglätten kann, wenn kein tragfähiger Schmierfilm vorhanden ist. Versuche mit Ziehfolien und hohen Gleitgeschwindigkeiten zeigen bei gut tragendem Schmierfilm unter sonst gleichen Bedingungen eine Aufrauhung des Bleches. In Streifenziehversuchen mit überlagerter Zugspannung stellen sie einen sprunghaften Anstieg der Kontaktfläche und der Reibungszahl fest, sobald das Blech plastisch gedehnt wird und infolgedessen stärker einglättet. Wie deutlich dieser Sprung ausgeprägt ist, hängt von der Gleitgeschwindigkeit ab. Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit wird der Sprung der Reibungszahl geringer. Sengupta, Fogg und Ghosh erweitern die junction growth equation von Bowden und Tabor um den Einfluß des Spannungszustandes in Blechebene. Ihre Härtemessungen zeigen, daß die Kaltverfestigung des Grundwerkstoffes unter freier Dehnung kaum auf die oberflächennahen Bereiche übertragen wird. Erst bei zusätzlichem Werkzeugkontakt oder vorhandenem Schmierstoffdruck verfestigen auch die Körner an der Oberfläche.

Mössle [151] hat die freie und die gebundene Umformung beim Ziehen von Näpfen aus Aluminium untersucht. Den größten Einfluß auf die entstehende Oberfläche realer Ziehteile sieht er in der freien Umformung und der Aufrauhung der Oberfläche. Höhere Viskosität des Schmierstoffs führt zu einem dickeren Schmierfilm und damit zu einer größeren Aufrauhung. Ohne einen tragenden Schmierfilm glättet Aluminium, wie die Untersuchungen von Emmens zeigen, wesentlich stärker ein als Stahl [134].

Zusätzlich zu den Effekten der Aufrauhung und Einglättung beschreiben Keller und Reissner [32], daß in Matrizenrundungen Druckspannungen an der Innenfaser das Leervolumen der Topografie verringern können. Dadurch wird Schmierstoff in die Wirkfuge gedrückt und senkt die Reibung.

Schedin führt FE-Simulationen der Einglättung einzelner Rauheitsspitzen an 2D-Modellen durch [152]. Auch seine Ergebnisse zeigen, daß unter den Bedingungen der Blechumformung die Dehnung des Grundwerkstoffes einen deutlich größeren Einfluß auf die Einglättung hat als die Kaltverfestigung und die Reibschubspannung. Die größten Unsicherheiten bei der Berechnung der Oberflächenwandlung sieht er in der fehlenden Möglichkeit, die Aufrauhung zu simulieren.

Um den zweiachsialen Spannungszustand in Blechebene zu berücksichtigen, nutzen Prier und Bünten für ihre FE-Simulationen 3D-Modelle [153, 183]. Bünten simuliert das Übertragen der Struktur der Dressierwalze auf das Blech, und Prier verwendet diese Geometrien sowie die Daten der lokalen Kaltverfestigung für die Berechnung der Einglättung während der umformenden Weiterverarbeitung.

Die Ergebnisse zeigen, daß unter dem im Flansch eines Tiefziehteils üblichen Zug-Druck-Spannungszustand die Topografie weniger einglättet als unter ein- oder zwei-

achsigen Zug. Der Schwerpunkt der Untersuchungen von Prier liegt auf der Optimierung der Geometrie einzelner Schmierstoffkrater. Er beurteilt Topografien als günstig, die bereits bei geringer Last zu einem linear mit der Kontaktnormalspannung ansteigenden verdrängten Leervolumen führen. Dazu sollte die Berandung der Schmierstoffkrater über die Blechgrundfläche herausragen und im oberen Teil einen möglichst großen Steigungswinkel besitzen.

Sutcliffe berechnet die Einglättung von Oberflächen mit lang- und kurzwelligen Anteilen [154, 155]. Die langwelligen Anteile glätten unter Kontaktnormalspannung und gleichzeitiger Dehnung des Grundwerkstoffs deutlich stärker ein als die kurzwelligen. Er schließt daraus, daß die längerwelligen Anteile während der Umformung eingelättet werden und die kurzwelligen Anteile das tribologische Verhalten bestimmen.

Folgerungen

Ohne Werkzeugkontakt oder mit einem wirksamen Schmierfilm rauht die Topografie infolge freier Dehnung auf, während bereits geringe Kontaktkräfte zwischen Werkzeug und Blech zu einer deutlichen Einglättung führen können. Berechnungen mit der Gleitlinienmethode oder Finiten Elementen liefern Erkenntnisse über die Einflüsse von Spannungs- und Dehnungszuständen, die meßtechnisch nicht zugänglich sind und ermöglichen ein verbessertes Verständnis der Oberflächenwandlung.

Die Ergebnisse lassen folgende Schlüsse zu:

- Die Untersuchungen zeigen, daß die Topografie von Blechen während der Umformung lokal und zeitlich sehr unterschiedlich beansprucht wird und demzufolge unterschiedlich aufraut oder einglättet. Da der Zustand der Topografie direkt die Reibung beeinflusst, ist die Berücksichtigung der Oberflächenwandlung als Funktion von Ort und Zeit Voraussetzung für die Entwicklung verbesserter Reibmodelle [156].
- Prüfstände zur Beurteilung tribologischer Eigenschaften von Blechen müssen die Wandlung der Topografie berücksichtigen. Die Beanspruchungen sind so einzustellen, daß die Oberflächenwandlung des Realprozesses simuliert wird.
- Bei der Entwicklung von Topografien muß beachtet werden, daß die einglättende Topografie unter dem gesamten in einem Werkzeug auftretenden Beanspruchungsspektrum günstige tribologische Eigenschaften sicherstellen kann. Für unterschiedliche Bauteile (z.B. abhängig von der Blechdicke) können unterschiedliche Topografien optimal sein.
- Zur Berechnung von funktionsorientierten Oberflächenkenngrößen muß die Wandlung der Oberfläche berücksichtigt werden [157]. Bei eingelätteten Topografien ist der augenblickliche Zustand und nicht die ursprüngliche Rauheit ausschlaggebend für das tribologische Verhalten [93]. Funktionsorientierte Oberflächenkenngrößen sollte man an der tribologisch beanspruchten Oberfläche mit eingelätteten Spitzen [134, 158] und ohne Welligkeit [154, 155, 159] berechnen. Da dieses Vorgehen einen hohen Aufwand bedeutet, werden rechnerische Methoden benötigt, um die Einglättung gemessener Oberflächen zu simulieren.

Offen bleibt die Frage, welche Bereiche eines Bauteils welcher Oberflächenwandlung unterworfen sind und wann für die Berechnung funktionsorientierter Oberflächenkenngrößen folgende Maßnahmen zulässig sind:

- die Oberflächenwandlung zu vernachlässigen
- eine charakteristische mittlere Oberflächenwandlung für die Blechumformung anzunehmen
- eine charakteristische mittlere Oberflächenwandlung für jeweils ein Werkzeug anzunehmen
- die zeitliche und örtliche Oberflächenwandlung vollständig zu berücksichtigen

2.5 Vermessung der Oberflächen

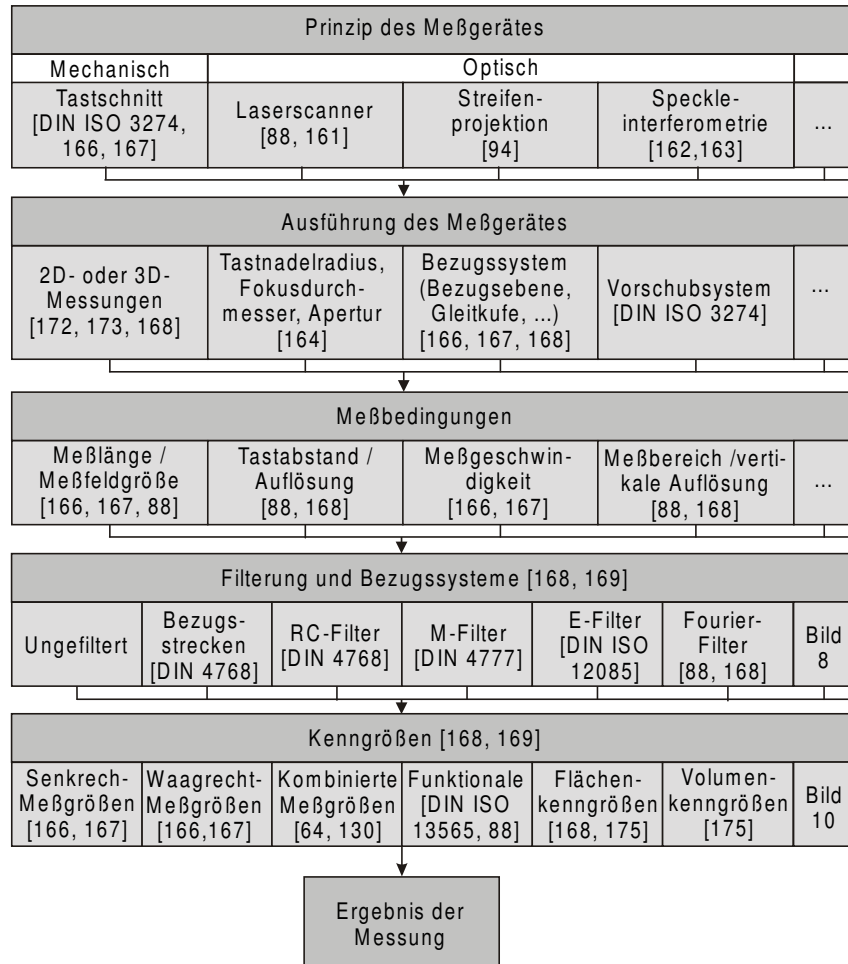


Bild 6: Meßkette zur Erfassung von Oberflächenkenngrößen

Die eindeutige quantitative Beschreibung der Oberflächen wird bei der Spezifikation zwischen Blechherstellern und Blechverarbeitern benötigt, um eine konstante Oberflächenqualität und damit die Prozeßsicherheit bei der Umformung sicherzustellen. Da die Korrelation von Oberflächenkenngrößen und tribologischem Verhalten in vielen Fällen unzureichend ist, muß neben den tribologischen Prüfmethoden auch die Oberflächenmeßtechnik im Hinblick auf die Anforderungen in der Blechumformung näher untersucht werden. Dabei ist die gesamte Meßkette vom Prinzip des Meßgerätes über die Filterung bis hin zur Auswahl und Interpretation der Kenngrößen zu berücksichtigen (Bild 6).

2.5.1 Meßgeräte

Die Geräte zur Beurteilung von technischen Oberflächen lassen sich in Geräte zur Vermessung geometrischer sowie chemischer und mechanischer Eigenschaften unterteilen [VDI/VDE 2601]. Die chemischen Vorgänge in der Grenzschicht beeinflussen die Reibung zwar deutlich, sie sind in der Blechumformung aber erst wenig erforscht [160]. Die Möglichkeiten, die chemischen Eigenschaften der Blechoberfläche zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens zu nutzen, sind eingeschränkt, da auch Anforderungen an Gebrauchseigenschaften wie Korrosionsschutz und Haftfestigkeit von Klebern erfüllt werden müssen. Die Geometrie der Oberfläche kann dagegen weitgehend frei gestaltet werden, solange die Anforderungen an den Lackglanz erfüllt sind.

Die qualitative Beurteilung von Topografien, z.B. durch das Tastgefühl oder den Vergleich mikroskopischer Aufnahmen, bietet die Möglichkeit, Oberflächenmerkmale zu beschreiben, für die keine Kenngrößen vorliegen. Feine Kratzer auf glatten Flächen lassen sich mit bloßem Auge deutlich erkennen, während eine quantitative Bewertung nur mit hohem meßtechnischem Aufwand möglich ist. Auch Bleche, bei denen durch die Umformung nur die obersten Spitzen leicht eingeglättet wurden, unterscheiden sich optisch deutlich von unbelasteten Blechen, aber in den üblichen Rauheitskenngrößen sind kaum Änderungen festzustellen.

Insbesondere bei Oberflächen unbekannten Typs ist es oft hilfreich, durch Betrachtung einer grafischen Darstellung der Oberfläche charakteristische Merkmale zu spezifizieren. Anschließend können gezielt geeignete Meßgeräte, Meßbedingungen und Kenngrößen ausgewählt werden, die in der Lage sind, die beobachteten Merkmale quantitativ zu beschreiben.

Neben den Geräten, die eine Oberfläche linienförmig abtasten, sind Geräte entwickelt worden, die Profilabweichungen über einer von zwei Koordinaten aufgespannten Ebene messen. Es ist üblich, die linienförmig abtastenden Geräte als 2D-Meßgeräte zu bezeichnen, da 2 Koordinaten (Vorschubrichtung und Profilhöhe) benötigt werden. Eine Fläche abtastende Geräte werden entsprechend als 3D-Meßgeräte bezeichnet. Mechanische 2D-Tastschnittgeräte stellen das Standard-Meßverfahren für die Rauheit in der Blechumformung dar. Durch Koordinatentische können die zunächst für

linienförmige Tastschnitte entwickelten Systeme so erweitert werden, daß die Proben durch parallel liegende Messungen flächig erfaßbar sind.

Um berührungslose und schnellere Messungen zu ermöglichen, wurden mehrere auf verschiedenen optischen Prinzipien beruhende Meßverfahren entwickelt. Laserscanner tasten die Oberfläche berührungsfrei ab [161], benötigen aber ähnlich hohe Meßzeiten wie die taktilen Geräte. Schnellere optische Messungen sind mit Geräten möglich, die z.B. über CCD-Kameras mehrere Punkte der Topografie gleichzeitig vermessen. Speckleverfahren [162, 163] und Streifenprojektion [94] sind Beispiele für diese Prinzipien.

Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Prinzipien werden in der Literatur ausführlich diskutiert. Wesentliche Unterschiede liegen in:

- Geschwindigkeit der Messung
- Mögliche Größe der Meßfläche und Tastabstände
- Meßfleckdurchmesser, Tastnadelradius
- Lagerung des Tastsystems (Bezugsebenen-, oder Gleitkufensystem)
- Störanfälligkeit
- Einfluß von Restöl oder Staub auf der Probe
- Furchung weicher Proben
- Einfluß unterschiedlich reflektierender Proben
- Maximal meßbare Flankenwinkel

Die genannten Unterschiede führen oft zu nicht vergleichbaren Oberflächenkenngrößen, insbesondere beim Einsatz von mechanischen und optischen Systemen [77, 165]. Zur Vermessung von Blechen wurden deshalb im Stahleisen-Prüfblatt 1940 mechanische 2D-Tastschnittgeräte vorgeschrieben [166, 167]. Zur Zeit laufen Bestrebungen, diese Vorschrift in eine ISO-Norm zu überführen.

Für 3D-Messungen bestehen keine entsprechenden Vorschriften. Da die Meßdauer mechanischer Meßgeräte für 3D-Messungen oft im Bereich von Stunden liegt und zur Qualitätssicherung in der Produktion schnelle Systeme benötigt werden, ist zu erwarten, daß in Zukunft für 3D-Messungen in der Blechumformung überwiegend optische Systeme Verwendung finden.

2.5.2 Profilfilter

Die mit Meßgeräten erfaßten Profile enthalten neben der üblicherweise auszuwertenden Rauheit zusätzliche Geometrieabweichungen wie Formabweichungen und Welligkeit. Will man Rauheit oder Welligkeit mit Oberflächenkenngrößen beschreiben, dann müssen zunächst die im gemessenen Profil enthaltenen Geometrieabweichungen mit geeigneten Filtern separiert werden.

In Kapitel 2.4 sind Untersuchungen zur Einglättung der Blechoberfläche durch den tribologischen Kontakt beschrieben. Als wesentlich wurde dabei herausgestellt, daß durch den tribologischen Kontakt die Spitzen der Topografie einglätten und die Welligkeit einebnet. Es wurde darauf hingewiesen, daß man funktionsorientierte Oberflä-

chenkenngößen an der durch den tribologischen Kontakt deformierten Oberfläche berechnen sollte. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob Filter dafür einsetzbar sind, möglichst genau die Welligkeit, die durch den tribologischen Kontakt während der Umformung einglätet, aus dem gemessenen Profil herauszurechnen.

Die Klassifizierung der Geometrieabweichungen wird nach DIN 4760 durchgeführt. Die Zuordnung der Wellenlängen zu den Klassen Form, Welligkeit und Rauheit hängt von der jeweiligen Funktion und Anwendung ab, weshalb in DIN 4760 die Grenzen zwischen den einzelnen Gestaltabweichungen nicht festgelegt sind (Bild 7).

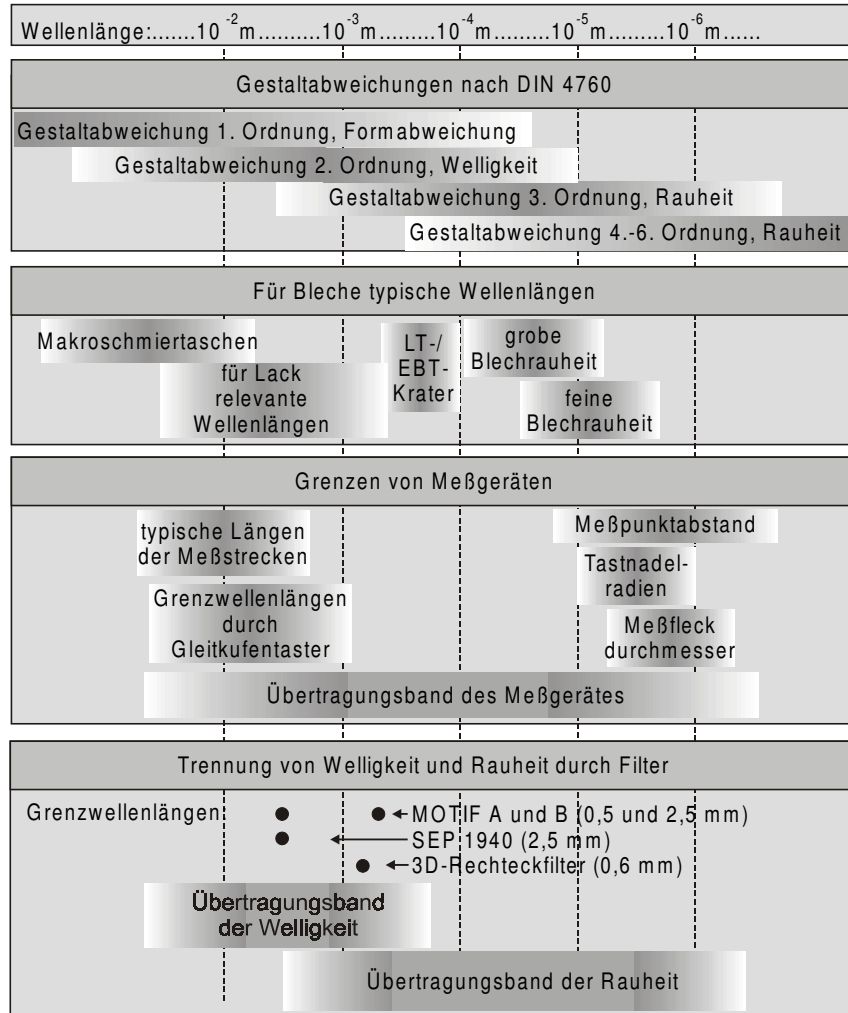


Bild 7: Grenzwellenlängen zur Trennung von Rauheit und Welligkeit

Die zur Auswertung nutzbaren maximalen und minimalen Grenzwellenlängen werden bereits mit der Auswahl des Meßgerätes und der Meßbedingungen bestimmt. Wellenlängen oberhalb der Größe der vermessenen Fläche sind im gemessenen Profil nicht auswertbar. Verschiedene Untersuchungen zeigen, daß für die Qualität der Lackierung längerwelligere Anteile berücksichtigt werden müssen als für die Beurteilung des tribologischen Verhaltens. Die Anwendung in der Lackierung erfordert daher größere Meßflächen.

Die untere Grenzwellenlänge ist durch den Abstand der einzelnen Meßpunkte und den Durchmesser des Meßflecks bzw. der Tastnadel festgelegt. Wellenlängen kleiner als der doppelte Meßpunktabstand können nicht ausgewertet werden. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, daß selbst bei ausreichend kleinem Tastabstand kleine Wellenlängen dann nicht richtig erfaßt werden, wenn der Tastnadelradius oder der Meßfleckdurchmesser zu groß sind.

Tastsysteme wie Gleitkufentaster bewirken ebenfalls eine Filterung des Profils. Welche Anteile des Profils durch das Tastsystem gefiltert werden ist unbekannt und kann nachträglich nicht mehr ausgewertet werden. Für Schiedsfälle sind deshalb in DIN 4768 und DIN ISO 13565 Bezugsebenentaster vorgeschrieben.

Für 2D-Messungen in der Blechumformung wurde in Deutschland im Stahleisen-Prüfblatt SEP 1940 [166, 167] zur Trennung von Welligkeit und Rauheit eine Grenzwellenlänge von 2,5 mm festgelegt. Die Gesamtmeßstrecke beträgt 12,5 mm und der Tastnadelradius 5 μm . Für die in der französischen Automobilindustrie verwendete MOTIF-Methode sind dagegen ein Tastnadelradius von 2 μm und eine Meßstrecke von 16 mm vorgeschrieben. Die Grenze zwischen Rauheit und Welligkeit (Parameter A und B) betragen 0,5 und 2,5 mm.

Für die dreidimensionale Vermessung von Oberflächen werden neue Meßvorschriften benötigt. Ausgehend von verschiedenen Untersuchungen hat der Arbeitskreis 3D-Oberflächenkenngrößen (die umformtechnischen Institute in Darmstadt, Erlangen und Stuttgart) eine Auswertefläche von 3 x 3 mm bei einem Meßpunkteabstand von 4 μm und eine Grenzwellenlänge von 0,6 mm vorgeschlagen.

Zur Trennung der Gestaltabweichungen bei vorgegebenen Grenzwellenlängen wurden verschiedene Filterverfahren entwickelt (Bild 8).

Bei der Bezugsstreckenfilterung (DIN 4762) wird die Gesamtmeßstrecke in eine oder mehrere Teilstrecken untergliedert. Die Kenngrößen werden an den einzelnen Teilstrecken berechnet und anschließend zu einem Mittelwert zusammengefaßt, oder die Teilstrecken werden einzeln ausgerichtet und wieder zusammengesetzt, um die Kenngrößen am gesamten Profil zu berechnen. In den Kenngrößen sind dann keine Informationen aus längerwelligeren Anteilen enthalten.

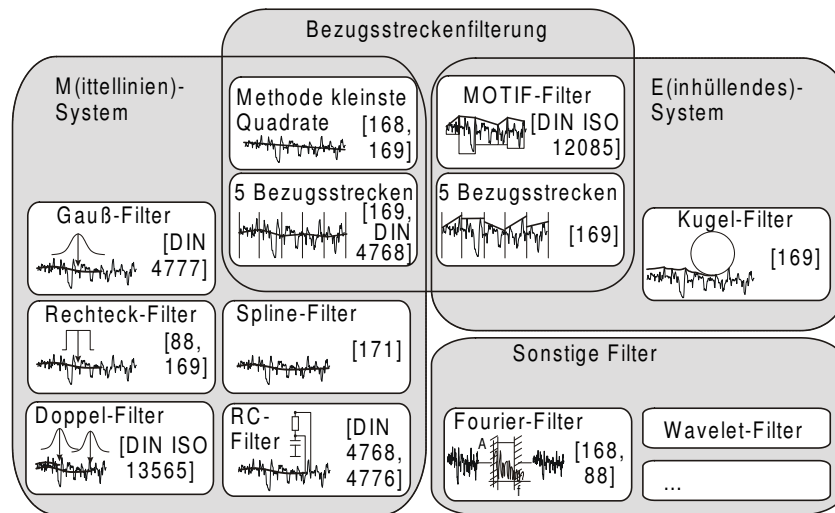


Bild 8: Methoden zur Filterung der Oberflächenmeßdaten

Die in älteren Geräten verwendeten RC-Filter trennen Welligkeit und Rauheit bereits während der Messung. Die Grenzwellenlänge wird durch einen Widerstand und einen Kondensator festgelegt. Diese Filter weisen Phasenverschiebungen auf und führen je nach Anwendung zu mehr oder weniger gravierenden Verzerrungen des Profils. Phasenkorrekte Filter haben diesen Nachteil nicht, erfordern aber, daß die Filterung im Anschluß an die Messung in einem separaten Berechnungsschritt durchgeführt wird.

Nach der Form der Gewichtungsfunktion unterscheidet man unter anderen Rechteck-, Dreieck-, Butterworth- und Gauß-Filter [168]. Das phasenkorrekte Filter mit Gaußförmiger Gewichtungsfunktion ist das zur Zeit am häufigsten verwendete.

Da diese Filter eine Mittellinie durch das gemessene Profil berechnen, werden sie als M-Filter bezeichnet. Untersuchungen von Bodschiwinna haben gezeigt, daß diese am Mittelprofil orientierten Filter bei der Anwendung für tribologische Fragestellungen verschiedene Nachteile aufweisen können. Einzelne Riefen führen zu Deformationen des gefilterten Profils. Insbesondere wenn diese Deformationen im Bereich der tribologischen Kontaktfläche liegen, ist mit durch die Filterung verfälschten Oberflächenkenngrößen zu rechnen. Bodschiwinna entwickelte deshalb die Methode der doppelten Filterung mit Riefenunterdrückung [159], die inzwischen in DIN 4776 und DIN ISO 13565-1 zur Berechnung der R_k -Parameter vorgeschrieben ist. Durch die zweimalige Anwendung eines M-Filters und durch rechnerisches Abschneiden der Riefen ermittelt dieses Filter eine Welligkeit, die sich, entsprechend dem tribologischen Kontakt, mehr an den oberen Bereichen der Topografie orientiert. Bei einzelnen Riefen im Profil, wie sie für geschliffene und gehobnte Oberflächen üblich sind,

verringert dieses Filter die Profilverzerrungen deutlich. Wie weit die in deterministischen Blech-Topografien vorhandenen relativ voluminösen Krater diese Filterung beeinflussen, ist nicht bekannt.

Die Filter nach dem E-System bieten eine Methode, die für den tribologischen Kontakt relevanten oberen Bereiche der Topografie bei der Filterung stärker zu gewichten, als die tiefliegenden Täler. Sie berechnen eine Linie durch die lokal höchsten Punkte der Topografie. Beim Kugelfilter wird eine Kugel rechnerisch über die gemessene Oberfläche gerollt. Der tiefste Punkt der Kugel beschreibt eine die Topografie einhüllende Kurve, die durch die lokal höchsten Punkte der Topografie verläuft [169].

Die in der französischen Automobilindustrie eingesetzte MOTIF-Methode berechnet sogenannte Rauheitsmotifs, indem sogenannte unwesentliche Profilirregularitäten aus den Meßdaten herausgerechnet werden. Die Welligkeit ermittelt man, indem eine Linie durch die als wesentlich erkannten Profilspitzen gelegt wird. Beide Verfahren, sowohl die Kugelfilterung als auch die MOTIF-Methode, bieten gegenüber den M-Filtern verschiedene Vorteile [169, 170]. Sie weisen aber den Nachteil auf, empfindlich auf Meßfehler in den Profilspitzen zu reagieren, weshalb Methoden zur Unterdrückung einzelner Ausreißer erforderlich werden (DIN ISO 12085).

Eine weitere Möglichkeit zur Filterung der Meßdaten bietet die Fourier-Transformation. Durch Transformation in den Frequenzbereich, Entfernung unerwünschter Frequenzen und Rücktransformation können beliebige Frequenzen aus dem gemessenen Profil herausgerechnet werden.

Da die üblichen Filterverfahren die Welligkeit anhand der benachbarten Punkte berechnen, am Anfang und am Ende der Meßstrecke aber nicht genügend benachbarte Punkte zur Verfügung stehen, kann am Rand nicht korrekt gefiltert werden. Nach der Filterung muß man die am Rand falsch gefilterten sogenannten Vor- und Nachlaufstrecken abschneiden. Spline-Filter bieten hier Möglichkeiten, die Vor- und Nachlaufstrecken zu minimieren [171]. Die in der Literatur beschriebenen Spline-Filter beruhen auf dem Mittellinien-System und gewichten deshalb die Spitzen und die Täler der Topografie gleich.

Formfilter subtrahieren bekannte Geometrien von den Meßdaten. Wurde z.B. die Rauheit auf einem Zylinder oder einer Kugel mit bekanntem Radius gemessen, dann läßt sich diese Krümmung aus den Meßdaten herausrechnen [196].

Alle erwähnten Filter hat man zunächst für die Filterung von 2D-Daten entwickelt. Sie lassen sich aber analog auf 3D-Daten anwenden. Eine Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen verschiedener 3D-Filter bei der Anwendung in der Blechumformung ist im vom Autor in einer früheren Arbeit veröffentlicht [77].

Folgerungen

Die in der Oberflächenvermessung eingesetzten Filter erfüllen je nach Anwendung unterschiedliche Aufgaben:

- Schräglage (z.B. durch Einspannung der Probe) aus den Meßdaten entfernen
- Die Formkomponente aus den Meßdaten entfernen
- Periodische Anteile trennen
- Anteile bestimmter Wellenlängen ermitteln
- Rauschen in den Meßdaten unterdrücken
- Einzelne Ausreißer entfernen

Das Abbilden der Einglättung durch die Filterung ist eine neu hinzukommende aus den Anforderungen der Blechumformung entstandene Aufgabe und in der Literatur bisher nicht behandelt. Einige Literaturstellen weisen darauf hin, daß bei der Untersuchung von Wälzkontakten eine an die Funktion angepaßte Filterung Voraussetzung für die Ermittlung aussagekräftiger Kenngrößen ist [159]. Folglich müssen je nach zu erfüllender Funktion unterschiedliche Filter eingesetzt werden. Dies steht der Bestrebung entgegen, die in der Oberflächenmeßtechnik eingesetzten Filtermethoden zu vereinheitlichen.

Als wesentliche Anforderungen an Profilfilter für die Anwendung in der Blechumformung können zusammengefaßt werden:

- Keine Phasenverschiebung
- Stärkere Gewichtung der Spitzen der Topografie
- Korrekte Wiedergabe der Spitzen der Topografie
- Minimale Verzerrungen des Profils am Rand von Riefen und Kratern
- Unempfindlichkeit gegen einzelne Ausreißer in der Messung
- Minimale Vor- und Nachlaufstrecke

Alle aus der Literatur bekannten Filter weisen nach diesen Kriterien deutliche Nachteile auf. Vor dem Vergleich verschiedener Filter bei der Anwendung in der Blechumformung wird deshalb in Kapitel 7.4 ein neues auf dem Kugelfilter beruhendes 3D-Filter entwickelt.

2.5.3 Oberflächenkenngrößen

In internationalen Normen und in der Literatur wird eine kaum überschaubare Anzahl von Oberflächenkenngrößen beschrieben. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kenngrößen sind im Anhang in Tabelle 28 aufgeführt. Es ist bekannt, daß nur ein Teil der Kenngrößen nötig wäre, da zwischen ihnen verschiedene Beziehungen bestehen. Mit diesem Kapitel wird eine Klassifizierung der Kenngrößen vorgenommen, um eine Basis für die Auswahl geeigneter Kenngrößen in Kapitel 7.1 zur Verfügung zu stellen.

Man unterscheidet Senkrecht- Waagrecht- und kombinierte Kenngrößen [168, 169]. Bei 3D-Messungen werden zusätzlich flächen- und volumenorientierte Kenngrößen berechnet [172, 173]. Senkrechte Kenngrößen wie R_a (arithmetischer Mittenrauh-

wert) und R_y (maximale Profilhöhe) beinhalten Informationen über die Tiefe des Profils während mit waagrechten Kenngrößen wie S_m (Mittlerer Abstand der Profilunregelmäßigkeiten) und PC (Spitzenzahl) Abstände und Anzahlen von Spitzen und Tälern beschrieben werden. Beispiele für kombinierte Kenngrößen sind der Profileeregrad R_p/R_t [64, 144] und das Verhältnis R_y/R_a [130].

Eine weitere Unterscheidung kann hinsichtlich singulärer oder integral ermittelter Kenngrößen erfolgen. Singuläre Kenngrößen wie R_y und R_{pk}^* (Spitzenhöhe) beschreiben für die Funktion wichtige Extremwerte, können aber durch Störungen in der Messung starken Streuungen unterliegen. Integrale Kenngrößen wie R_a und R_q (quadratischer Mittenrauhwert) streuen im allgemeinen nicht so stark, verwischen aber je nach Anwendung mehr oder weniger wichtige Informationen.

Zur Charakterisierung von Blechoberflächen werden in Stahleisen-Prüfblatt SEP 1940 [166, 167] die Oberflächenkenngrößen Mittenrauhwert R_a und Spitzenzahl PC vorgeschrieben. Obwohl diese Kenngrößen nur eine sehr eingeschränkte Beurteilung der Blechoberfläche erlauben und R_a als eine der am wenigsten aussagefähigen Kenngrößen gilt [64, 130, 144, 174], haben sie sich für stochastische Oberflächenstrukturen von Blechen durchgesetzt.

Wie neuere Untersuchungen zeigen, lassen sich deterministische Oberflächen mit diesen Kenngrößen nur unzureichend beschreiben. Als mögliche Erklärungen werden im wesentlichen zwei Gründe genannt.

- Unzulässig hohe Streuungen der Ergebnisse treten auf, wenn die senkrechten Profilschnitte je nach Lage und Tastrichtung unterschiedlich viele Krater oder Kuppen erfassen. In Extremfällen kann ein Tastschnitt in deterministischen Oberflächen wie in Bild 9 durch eine Reihe von Kratern verlaufen, während ein dazu leicht parallel versetzter Schnitt keinen Krater oder keine Kuppe erfaßt. Messungen in unterschiedlichen Richtungen sowie mehrere Messungen mit statistischer Auswertung können die Streuung verringern.
- Ein vertikaler Schnitt erfaßt die räumliche Struktur deterministischer Oberflächen nicht. Beispielsweise lassen sich Spitzen der Topografie oder die Eigenschaft, ob die Krater in allen Raumrichtungen geschlossen sind, anhand von einzelnen vertikalen Schnitten nicht beschreiben [142, 168]. Anhand eines senkrechten Schnittes kann der Unterschied, daß die linke Fläche in Bild 9 aus mehreren Spitzen und die rechte aus hochliegenden Graten besteht, nicht beschrieben werden. Auch die Informationen, daß die linke Fläche tiefliegende Kanäle enthält, und in der rechten abgeschlossene Schmiertaschen vorliegen, ist in senkrechten Schnitten nicht enthalten.

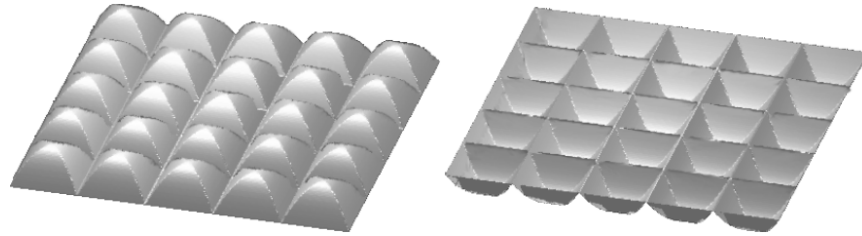


Bild 9: Modelloberflächen zur Veranschaulichung der Grenzen der 2D-Oberflächenvermessung

Die Möglichkeiten zur Berechnung von Oberflächenkenngrößen lassen sich in 7 Gruppen unterteilen (Bild 10).

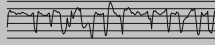
3D-Messungen						
1	2	3	4	5	6	7
2D-Messungen oder berechnete Schnitte 				direkt berechnet:	über berechnete Kurven: 	über berechnete Flächen:
direkt berechnet: - Tiefe - Volumen - mittlere Rauhtiefe - Spitzen - ...	über berechnete Kurven  -2D-Abbott - ...	direkt berechnet: - Tiefe - Volumen - mittlere Rauhtiefe - Spitzen - ...	über berechnete Kurven  -3D-Abbott - ...	-3D-Tal u. Spitzenzahlen - Isotropie - Perkolationstiefe - ...	- geschlossene Volumina u. Flächen - ...	- Fourieranalyse - Spectralanalyse - Autokorrelation - ...
$R_a, R_t, R_y, PC, \dots$	$R_k, R_{pk}, R_{vk}, \dots$	$S_t, S_a, S_{ku}, S_{vr}, \dots$	$S_k, S_{pk}, S_{vk}, \dots$	$PC_{3D}, S_{ds}, \dots$	$\alpha_{clm}, V_{cl}, N_{mam}, \dots$	$S_{tr}, S_{al}, \dots$ [168]
2D-Kenngrößen		"echte" 3D-Kenngrößen				
3D-Kenngrößen, gleiche Methoden wie bei 2D						

Bild 10: Klassifizierung der Oberflächenkenngrößen

Spalte 1: Aus einem senkrechten Schnitt (2D-Tastschnitt) werden direkt Oberflächenkenngrößen berechnet. Die Kenngrößen R_a , R_y , R_z und PC sind Beispiele für diese Gruppe. Der senkrechte Schnitt kann entweder direkt gemessen oder aus einer 3D-Messung berechnet werden.

Spalte 2: Aus dem senkrechten Schnitt werden neue Kurven wie die Materialanteilkurve oder die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion berechnet. Sie beinhalten zusätzliche Informationen, die nicht direkt anhand des gemessenen Profils abzulesen sind. Um diese Informationen zu quantifizieren, müssen

die abgeleiteten Kurven mit Kenngrößen beschrieben werden. Entsprechende Kenngrößen zur Beschreibung der Materialanteilkurve, häufig auch als funktionsrelevante Kenngrößen bezeichnet, sind in DIN ISO 13565-2 definiert. Der senkrechte Schnitt kann wie in Spalte 1 entweder direkt gemessen oder aus einer 3D-Messung berechnet werden.

- Spalte 3: Die aus der 2D-Meßtechnik bekannten Methoden zur Berechnung von Oberflächenkenngrößen kann man auf 3D-Messungen übertragen. Zur Bezeichnung dieser Kenngrößen verwendet man üblicherweise anstelle des Buchstabens R (roughnes) ein S (surface) mit den entsprechenden Indizes [168]. Beispiele sind die Kenngrößen S_a , S_l und S_z . Die Schnitte werden nicht einzeln ausgewertet und gemittelt, sondern man berechnet die Kenngrößen an der gesamten Meßfläche. Bei korrekter Filterung stellt diese Methode sicher, daß die Schnitte nicht nur einzeln, sondern auch relativ zu benachbarten Schnitten korrekt ausgerichtet sind.
- Spalte 4: Aus 3D-Messungen können die gleichen Kurven wie in Spalte 2 berechnet werden. Beispiele sind die Kenngrößen S_k , S_{pk} und S_{vk} . Wie bei den Kenngrößen in Spalte 3 führt die 3D-Messung dazu, daß die einzelnen Tastschnitte korrekt zueinander ausgerichtet sind. Inwieweit diese Kenngrößen Eigenschaften von Blechoberflächen beschreiben, die mit den 2D-Kenngrößen aus den Spalten 1 und 2 nicht beurteilbar sind, ist unbekannt und wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht (Kapitel 8.1).
- Spalte 5: An der dreidimensional vermessenen Fläche lassen sich Informationen auswerten, die in einfachen Schnitten nicht enthalten sind. Eine Spitze in einem vertikalen Schnitt kann zufällig eine Spitze der vermessenen Fläche sein, im allgemeinen handelt es sich jedoch um einen Grat, der in der nicht vermessenen Raumrichtung weiter ansteigt oder abfällt. Ob es sich tatsächlich um eine Spitze handelt, kann man nur durch 3D-Messungen beurteilen [142, 168]. Entsprechende echte 3D-Kenngrößen sind in [168] und [175] beschrieben.
- Spalte 6: Anhand von 3D-Messungen können, neben den von 2D-Kenngrößen bekannten, zusätzliche Kurven berechnet werden. Der Anteil der abgeschlossenen Leerflächen, in denen sich wie in Kapitel 2.3 beschrieben hydrostatischer Druck aufbaut, läßt sich als Funktion der Durchdringung angeben [176-178]. Weitere aus 3D-Messungen berechnete Kurven beschreiben die Anzahl der Spitzen und Täler als Funktion der Durchdringung oder das angular power spectrum als Funktion der Richtung [168]
- Spalte 7: Methoden wie Fourier-Analyse, Auto- und Kreuzkorrelationsanalyse nutzt man dazu, aus einer 3D-Messung eine neue Fläche zu berechnen. Sie beinhalten unter anderem Informationen über periodische Anteile der Oberfläche. Es ist jedoch wenig darüber bekannt, wie aus diesen Flächen für die Blechumformung geeignete Kenngrößen abgeleitet werden können [174, 159].

Folgerungen

Echte 3D-Kenngrößen (Spalten 5 bis 7) bieten die Möglichkeit, Eigenschaften von Blechoberflächen zu beschreiben, die von 2D-Kenngrößen nicht erfaßt werden.

Eine 2D-Messung kann eine Blechoberfläche nicht eindeutig beschreiben, da mit ihr die Abgeschlossenheit sowie die Art und Anzahl der Spitzen nicht erfaßt sind. Der Wunsch nach funktionsorientierten Kenngrößen ist mit 2D-Kenngrößen zu erfüllen, wenn die nur von 3D-Oberflächenkenngrößen beschriebenen Merkmale keine nennenswerte Bedeutung für die Funktion der Topografie aufweisen. Ob diese Merkmale für das tribologische Verhalten relevant sind, wird unterschiedlich beurteilt.

Da schon für 2D-Messungen eine kaum überschaubare Anzahl von Kenngrößen existiert und aus 3D-Messungen noch wesentlich mehr Kenngrößen abgeleitet werden können, ist im Fall von 3D-Kenngrößen die an der Funktion und den tribologischen Mechanismen orientierte Auswahl unabdingbar. Da über die wesentlichen tribologischen Mechanismen noch Unklarheit besteht, können die Auswahl und die funktionsorientierte Entwicklung neuer Kenngrößen beim jetzigen Stand der Forschung nur eingeschränkt erfolgen.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der Stand der Erkenntnisse (Kapitel 2) zeigt, daß der Topografie eine große Bedeutung für die Tribologie und damit für den Fertigungsprozeß Tiefziehen zugemessen wird. Die Möglichkeiten moderner Texturierungsverfahren können zur Zeit nicht voll genutzt werden, da nicht bekannt ist, welche geometrischen Eigenschaften der Topografie das tribologische Verhalten beeinflussen. Zusätzlich wird die Entwicklung von Blechtopografien erschwert, da Unklarheit über geeignete Kriterien zur Beurteilung von Topografien besteht. Wie der Stand der Erkenntnisse zeigt, lassen sowohl die tribologische Prüfung als auch die Vermessung der Topografie noch viele Fragen offen:

- ◆ Welche Modell-Prüfmethode ist geeignet, die tribologischen Eigenschaften von Topografien zu beurteilen?
 - Muß ein Prüfprinzip gewählt werden, bei dem der Blechwerkstoff umgelenkt wird, um die stärkere Einglättung der Topografie bei plastifiziertem Grundwerkstoff zu berücksichtigen?
 - Welche Meßgrößen bieten auf den Realprozeß übertragbare Ergebnisse?
- ◆ Welche Methoden zur Vermessung der Oberfläche ermöglichen, die Beurteilung des tribologischen Verhaltens?
 - Welche Oberflächenkenngrößen sind für die Beurteilung des tribologischen Verhaltens geeignet?
 - In welchem Umfang und wie ist die Wandlung der Oberfläche während der Umformung bei der Berechnung von Oberflächenkenngrößen zu berücksichtigen?

Voraussetzung zur Beantwortung dieser Fragen ist ein tieferes Verständnis der Wirkungsweise der Topografie.

- ◆ Welche tribologischen Mechanismen wirken unter den Beanspruchungsbedingungen der Blechumformung?
- ◆ Welche Eigenschaften der Topografie unterstützen welche tribologischen Mechanismen?
- ◆ Unter welchen Bedingungen und in welcher Größenordnung können abgeschlossene Schmieraschen zur Senkung der Reibung beitragen?
- ◆ Unter welchen Bedingungen und in welcher Größenordnung wirken elasto- und plastohydrodynamische Effekte in der Blechumformung?
- ◆ Wie kann man erklären, daß bei einigen Untersuchungen eine große Zahl schlanker deutlich einglättender Spitzen und bei anderen ein möglichst kleiner Feinspitzenbereich als günstig beurteilt wird?
- ◆ Welche weiteren tribologischen Mechanismen sind zu berücksichtigen?

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Definition von Kriterien und Kenngrößen zur Beurteilung der tribologischen Eigenschaften von Blech-Topografien. Die Bewertung erfolgt anhand von Modellversuchen und Oberflächenkenngrößen.

Die Kriterien sollen es ermöglichen:

- die Eignung von Topografien für das Tiefziehen mit einfachen Mitteln vor der Fertigung vorherzusagen.
- das Potential moderner Texturierungsverfahren besser zu nutzen und tribologischen Eigenschaften von Blech-Topografien zu optimieren.
- die Anforderungen an Bleche zwischen Blechhersteller und -verarbeiter eindeutig zu spezifizieren.

Vorgehensweise

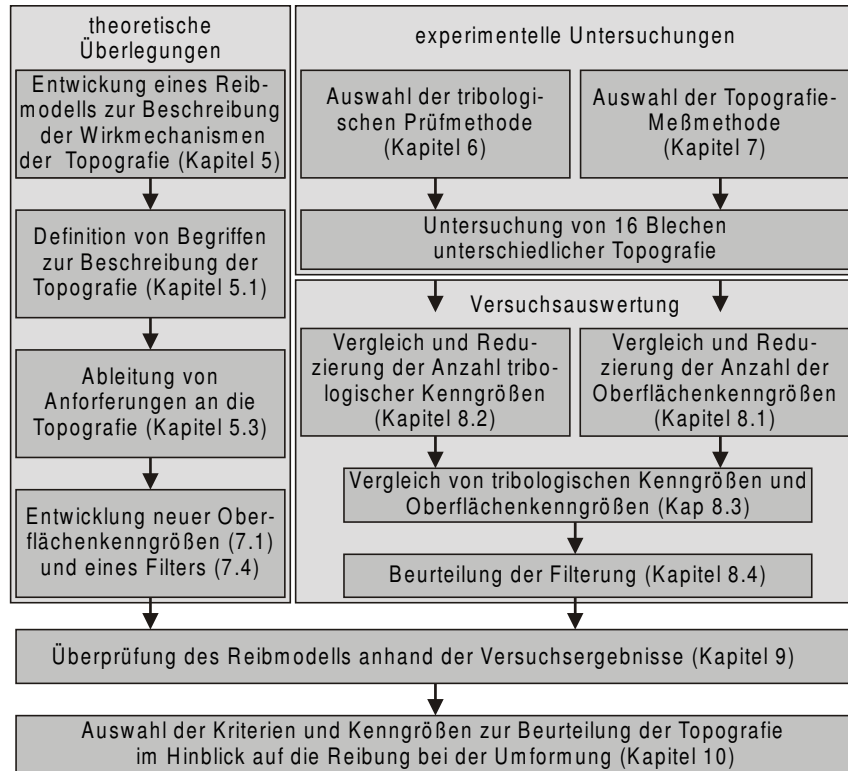


Bild 11: Vorgehensweise zur Auswahl der Kriterien und Kenngrößen zur Beurteilung der Topografie im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung

Beurteilung der Bedeutung der Topografie

Im ersten Schritt werden in Kapitel 4 Firmenbefragungen durchgeführt und in verschiedenen Projekten durchgeführte Reibversuche ausgewertet. Die Ergebnisse sollen klären, welches Potential zur Verbesserung des Umformprozesses die Topografie im Vergleich zu anderen Möglichkeiten bietet. Um das Potential nicht allein anhand eines in der Übertragbarkeit eingeschränkten Modellversuchs zu beurteilen, wird durch die Befragung zusätzlich die Erfahrungen von Experten berücksichtigt.

Entwicklung eines Reibmodells und Ableitung von Anforderungen an Topografien

Nach der Beurteilung der Bedeutung der Topografie erfolgt in Kapitel 5 die Untersuchung tribologischer Mechanismen, um daraus Modellvorstellungen über die Wirkungsweise der Topografie zu entwickeln. Es werden Anforderungen an die geometrischen Eigenschaften einer aus tribologischer Sicht günstigen Topografie abgeleitet. Die Oberflächenkenngrößen, mit denen diese als funktionsrelevant beurteilten Eigenschaften quantifizierbar sind, werden für die Beurteilung der Topografie ausgewählt.

Definition von Begriffen

Die aus dem Reibmodell ermittelten funktionsrelevanten Eigenschaften der Oberfläche lassen sich mit den üblichen Begriffen und Oberflächenkenngrößen nur unzureichend beschreiben. Deshalb werden in Kapitel 5.1 neue Begriffe und in Kapitel 7.1 neue Oberflächenkenngrößen definiert.

Experimentelle Untersuchungen

Um die Modellvorstellungen im Experiment zu überprüfen, sind zunächst eine geeignete tribologische Prüfmethode (Kapitel 6) und eine Oberflächen-Meßmethode (Kapitel 7) auszuwählen. Der Nachweis der Eignung der tribologischen Prüfmethode erfolgt in Kapitel 6.1 durch verschiedenen Voruntersuchungen.

In Kapitel 8 wird eine Versuchsreihe mit 16 Blechen unterschiedlicher Topografie durchgeführt, um die Bleche sowohl mit der tribologischen als auch mit der Oberflächenmeßmethode zu beurteilen.

Die experimentellen Daten werden für vier Arbeitsschritte benötigt:

1. Die aus dem Reibmodell abgeleiteten Anforderungen experimentell zu überprüfen
2. Einige der als funktionsrelevant beurteilten Eigenschaften der Topografie können mit mehreren Oberflächenkenngrößen beschrieben werden, die sich nur geringfügig unterscheiden. Welche dieser Kenngrößen zur Beurteilung besser geeignet sind, läßt sich anhand des Reibmodells nicht beurteilen. Die experimentellen Ergebnisse sollen klären, welche dieser Kenngrößen ausgewählt werden sollten.
3. Es wird untersucht, ob Zusammenhänge zwischen Oberflächenkenngrößen und tribologischen Kenngrößen bestehen, die das Reibmodell nicht beinhaltet.
4. Es sind keine Methoden bekannt, die es anhand von theoretischen Überlegungen ermöglichen, die Filterparameter auszuwählen. In Kapitel 8.4 wird deshalb experimentell untersucht, mit welchen Parametern die Meßdaten zu filtern sind.

Zusammenhänge zwischen Oberflächenkenngößen und tribologischen Kenngößen

Um Zusammenhänge aufzuzeigen, werden die mit verschiedenen Filtern berechneten Oberflächenkenngößen in Diagrammen über den tribologischen Kenngößen aufgetragen. Werden alle in Kapitel 7.1 ausgewählten 78 Oberflächenkenngößen mit den 104 Filtern und Filterparametern aus Kapitel 7.4 berechnet und über den 21 tribologischen Kenngößen aus Kapitel 6.4 aufgetragen, dann sind 170.352 Korrelationen zu überprüfen.

Für den ersten Arbeitsschritt, die Überprüfung des Reibmodells, wäre es ausreichend, einzelne Diagramme gezielt auszuwählen. Für die Arbeitsschritte 2 bis 4 ist es dagegen erforderlich, alle Kombinationen zu überprüfen, da nicht bekannt ist, zwischen welchen Kenngößen bei welcher Filterung Zusammenhänge vorhanden sind. Mit rechnerischen Methoden werden deshalb alle Kombinationen von Oberflächenkenngößen und tribologischen Kenngößen hinsichtlich linearer Zusammenhänge überprüft.

Um die Anzahl der im Rahmen dieser Arbeit darzustellenden Korrelationen einzuschränken, werden in Kapitel 8.1 zunächst Zusammenhänge zwischen Oberflächenkenngößen untersucht. Von jeweils zwei Kenngößen, zwischen denen hohe lineare Korrelationskoeffizienten berechnet werden, kann eine durch die andere ersetzt werden. Von diesen Kenngößen ist jeweils nur eine erforderlich, und die Anzahl der Kenngößen läßt sich reduzieren.

In Kapitel 8.2 wird das gleiche Vorgehen angewendet, um die Anzahl der zu berücksichtigenden tribologischen Kenngößen zu reduzieren.

Auch nach der Reduzierung der Anzahl der Kenngößen verbleiben noch 19.968 Korrelationen. Um alle Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigen zu können, sind in Kapitel 8.3 nur die linearen Zusammenhänge untersucht. Die Kombinationen von Oberflächenkenngößen und tribologischen Kenngößen, zwischen denen ein auffällig hohes Bestimmtheitsmaß R^2 besteht, werden in Diagrammform dargestellt und erörtert. Da verschiedene tribologische Mechanismen gleichzeitig wirken können, bestehen für einige Kombinationen von Kenngößen komplexere Zusammenhänge, die vom Bestimmtheitsmaß R^2 nicht erfaßt sind. In Kapitel 8.3.2 werden deshalb zusätzliche Diagramme ausgewählt und diskutiert.

Überprüfung des Reibmodells

In Kapitel 9 wird überprüft, inwieweit die aus dem Reibmodell abgeleiteten Anforderungen an die Topografie mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen.

Auswahl der Kriterien und Kenngößen

In Kapitel 10 werden die Kriterien und Kenngößen ausgewählt, deren Bedeutung für die Reibung sowohl durch das Modell erklärbar als auch im Versuch nachweisbar ist. Diese Kenngößen werden abschließend zur Beurteilung von Blechoberflächen im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung empfohlen.

4 Bedeutung der Topografie in der Blechumformung

Die Kenntnis der Bedeutung und der Möglichkeiten der einzelnen Elemente des tribologischen Systems ist Voraussetzung für die Auswahl von Strategien zur Optimierung tribologischer Systeme in der Blechumformung. Der Stand der Forschung zeigt, daß der Topografie eine große Bedeutung für die Tribologie und damit für den Fertigungsprozeß Tiefziehen zuzumessen ist. Es fehlen aber Aussagen über den Einfluß der Topografie relativ zu anderen Faktoren wie Schmierstoff und Werkzeugbeschichtung.

Die Beurteilung einzelner Elemente des tribologischen Systems ist durch die in Kapitel 2 beschriebenen Zusammenhänge erschwert. Um dennoch eine Abschätzung der Bedeutung der Topografie vornehmen zu können, werden in diesem Kapitel eine Befragung von Firmen zu ihren Erfahrungen bei der Verarbeitung und Ergebnisse von Streifenziehversuchen ausgewertet und verglichen.

4.1 Befragung von Firmen

Die Befragung der Firmen wurde im Rahmen eines Verbundprojektes zwischen dem Institut des Autors und 11 Projektpartnern aus der Industrie durchgeführt.

Die Projektpartner aus der Automobilindustrie, Stahlhersteller, Werkzeugbeschichter und Schmierstoffhersteller äußerten sich zu der Frage, welche Punkte neben der Tribologie den Ziehprozeß beeinflussen und bewerteten deren Bedeutung anhand einer Notenskala von 0 bis 4. Es wurde jeweils getrennt nach der Bedeutung von Prozeßsicherheit, Bauteilgüte, Verschleiß und Verfahrensgrenzen gefragt. In Bild 12 sind die Mittelwerte über diese 4 Punkte und über alle Projektpartner dargestellt.

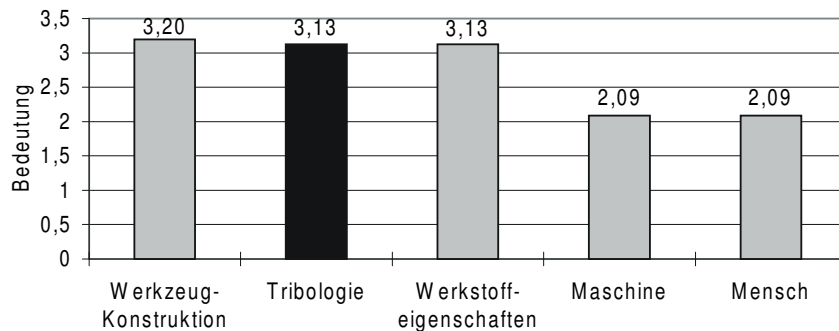


Bild 12: Firmenbefragung zu Einflußgrößen auf das Umformergebnis

Unter der Werkzeugkonstruktion ist die geometrische Auslegung des Werkzeugs mit Einlafradien, Sickenanordnung und Niederhaltergeometrie zu verstehen. Die Werkstoffeigenschaften beinhalten die Festigkeit, Verfestigungsverhalten, Anisotropie und Chargenschwankungen.

Die Tribologie wird etwa gleichbedeutend mit der Konstruktion der Werkzeuge und den plastomechanischen Werkstoffeigenschaften des Bleches gesehen. Deutlich

weniger relevant sind die Einflüsse der Maschine (Pressentechnik) und des Menschen (das die Presse bedienende Personal).

Im zweiten Teil der Befragung waren die Möglichkeiten zu beurteilen, das tribologische System zu beeinflussen. Wie im ersten Teil der Befragung wurde zunächst nach den relevanten Punkten gefragt, um diese anschließend hinsichtlich ihrer Bedeutung für Prozeßsicherheit, Bauteilgüte, Verschleiß und Verfahrensgrenzen zu bewerten (Bild 13).

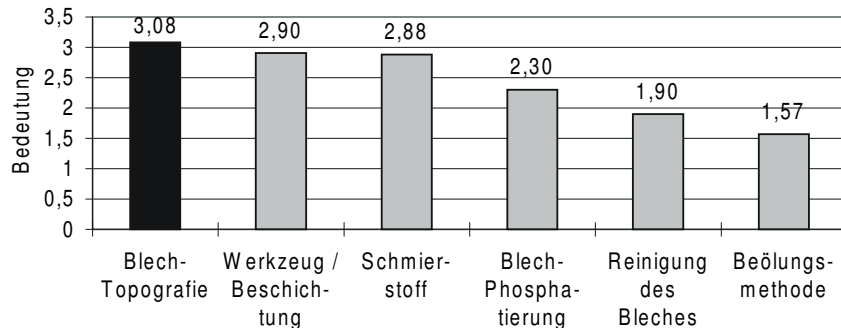


Bild 13: Firmenbefragung zu Einflußgrößen auf die Reibung

Die höchste Bedeutung wird der Topografie des Bleches zugemessen. Werkzeugbeschichtung und Schmierstoff erreichen annähernd die Bedeutung der Topografie, weshalb unter Berücksichtigung der Unsicherheiten einer solchen Befragung der Unterschied zwischen diesen drei Punkten nicht überbewertet werden sollte. Deutlich geringer wird die Bedeutung der Phosphatierung, der Reinigung des Bleches und der Beölungsmethode beurteilt.

Das Ergebnis der Befragung macht deutlich, daß der Optimierung der Topografie ebenso viel Bedeutung zuzumessen ist wie der Entwicklung neuer Werkzeugwerkstoffe, Werkzeugbeschichtungen und Schmierstoffe.

4.2 Modellversuche

Um die Ergebnisse des zweiten Teils der Befragung durch Experimente zu ergänzen und zu überprüfen, wurden in den letzten Jahren am Institut des Autors durchgeführte Streifenziehversuche ausgewertet (Bild 14). In den aus allen vorliegenden Daten gebildeten Gruppen wurde jeweils nur ein Parameter variiert. Die Versuchsbedingungen sind im Anhang in Tabelle 30 aufgeführt.

Das Maß für den Einfluß einer Gruppe ist die maximal erreichte Kontaktnormalspannung (Kapitel 6.1.1). Die Bedeutung ist aus der Differenz des besten und des schlechtesten Versuchsergebnisses der jeweiligen Gruppe errechnet.

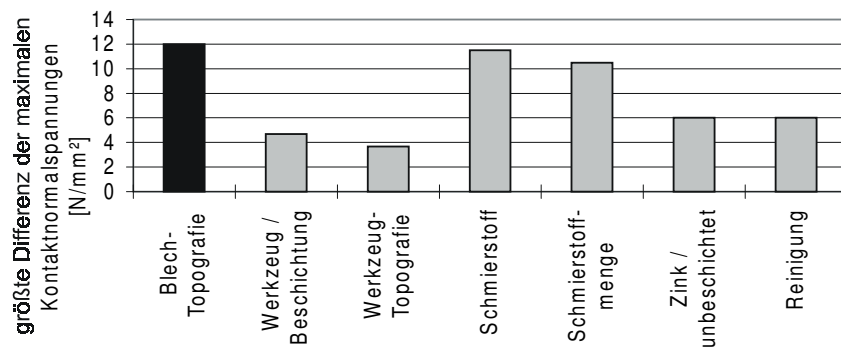


Bild 14: Ergebnisse aus Streifenziehversuchen zu Einflußgrößen auf die Reibung

Die Ergebnisse in der Gruppe Werkzeugbeschichtung und Werkzeugrauheit wurden im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens ermittelt [35]. Ziel dieses Vorhabens war die Optimierung der Werkzeugbeschichtungen hinsichtlich der Reibung. Zur Untersuchung lagen neben dem unbeschichteten GS 45 nach unterschiedlichen PVD-Verfahren hergestellte Titan-Nitrid-Schichten vor. Man kann davon ausgehen, daß der Einfluß der Werkzeugbeschichtung größer ausfällt, wenn auch Schichtsysteme mit anderen Werkstoffen wie z.B. CrN berücksichtigt werden. Die eingesetzten PVD-Beschichtungsverfahren und die variierten Beschichtungsparameter haben neben Schichtaufbau und Stöchiometrie auch zu unterschiedlicher Rauheit der Werkzeuge geführt.

Die Gruppe Schmierstoffe enthält die Ergebnisse von in Industrieaufträgen untersuchten Prelubes verschiedener Schmierstoffhersteller mit Viskositäten von 16 bis 100 mm²/s.

Zur Beurteilung der Schmierstoffmenge wurden 5 Bleche unterschiedlicher Topografie jeweils mit 2 und 5 g/m² untersucht. Bei einem Blech war kaum ein Einfluß der Schmierstoffmenge feststellbar, während bei zwei anderen Topografien die erhöhte Schmierstoffmenge zu deutlich höheren maximalen Kontaktnormalspannungen führte. Ausgehend von diesen Ergebnissen waren die Zusammenhänge zwischen Schmierstoffmenge und Topografie Thema des am Institut des Autors durchgeführten EFB-Forschungsvorhabens "Schmierstoffminimierung" [77].

Die Beurteilung unterschiedlich verzinkter Bleche ist dadurch erschwert, daß die Bleche nicht die gleiche Topografie aufweisen und daß die Zink-Schicht die Topografie der Bleche zusätzlich verändert. Die Topografie beeinflusst die Reibung deutlich, weshalb der Einfluß der Zink-Schichten nicht unabhängig beurteilt werden kann. Unterschiede innerhalb dieser Gruppe sind gering. Man kann davon ausgehen, daß die Zink-Schicht für die Reibung weniger bedeutend ist. Im Vergleich zu den anderen Gruppen ist dieses Ergebnis mit den größten Unsicherheiten behaftet.

Zur Beurteilung der Blechreinigung wurde eine modulare Reinigungs- und Beölungsanlage aufgebaut, die es ermöglicht, das Blech zunächst mit Hochdruck (Wasser oder Öl) zu reinigen und anschließend mit in unterschiedlicher Reihenfolge angeordneten Modulen zu trocknen. Der größte Unterschied wurde zwischen der Modulanordnung mit der gründlichsten Reinigung und Trocknung und dem ungereinigten Blech ermittelt. Das ungereinigte Blech erreichte die höchsten Kontaktnormalspannungen. Der Grund für dieses zunächst überraschende Ergebnis kann in der aus der Reinigung resultierenden schlechteren Benetzbarkeit des Bleches gesehen werden. Der nach der Reinigung aufgebrauchte Ziehschmierstoff haftet bei zu gründlicher Reinigung nicht so gut auf dem Blech wie bei einer geringen auf dem Blech verbleibenden Restölmenge, die als "Haftvermittler" dient.

Der Vergleich der Gruppen in Bild 14 zeigt die größte Bedeutung für die Topografie. Die Unterschiede zum Schmierstoff und zur Schmierstoffmenge sind aber so gering, daß dieses Ergebnis nicht überbewertet werden darf.

Die Untersuchung der Topografien ergibt, daß der Unterschied zwischen einer guten und einer schlechten Topografie etwa den gleichen Einfluß ausübt wie die Steigerung der Viskosität von 16 auf 100 mm²/s. Bedenkt man, daß die Viskosität des Schmierstoffs aufgrund von Anforderungen an Aufbringung und Reinigung nur in engen Grenzen angepaßt werden kann, wird die Bedeutung der Topografie noch deutlicher.

Die Variation der Topografie ist nach verschiedenen Ergebnissen in der Literatur durch den Kompromiß zwischen günstigen tribologischen Eigenschaften und Lackierbarkeit eingeschränkt. Die Bleche, die in dieser Versuchsreihe die höchsten Kontaktnormalspannungen erreichten, weisen aber neben hohen Spitzenzahlen bzw. niedrigen Rauheitswerten auch eine geringe Welligkeit auf, was auf gute Lackierbarkeit schließen läßt. Das deutet darauf hin, daß Blechtopografien gleichzeitig hohe Anforderungen bezüglich der tribologischen Eigenschaften und der Lackierbarkeit aufweisen können.

Folgerung

Sowohl die Befragung als auch die Modellversuche zeigen, daß die Topografie des Bleches zumindest ein ebenso großes Potential zur Optimierung des Ziehprozesses bietet wie der Schmierstoff und die Werkzeugbeschichtung. Um die Möglichkeiten nutzen zu können, sind zum einen geeignete Modellversuche zur Beurteilung des tribologischen Verhaltens und zum anderen funktionsorientierte Oberflächenkenngrößen nötig.

5 Reibmodell zur Beschreibung der Wirkmechanismen der Topografie

Ein vollständiges Reibmodell muß neben allen Reibungsmechanismen auch alle Verschleißmechanismen beinhalten. Alle Verschleißmechanismen sind Reibungsmechanismen, da die zum Lösen der Verschleißpartikel benötigte Energie aus der Relativbewegung zwischen Grund- und Gegenkörper aufgebracht wird und deshalb eine Reibungskraft voraussetzt. Zusätzlich zu den in DIN 50320 definierten vier Haupt-Verschleißmechanismen sind im Entwurf DIN 50323 Teil 2 alleine 20 Verschleißmechanismen definiert. Zusätzlich sind die Mechanismen zu berücksichtigen, die Reibenergie in Wärme, Schall, Elektrizität, Licht und andere Energieformen wandeln, ohne Verschleiß zu erzeugen. Weitere tribologische Mechanismen erzeugen weder Reibung noch Verschleiß, sind in einem Reibmodell aber trotzdem zu berücksichtigen. Die Entstehung von hydrostatischem Druck in Schmieraschen ist dafür ein Beispiel. Dieser Mechanismus ist weder ein Reibungs- noch ein Verschleißmechanismus, da weder eine Reibungskraft (oder Reibungsenergie), noch Verschleiß erzeugt wird. Hydrostatischer Druck in Schmieraschen beeinflusst die Reibung aber indirekt über andere Reibungsmechanismen. So kann er zu einer verringerten realen Kontaktfläche und damit zu einem geringeren Reibungsanteil durch Furchung führen. Ein vollständiges Reibmodell muß deshalb neben den Reibungs- und Verschleißmechanismen zusätzliche tribologische Mechanismen wie beispielsweise hydrostatische Effekte berücksichtigen.

Starke Nichtlinearität kann die Zusammenhänge zwischen diesen tribologischen Mechanismen zusätzlich beeinflussen [179], wenn im einen Fall die Topografie gerade noch einen wirksamen Schmierfilm aufrecht erhalten kann und im anderen Fall eine leicht geänderte Topografie zum Zusammenbruch des Schmierfilms führt.

Ein vollständiges Reibmodell müßte alle Mechanismen und deren nichtlineare Wechselwirkungen berücksichtigen. Dies ist zur Zeit nicht möglich, weshalb vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen.

Das mechanisch rheologische Modell nach Sobis [180, 181] beinhaltet für das Ziel dieser Arbeit zu starke Vereinfachungen:

- Es kann den Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf die Reibung nicht erklären.
- Es wird vorausgesetzt, daß hydrostatische Effekte nur in abgeschlossenen Schmieraschen und hydrodynamische Effekte nur in offenen Bereichen auftreten. Hydrodynamische Effekte können aber auch in abgeschlossenen Schmieraschen entstehen, wenn die Geometrie der Taschen diese unterstützt.
- Effekte wie die Ausbildung von Makroschmieraschen sind nicht enthalten.

Im folgenden wird ein erweitertes Modell entwickelt. Es ist aufgrund seiner Komplexität nicht für die Berechnung der Reibung gedacht (beispielsweise in der FE-Simulation), soll aber die Modellvorstellungen über tribologische Mechanismen veranschaulichen.

Die Gesamtreibungskraft setzt sich aus verschiedenen in der Literatur beschriebenen Anteilen zusammen:

$$F_R = F_f + F_g + F_{fu} + F_{df} + F_{ds} + F_{dmf} + F_{dms} \quad \text{Gleichung 1}$$

F_R	Gesamt-Reibungskraft
$F_f = A_f \cdot \tau_f$	Im Festkörperkontakt verschweißte Kontaktflächen A_f haften derart, daß die Scherung im weichen Kontaktpartner mit der Scherfestigkeit τ_f erfolgt.
$F_g = A_g \cdot \tau_g$	Kontaktflächen im Zustand der Grenzreibung A_g werden innerhalb der Grenzschicht mit der Scherfestigkeit τ_g geschert. Im allgemeinen ist die Scherfestigkeit nicht konstant und ändert sich mit Ort und Zeit sowohl makroskopisch als auch innerhalb der Kontaktfläche einer einzelnen Rauheitsspitze.
F_{fu}	Reibungskraftanteil durch die Furchung der Kontaktfläche
F_{df}	Reibungskraftanteil durch hydrodynamische Effekte an Flanken einzelner Rauheitserhebungen
F_{ds}	Reibungskraftanteil durch elasto- und plasto-hydrodynamische Effekte z.B. an Stufen und Kanten der Topografie
F_{dmf}	Reibungskraftanteil durch hydrodynamisch wirkende makroskopische Schmierflanken in der Werkzeug- und Blechgeometrie
F_{dms}	Reibungskraftanteil durch hydrodynamisch wirkende makroskopische Stufen in der Werkzeug- und Blechgeometrie

Ausgehend von diesem Ansatz ist die Frage zu stellen, welche der Anteile durch die Topografie beeinflusst werden. Fest- und Grenzreibungs- sowie Furchungsanteil hängen in erster Linie von der Größe der wahren Kontaktfläche ab [182]. Die Größe der wahren Kontaktfläche wird von der Topografie aber in begrenztem Ausmaß beeinflusst [182, 98, 183], weshalb sich die Topografie des Bleches auf die Anteile von Fest- und Grenzreibung sowie Furchung nur wenig auswirkt.

Alle hydrodynamischen Effekte und damit deren Reibungsanteile werden von der Topografie beeinflusst. Die Scherspannungen im Schmierstoff sind aber im allgemeinen so gering, daß diese Anteile vernachlässigt werden.

Daraus ist zu schließen, daß die Topografie kaum einen direkten Einfluß auf die Reibung ausübt. Der in Kapitel 4 festgestellte große Einfluß der Topografie ist deshalb nicht direkt durch Reibungsmechanismen, sondern nur durch indirekt auf die Reibung wirkende tribologische Mechanismen zu erklären.

Die Topografie wirkt indirekt, da sie die Größe des Anteils der Normalkraft bestimmt, der durch hydrostatische und hydrodynamische Effekte getragen wird. Je größer dieser Anteil ist, desto weniger glättet die Topografie ein und desto geringer ist die wah-

re Kontaktfläche. Je geringer die wahre Kontaktfläche ist, desto niedriger sind Festkörperreibung, Grenzreibung und Furchung.

Zur Beurteilung des Einflusses der Topografie müssen deshalb besonders die tribologischen Mechanismen betrachtet werden, die durch hydrostatische und hydrodynamische Effekte Anteile der Normalkraft tragen und zu einer Verringerung der wahren Kontaktfläche beitragen.

Die Normalkraft setzt sich zusammen aus:

$$F_N = F_{Nf} + F_{Ng} + F_{Ns} + F_{Ndf} + F_{Nds} + F_{Nq} + F_{Nsm} + F_{Ndmf} + F_{Ndms} + F_{Nqm} \quad \text{Gleichung 2}$$

F_N	Gesamt-Normalkraft
F_{Nf}	Normalkraftanteil durch Festkörperkontakt
F_{Ng}	Normalkraftanteil der Kontaktflächen im Zustand der Grenzreibung
F_{Ns}	Normalkraftanteil durch hydrostatisch wirkende Schmieraschen
F_{Ndf}	Normalkraftanteil durch mikro-hydrodynamische Effekte an Flanken einzelner Rauheitserhebungen
F_{Nds}	Normalkraftanteil durch elasto- und plasto- hydrodynamische Effekte an Stufen und Kanten der Topografie
F_{Nq}	Normalkraftanteil durch lokale Quetschströmungen
F_{Ns}	Normalkraftanteil durch hydrostatisch wirkende Makroschmieraschen
F_{Ndmf}	Normalkraftanteil durch hydrodynamisch wirkende makroskopische Schmierflanken
F_{Ndms}	Normalkraftanteil durch hydrodynamisch wirkende makroskopische Stufen
F_{Nqm}	Normalkraftanteil durch makroskopische Quetschströmungen

Alle Anteile sind in der Literatur zumindest ansatzweise bereits beschrieben. Im folgenden wird untersucht, unter welchen Bedingungen diese Effekte zu nennenswerten Anteilen beitragen können und welche Eigenschaften die Topografie aufweisen sollte, um diese Effekte zu unterstützen. Da zur Beschreibung der Eigenschaften von Topografien in der Literatur für gleiche Eigenschaften unterschiedliche Begriffe und oft sogar gleiche Begriffe für unterschiedliche Eigenschaften verwendet werden, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine eindeutige Nomenklatur vorgeschlagen und mit verschiedenen Projektpartnern aus Forschung und Industrie abgestimmt. Diese Begriffe sind im folgenden Kapitel als Grundlage für die Diskussion der tribologischen Mechanismen beschrieben.

5.1 Begriffe

In der Literatur werden Oberflächen, die bei geringer Durchdringung bereits einen hohen Materialanteil aufweisen, als geschlossen bezeichnet und Oberflächen mit bei gleicher Durchdringung niedrigem Materialanteil als offen. Tabelle 2 zeigt nach dieser Definition links oben eine offene und links unten eine geschlossene Modelloberfläche.

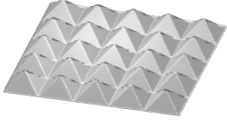
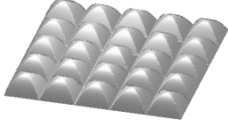
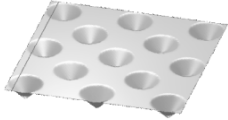
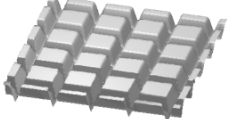
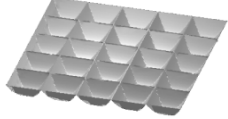
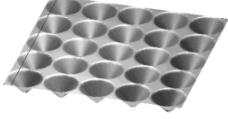
offen			
geschlossen			
Quelle	[144, 64]	[88, 94, 175]	[11]

Tabelle 2: Beispiele für die Verwendung der Begriffe "offen" und "geschlossen" bei der Bezeichnung von Blechoberflächen

Die Oberflächen in der Mitte unterscheiden sich in dieser Eigenschaft nicht. Auch wenn die untere Oberfläche offener aussehen mag, weisen die Materialanteilkurven dieser Flächen bei gleicher Durchdringung den gleichen Materialanteil auf [77].

Die Begriffe offen und geschlossen werden in der Literatur auch zur Beschreibung der Abgeschlossenheit verwendet. Die untere Oberfläche in der Mitte ist nach dieser Definition geschlossen, da sie aus abgeschlossenen Schmieraschen besteht. Die obere Oberfläche in der Mitte ist offen, da der Schmierstoff seitlich aus der Topografie entweichen kann.

Eine dritte Variante der Verwendung der Begriffe offen und geschlossen beschreibt die Dichte einzelner Strukturelemente.

Bei der unteren rechten Topografie liegen die Krater dicht zusammen, im oberen Bild weiter auseinander. Die untere Fläche wird als geschlossen, die obere als offen bezeichnet.

Das vorgestellte Beispiel macht deutlich, daß, um Mißverständnisse bei der Beschreibung von Topografien zu vermeiden, eine eindeutige Definition der Begriffe benötigt wird. Ausgehend von Diskussionen mit Partnern aus der Industrie und Hochschulinstituten wurde der nachfolgend beschriebene Vorschlag erarbeitet.

Vorschlag zur Bezeichnung von Blechtopografien

In der DIN 4761 sind Begriffe zur Beschreibung des Oberflächencharakters festgelegt. Ein Schwerpunkt der DIN liegt auf der Beschreibung rilliger Oberflächen. Unter dem Abschnitt "Nichttrillige Oberflächen" sind für die Blechoberflächen geeignete Begriffe für muldige, kuppige und gewellte Oberflächen definiert. Aus der Entwicklung

moderner Blech-Topografien ergibt sich aber die Notwendigkeit, zum einen die Verwendung der Begriffe der DIN 4761 für die Blechumformung näher zu definieren und zum anderen zu ergänzen, um die in der Blechumformung relevanten Merkmale zu beschreiben.

Vorgehensweise:

Die Eigenschaft einer Topografie wird durch ein Merkmal und dessen Wert beschrieben.

$$\text{Eigenschaft} = \text{Merkmal} + \text{Wert}.$$

Eine Topografie wird durch die Summe ihrer Eigenschaften charakterisiert. Die Werte können durch qualitative, verbale Beschreibungen oder quantitative Oberflächenkenngrößen angegeben werden.

Die verbale Beschreibung eignet sich eher zum qualitativen Vergleich von Oberflächen ("Die Abgeschlossenheit von Blech A ist größer als die von Blech B"), während die quantitative Beschreibung mit Oberflächenkenngrößen zur eindeutigen Spezifikation benötigt wird.

Es wird der folgende Satz von Merkmalen vorgeschlagen:

Merkmal		Wert	
		hoher Wert	niedriger Wert
1	Abgeschlossenheit	geschlossen	offen
2	Leere	leer	voll
3	geschlossener Leerflächenanteil	hoher Anteil	geringer Anteil
4	Feinheit	fein	grob
5	Dichte	dicht	weit
6	Größe der Strukturelemente	große Elemente	kleine Elemente
7	Gleichmäßigkeit	stochastisch	deterministisch
8	Richtung	gerichtet, anisotrop	ungerichtet, isotrop
9	Welligkeit	wellig	eben

Tabelle 3: Vorschlag für Begriffe zur einheitlichen Bezeichnung der geometrischen Eigenschaften von Blechoberflächen

5.1.1 Merkmal Abgeschlossenheit

In DIN 4761 werden rillige, kuppige, muldige und wellige Topografien unterschieden. Der Begriff wellig bezeichnet dabei eine Topografie, die sowohl aus Kuppen als auch aus Mulden besteht. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird hier vorgeschlagen, den Begriff wellig nicht zur Beschreibung der Rauheit, sondern nur für die langwelligen Anteile zu verwenden. Eine kuppige Topografie zeichnet sich dadurch aus, daß auch in einem tiefliegenden horizontalen Schnitt ein zusammenhängendes zum Meßrand hin offenes Leervolumen vorhanden ist.

Offene (kuppige oder rillige) Topografie

Eine Struktur, die aus Kuppen besteht, die durch tiefe "Gräben" verbunden sind, wird offen(kuppig) genannt (Beispiele 1.1 und 1.3 in Tabelle 4).

Geschlossene (muldige) Topografie

Strukturen mit einzelnen nicht ineinanderfließenden Kratern auf einer ebenen Plateaufläche werden als geschlossen (muldig) bezeichnet (Beispiel 1.4 in Tabelle 4).

Die Übergänge zwischen kuppigen und muldigen Topografien (Beispiel 1.2) sind fließend weshalb einige Topografien eher kuppig, andere eher muldig genannt werden können. In Analogie zur Geographie zeichnet sich eine eher kuppige Topografie durch tiefer liegende Pässe aus.

Oberflächenkenngrößen

Als Kenngrößen zur quantitativen Beschreibung können die Perkolationstiefe p , oder die Oberflächenkenngröße c_{clm} (Durchdringung beim Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils) angegeben werden. Die Abgeschlossenheit läßt sich nicht anhand einzelner Schnitte, sonder nur mit einer räumlichen Vermessung beurteilen.

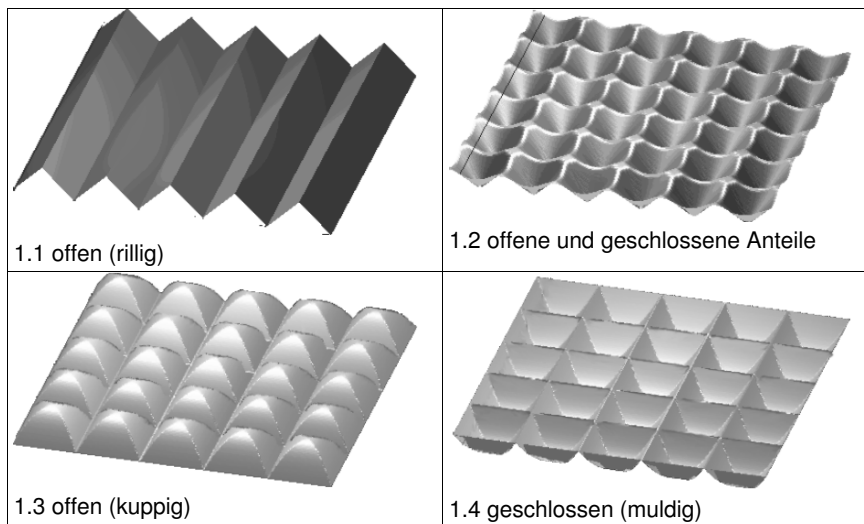


Tabelle 4: Beispieloberflächen für das Merkmal Abgeschlossenheit

5.1.2 Merkmal Leere

In der Literatur sind bereits Profilleeregrad, Traganteil und Materialanteil üblich, um zu beschreiben, ob die Topografie vorwiegend aus Plateaus oder großen Kuppen mit einzelnen Riefen (hoher Völligkeitsgrad) oder großen Mulden mit einzelnen Spitzen (hoher Leeregrad) besteht. Eine Topografie mit hohem Leeregrad wird nach Kienzle und Mietzner [64, 144] als offen, eine mit hohem Völligkeitsgrad als geschlossen bezeichnet. Da die Begriffe offen und geschlossen nicht zu den vorgeschlagenen Kenngrößen Materialanteil, Traganteil, Leeregrad und Völligkeitsgrad passen, wird hier vorgeschlagen, die Begriffe voll und leer zu verwenden. Eine Topografie mit hohem Leeregrad wird als leer, eine mit hohem Völligkeitsgrad als voll bezeichnet.

Leere Topografie

Eine Topografie wird als leer bezeichnet, wenn sie einen großen Anteil an Leervolumen aufweist. Im Vergleich zu einer vollen Topografie hat eine leere Topografie bei gleicher Schnittiefe einen geringeren Traganteil und einen höheren Profilleeregrad.

Volle Topografie

Analog zur leeren Topografie wird eine Topografie als voll bezeichnet, wenn sie einen großen Anteil an Materialvolumen aufweist.

Oberflächenkenngrößen

Sowohl der Profilleeregrad als auch Trag- bzw. Materialanteil sind bereits definiert und können zur Beschreibung der Leere genutzt werden. Für die Anwendung in der Blechumformung kann es erforderlich sein, den Verlauf des Materialanteils über der Schnittiefe zu beschreiben. In diesem Fall bietet es sich an, die in DIN ISO 13565-2 genormten R_k -Parameter und Materialanteile zur genaueren Beschreibung der Materialanteilkurve zu nutzen.

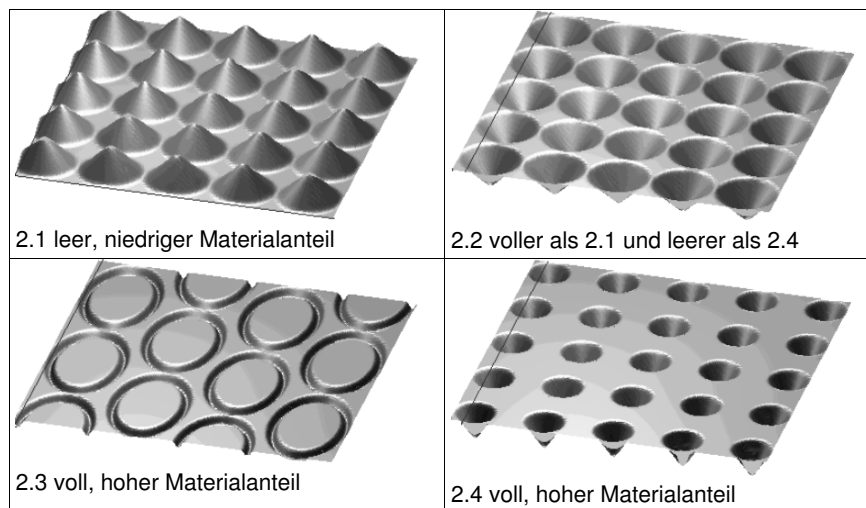


Tabelle 5: Beispieloberflächen für das Merkmal Leere

5.1.3 Geschlossener Leerflächenanteil

Das Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils (Oberflächenkenngröße α_{clm}) gibt an, wie groß der Anteil an Leervolumen ist, in dem während der Umformung hydrostatischer Druck aufgebaut werden kann. Der geschlossene Leerflächenanteil hängt von der Abgeschlossenheit und der Leere ab.

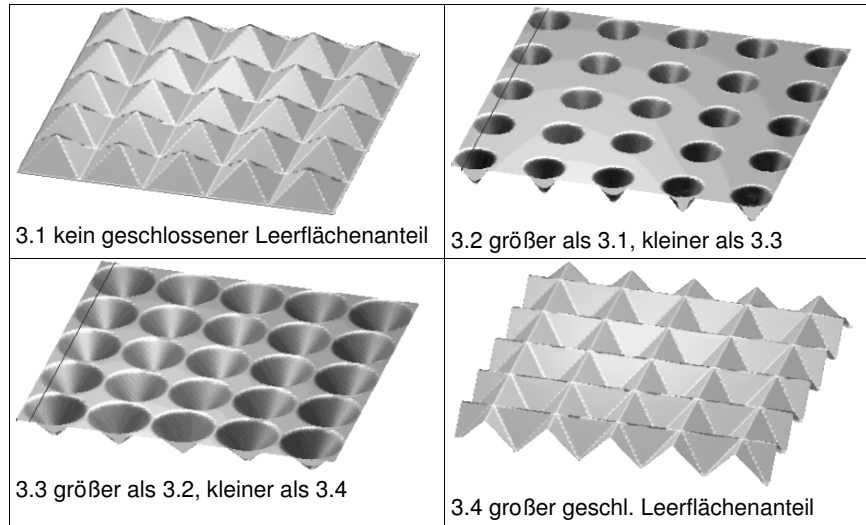


Tabelle 6: Beispieloberflächen für das Merkmal geschlossener Leerflächenanteil

5.1.4 Merkmal Feinheit

Die Spitzenzahl beschreibt zum einen, ob die Topografie aus kleinen oder großen Strukturelementen (z.B. Mulden, Kratern oder Kuppen) besteht und zum anderen, wie dicht diese Strukturelemente zusammenliegen. Größe und Dichte der Strukturelemente werden zum einen durch das Texturierungsverfahren und zum anderen durch die Prozeßparameter (Strahlgut, Stromdichte, Fokussierung, ...) festgelegt. Eine Unterscheidung der Merkmale Dichte und Größe der Strukturelemente ist erforderlich, da auch mit großen Strukturelementen eine feine Topografie hergestellt werden kann, wenn sie überlappend angeordnet sind. Auch mit kleinen Spitzen auf der Dressierwalze kann eine grobe Struktur hergestellt werden, wenn ein so geringer Dressiergrad eingestellt wird, daß nur wenige Spitzen in das Blech eingedrückt werden. Um beide in der Spitzenzahl enthaltenen Eigenschaften eindeutig mit einem Begriff bezeichnen zu können, wird hier das Merkmal Feinheit definiert.

Feine Topografie

Eine Topografie wird als fein bezeichnet, wenn sie aus vielen kleinen oder überlappenden Strukturelementen besteht.

Grobe Topografie

Analog zur feinen Topografie wird eine Topografie grob genannt, wenn sie sich aus wenigen großen Strukturmerkmalen zusammensetzt.

Oberflächenkenngrößen

Sowohl die Spitzen- und Talzahlen aus 2D- als auch aus 3D-Messungen können die Feinheit einer Topografie beschreiben. Da eine Spitze (oder ein Tal) in einer 2D-Messung nicht eindeutig bestimmt werden kann, (Spitzen können in Wirklichkeit nur Grate sein) sind im Zweifelsfall 3D-Kenngrößen vorzuziehen.

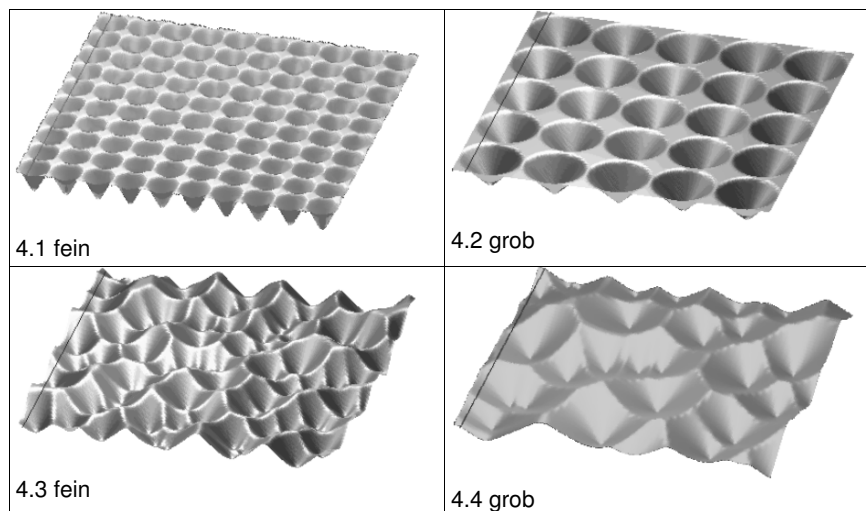


Tabelle 7: Beispieloberflächen für das Merkmal Feinheit

5.1.5 Merkmal Dichte

Zusammen mit der Größe der Strukturelemente beschreibt die Dichte die Feinheit der Topografie. Die Dichte einer Topografie gibt an, wie eng die Strukturmerkmale beieinander liegen. Bei Topografien mit isolierten Strukturelementen läßt sich die Dichte leicht anhand der Abstände der Strukturelemente beurteilen. Bei SBT und EDT-Topografien überlappen die Strukturelemente im allgemeinen stark. Dichte und Größe der Strukturelemente sind so eng miteinander verknüpft, daß das Merkmal Feinheit zur Beschreibung ausreicht.

Dichte Topografie

Die Strukturelemente liegen dicht zusammen oder überlappen.

Weite Topografie

Bei einer weiten Topografie weisen die Strukturelemente größere Abstände auf.

Überlappende Topografie

Die Strukturelemente sind so dicht angeordnet, daß sie ineinanderfließen.

Isolierte Topografie

Bei einer isolierten Topografie sind die Strukturelemente voneinander getrennt.

Oberflächenkenngrößen

Bei deterministischen Strukturen kann der Abstand der Strukturelemente direkt oder anhand der Abstände der Peaks im Fourier-Spektrum gemessen und z.B. in Strukturelementen pro mm² angegeben werden. Für stochastische Strukturen ist die Dichte nur zu beurteilen werden, wenn die Strukturelemente eindeutig zählbar sind.

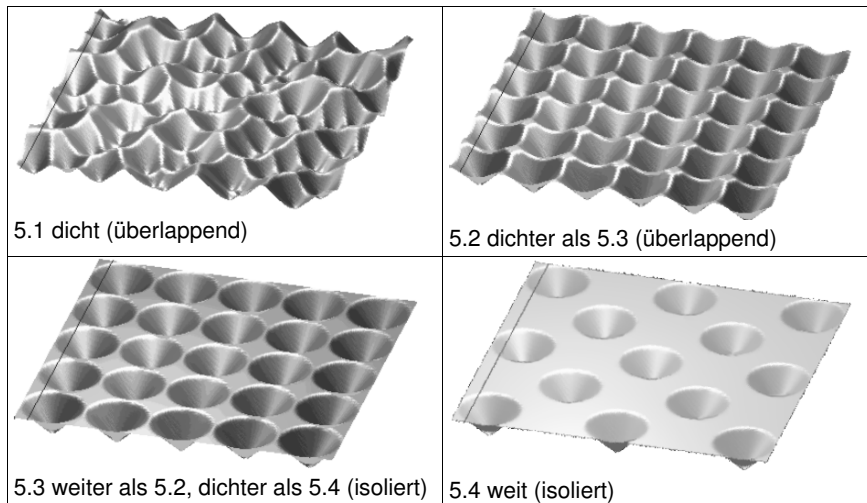


Tabelle 8: Beispieloberflächen für das Merkmal Dichte

5.1.6 Größe der Strukturelemente

Mit den Texturierungsverfahren lassen sich unterschiedlich große Strukturelemente herstellen. Bei EBT, Laser-Texturierung und Pretex kann der Durchmesser der Mulden variiert werden, und bei SBT und EDT beeinflussen Strahlgut bzw. Stromdichte die Größe der Strukturelemente.

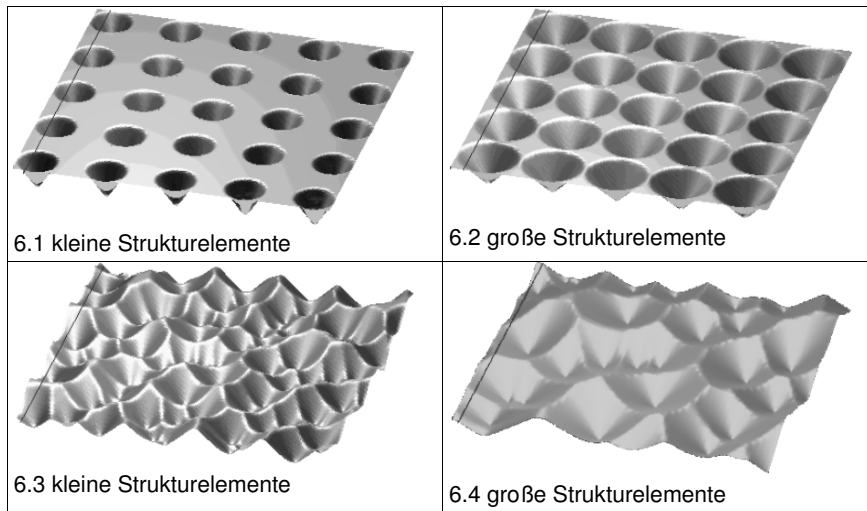


Tabelle 9: Beispieloberflächen für das Merkmal Größe der Strukturelemente

5.1.7 Merkmal Gleichmäßigkeit

Die Begriffe "gleichmäßig" und "ungleichmäßig" sind aus DIN 4761 übernommen, hier werden aber die in der Blechumformung üblichen Begriffen "deterministisch" und "stochastisch" vorgezogen.

Stochastische (ungleichmäßige) Topografie

Einzelne Strukturmerkmale wiederholen sich nicht in regelmäßigen Abständen.

Deterministische (gleichmäßige) Topografie

Bei einer (voll) deterministischen Topografie treten in mehreren Richtungen Geometriemerkmale in regelmäßigen Abständen auf. (Beispiel EBT mit isolierten Kratern)

Semideterministische (halb gleichmäßige) Topografie

Eine semideterministische Topografie zeigt nur in einer Richtung Geometriemerkmale in regelmäßigen Abständen. (Beispiel Lasertex)

Pseudostochastische (falsch-ungleichmäßige) Topografie

Eine pseudostochastische Topografie hat deterministische Anteile und sieht stochastisch aus. Die zur Zeit mit dem EBT-Verfahren hergestellten pseudostochastischen Topografien entstehen, durch die dichte Anordnung der Strukturelemente. Die Kraterränder sind ungleichmäßig, da die Schmelze bei jedem Krater in einer anderen Geometrie erstarrt und je nach Prozeßführung auch Tropfen bilden kann. Die Anordnung der Krater ist deterministisch, was aber aufgrund der dicht beieinander liegenden stochastischen Kraterränder mit dem Auge nicht zu erkennen ist. Eine pseudostochastische Topografie hat stochastische und deterministische Anteile.

Oberflächenkenngrößen

Im 2D-Fourier-Spektrum sind bei einer semideterministischen Topografie parallele Wellen und in einer deterministischen Peaks in regelmäßigen Abständen vorhanden.

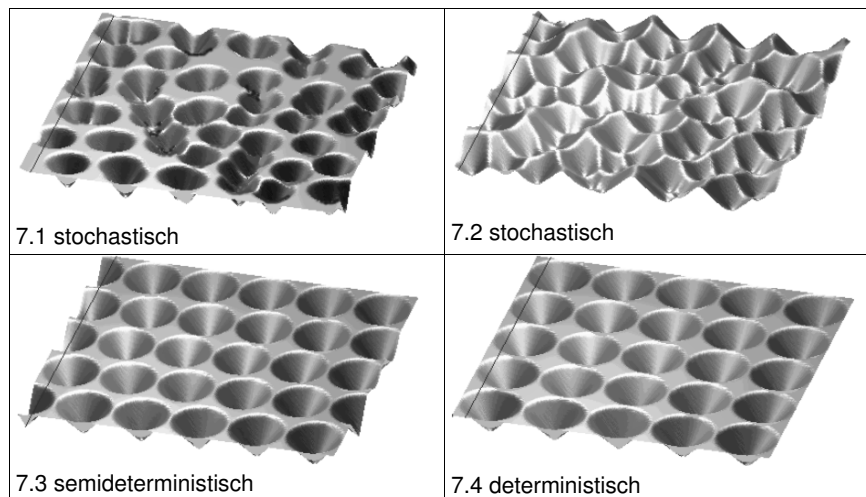


Tabelle 10: Beispieloberflächen für das Merkmal Gleichmäßigkeit

5.1.8 Merkmal Richtung (Isotropie)

Entsprechend der DIN 4761 werden die Begriffe ungerichtet und gerichtet verwendet. In der Blechumformung ist es auch üblich, von isotropen und anisotropen Texturen zu sprechen.

Ungerichtete (isotrope) Topografie

Eine Topografie wird als ungerichtet (isotrop) bezeichnet, wenn sie in allen Richtungen gleiche geometrische Eigenschaften aufweist. Bei ungerichteten Topografien sind 2D-Oberflächenkenngrößen unabhängig von der Tastrichtung. Alle zur Zeit zur Verfügung stehenden ungerichteten Topografien sind stochastisch.

Gerichtete (anisotrope) Topografie

Eine gerichtete (anisotrope) Topografie weist in unterschiedlichen Richtungen unterschiedliche geometrische Eigenschaften auf. Eine geschliffene Struktur weist beispielsweise längs und quer zur Schleifrichtung unterschiedliche Eigenschaften auf. Alle zur Zeit verfügbare deterministische Strukturen sind gerichtet, da die Abstände der Strukturmerkmale von der Richtung abhängen.

Oberflächenkenngrößen

Zur Beurteilung der Richtung oder Isotropie können waagrechte, kombinierte oder 3D- Oberflächenkenngrößen in verschiedenen Richtungen gemessen werden, um das Verhältnis des größten zum kleinsten Wert zu berechnen.

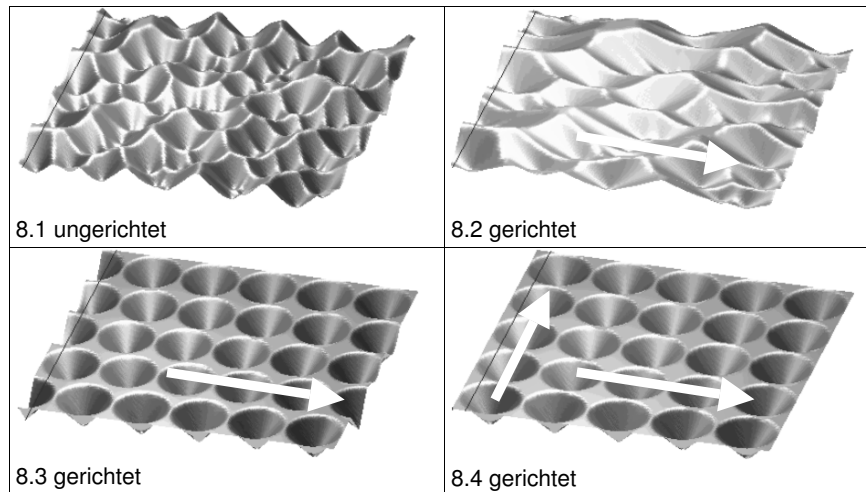


Tabelle 11: Beispieloberflächen für das Merkmal Richtung

5.1.9 Merkmal Welligkeit

Alle zuvor beschriebenen Merkmale beschreiben die Rauheit. Langwellige Gestaltabweichungen werden in der Meßtechnik durch Filter von der Rauheit getrennt, um Rauheit und Welligkeit einzeln beurteilen zu können. Die Grenzen zwischen Rauheit und Welligkeit hängen von der Anwendung bzw. den für die Filterung festgelegten Grenzwellenlängen ab.

Ebene Topografie

Eine Topografie wird eben genannt, wenn langwellige Gestaltabweichungen nur eine geringe Amplitude aufweisen.

Wellige Topografie

Eine Topografie ist wellig, wenn langwellige Gestaltabweichungen mit hoher Amplitude vorhanden sind.

Oberflächenkenngrößen

Als Kenngröße zur Beschreibung der Welligkeit sind die am Welligkeitsprofil gemessene Wellentiefe W_t [DIN 4774] und die Wellenlänge geeignet. Aussagekräftig sind diese Kenngrößen jedoch nur, wenn auch die Meßbedingungen und die Art der Filterung angegeben werden.

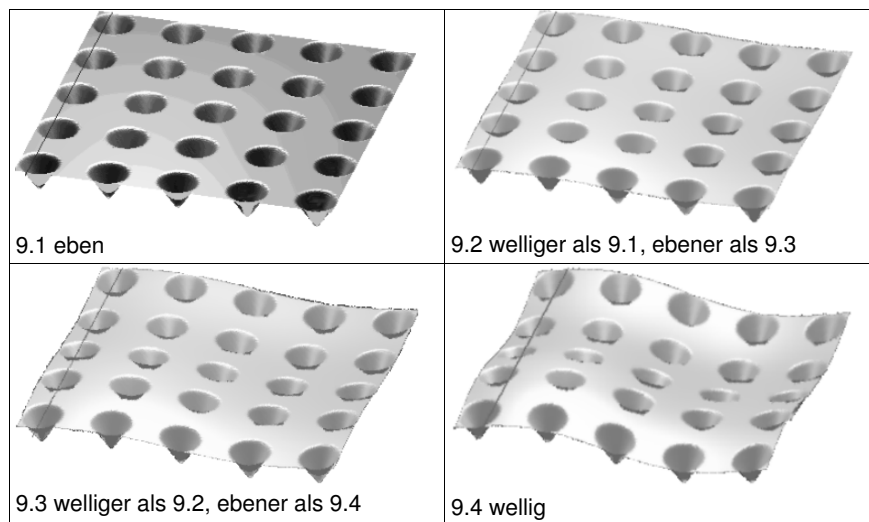


Tabelle 12: Beispieloberflächen für das Merkmal Welligkeit

5.1.10 Abhängigkeit von Abgeschlossenheit, Leere und geschlossenem Leerflächenanteil

Aus den drei Merkmalen Abgeschlossenheit, Leere und geschlossener Leerflächenanteil sind nur zwei erforderlich, um diese Eigenschaften einer Topografie eindeutig zu beschreiben. Eine leere Topografie (mit hohem Profileeregrad) und gleichzeitig geschlossene Topografie (mit hoher Abgeschlossenheit) muß einen hohen geschlossenen Leerflächenanteil aufweisen.

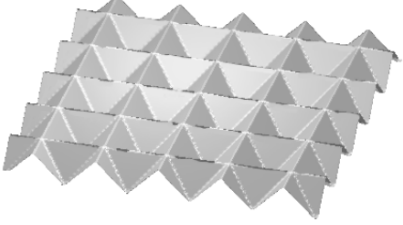
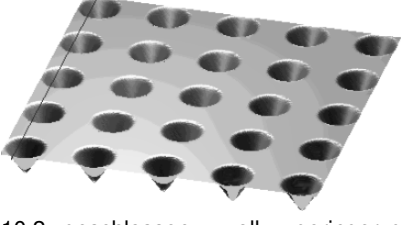
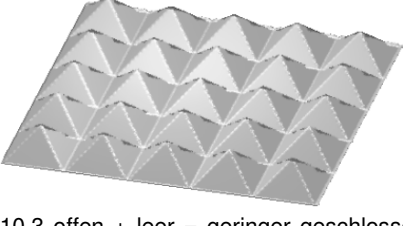
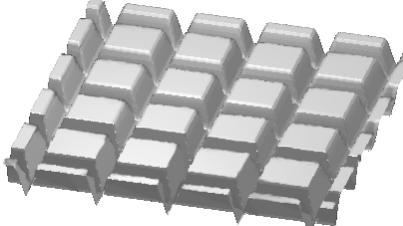
 10.1 geschlossen + leer = hoher geschlossener Leerflächenanteil	 10.2 geschlossen + voll = geringer geschlossener Leerflächenanteil
 10.3 offen + leer = geringer geschlossener Leerflächenanteil	 10.4 offen + voll = geringer geschlossener Leerflächenanteil

Tabelle 13: Beispieloberflächen zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Abgeschlossenheit, Leere und geschlossenem Leerflächenanteil

5.1.11 Abhängigkeit von Feinheit, Dichte und Größe der Strukturelemente

Die Merkmale Feinheit, Dichte und Größe der Strukturelemente sind voneinander abhängig. Auch wenn die Topografie aus großen Strukturelementen (z.B. großen EBT-Kratern) besteht, kann die Struktur fein sein, wenn die Strukturelemente überlappend aufgebracht werden.

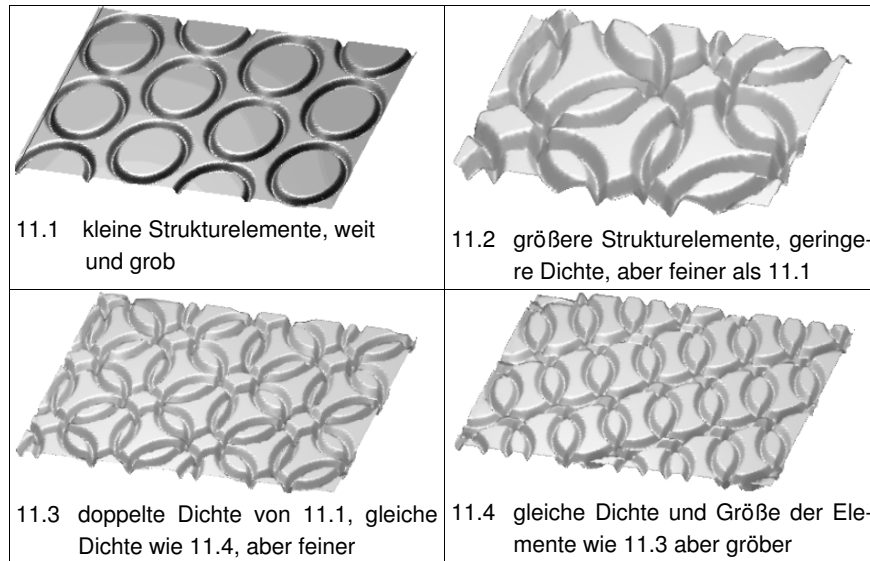


Tabelle 14: Beispieloberflächen zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Feinheit, Dichte und Größe der Strukturelemente

5.1.12 Weitere Merkmale

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Begriffe stellen eine Auswahl dar und sollen die nach dem aktuellen Stand der Kenntnisse für die Blechumformung wesentlichen Eigenschaften von Blechen beschreiben. Aufgrund neuer Erkenntnisse oder für andere Anwendungen wie z.B. das Lackieren kann es erforderlich werden, weitere Eigenschaften der Bleche zu beschreiben, und diese Begriffe zu ergänzen. Beispiele für weitere Merkmale und Werte sind in Tabelle 15 aufgeführt.

Merkmal	Werte
Tiefe	tief, flach
Muldenform	kraterartig, kalottenförmig, rillig, ringförmig
Kuppenform	rundkämmig, spitzkämmig, halbkugelförmig
Kuppenhöhe	hochkuppig, flachkuppig
Muldentiefe	tiefmuldig, flachmuldig

Tabelle 15: Begriffe zur Beschreibung zusätzlicher Eigenschaften von Topografien

5.2 Untersuchung der Wirkmechanismen der Topografie

In diesem Kapitel wird diskutiert, wie die Topografie tribologische Mechanismen beeinflussen kann, und welche Eigenschaften die Topografie dafür aufweisen muß. Die Ergebnisse dienen dazu Oberflächenkenngrößen zur quantitativen Beschreibung der funktionsrelevanten Eigenschaften der Oberfläche auszuwählen. Zur qualitativen Beschreibung der Eigenschaften der Topografie werden die in Kapitel 5.1 definierten Begriffe genutzt.

Tabelle 29 im Anhang enthält eine Übersicht über die im folgenden näher beschriebenen Mechanismen.

5.2.1 Hydrostatisch wirkende Mikro-Schmieraschen

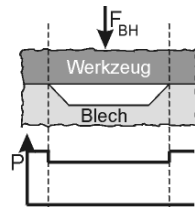


Bild 15

Abgeschlossene Schmieraschen wirken, wenn Topografien so weit einglätten, daß der Schmierstoff in einzelnen Bereichen der Topografie nicht mehr seitlich entweichen kann und komprimiert wird. Theoretische Ansätze zur Berechnung der Schmierstoffdrücke werden zur Zeit noch entwickelt [184]. Wie die Simulationsergebnisse von Prier [183] und Neudecker [185] mit der Methode der Finiten Elemente zeigen, kann der Druck in den Schmieraschen in etwa die Höhe der Fließgrenze des Bleches erreichen und einen deutlichen Anteil der Normalkraft tragen.

Dazu muß die Oberfläche leer und abgeschlossen sein. Je tiefer die Topografie abgeschlossen ist, desto weiter muß die Topografie einglätten, bis die Schmieraschen abgeschlossen sind und hydrostatisch wirken können. Bei zu niedrigen Flächenpressungen und geringer Plastifizierung des Grundwerkstoffs können hohe Spitzen der Topografie die Gesamt-Normalkraft tragen, ohne daß die Schmieraschen hydrostatisch wirken.

5.2.2 Hydrodynamisch wirkende Mikro-Flanken

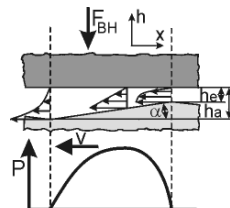


Bild 16

Bilden die Topografie von Blech und Werkzeug einen sich stetig verengenden Spalt, dann kann im Schmierstoff hydrodynamischer Druck aufgebaut werden [186]. Der Druck in einem keilförmigen Schmierpalt kann nach der folgenden Gleichung berechnet werden [187, 188]:

$$P(x) = 3 \frac{v\eta}{\alpha h_e} \left\{ \left[\frac{h_e}{h_a} - 1 \right]^2 - \left[\frac{h_e}{h(x)} - 1 \right]^2 \right\} \quad \text{Gleichung 3}$$

In Bild 17 sind die Druckverteilungen für ausgewählte Einlauf- und Auslaufhöhen angegeben.

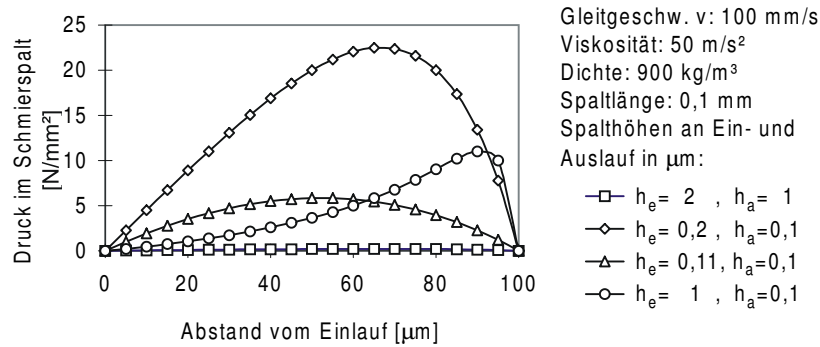


Bild 17: Druckverteilung im Schmierpalt für unterschiedliche Flanken- und Spalthöhen

Die wesentlichen aus der Gleichung und dem Diagramm ablesbaren Ergebnisse sind:

- Der maximale Druck von fast 25 N/mm² zeigt, daß bei entsprechender Topografie ein erheblicher Anteil der Normalkraft durch diesen Effekt getragen werden kann.
- Der Druck steigt proportional mit Gleitgeschwindigkeit und Viskosität
- Je flacher der Schmierpalt, desto höher ist der Druck
- Es gibt einen optimalen Anstellwinkel.
- Der optimale Anstellwinkel ist klein [186]

5.2.3 Elasto- und plasto- hydrodynamisch wirkende Mikro-Stufen

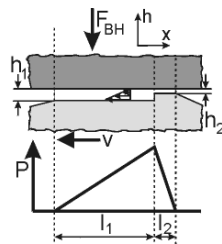


Bild 18

Eine Stufe in der Kontaktfläche einer eingeglätteten Spitze kann durch hydrodynamische Effekte einen Teil der Normalkraft tragen. Die Stufe kann

- bereits vorhanden sein,
- durch Gleitvorgänge im Gefüge oder
- durch elasto- und plastrohydrodynamische Effekte erzeugt werden [117, 118, 189].

Die Entstehung der Stufe durch elasto- und plastrohydrodynamische Effekte erfordert Startbedingungen. Hydrostatischer Druck in abgeschlossenen Schmieraschen kann zusammen

mit hydrodynamischen Effekten (Flanke oder Stufe) einen Teil des Schmierstoffs in die Kontaktzone drücken und den dünnen, für die hohen Drücke erforderlichen Schmierfilm bilden.

Einen Ansatz zur Abschätzung des Druckes bieten die Gleichungen für Stufenlager [187, 188]:

$$p_{\max} = \frac{6\eta v (h_1 - h_2) l_1 l_2}{l_2 h_1^3 + h_2^3}$$

Gleichung 4

In Bild 19 sind die maximalen Drücke für ausgewählte Stufenhöhen dargestellt.

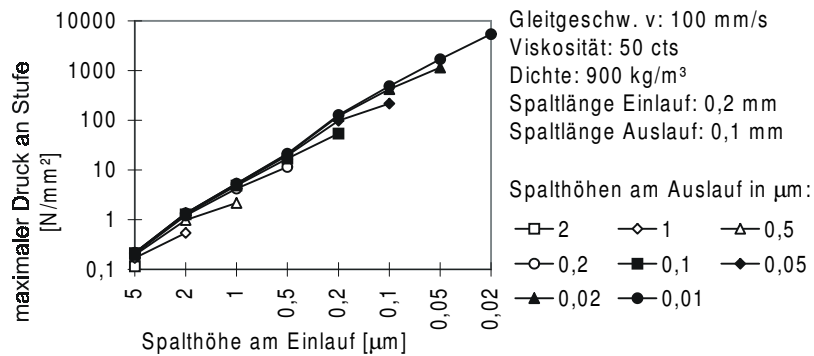


Bild 19: Schmierstoffdrücke an Mikro-Stufen unterschiedlicher Geometrie

Bei geringen Spalthöhen, insbesondere am Auslauf der Stufe, können Drücke weit über der Fließgrenze von Stahl entstehen. Diese führen zu plastischer Deformation der Kontaktfläche und erhöhen die Spalthöhe so weit, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Druck und Spalthöhe eingestellt hat.

Die Gleichung aus der Kontinuumsmechanik berücksichtigt die Effekte der Grenzreibung nicht. Bei Schmierfilmdicken im Bereich weniger Moleküldicken sind noch höhere Drücke zu erwarten.

5.2.4 Makro- und Mikro-Quetschströmungen

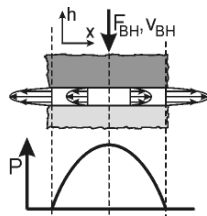


Bild 20

Ein weiterer hydrodynamischer Effekt ist zu beobachten, wenn der Niederhalter auf das Blech aufsetzt und den Schmierstoff seitlich verdrängt. Je mehr Schmierstoff verdrängt wird, desto dünner wird der Spalt zwischen Blech und Werkzeug und desto mehr Widerstand muß zum Verdrängen des verbleibenden Schmierstoffs überwunden werden. Im Fall ideal glatter Werkzeug- und Blechoberflächen berührt das Werkzeug das Blech nie. Bei rauen Oberflächen endet das Verdrängen des Schmierstoffs wenn die Kontaktnormalspannung von der wahren Kontaktfläche und vom Druck in abgeschlossenen

Schmieraschen komplett getragen wird. Die Zeit, die bei vorgegebener Kontaktnormalspannung in realen Ziehteilen für diese Einglättung benötigt wird, hängt von der Größe der beanspruchten Fläche, der Viskosität des Schmierstoffs und der Topografie ab. Im mechanisch rheologischen Modell [180, 181] wird dieser Mechanismus durch die offenen hydrodynamischen Schmieraschen abgebildet.

Einen Ansatz zur Abschätzung bietet die Berechnung der Quetschströmung zwischen einer Platte und einem Stempel mit runder Querschnittsfläche [187, 188].

$$\bar{P} = -\frac{3}{2}\pi \frac{\eta v_{BH}}{h^3} R^4$$

Gleichung 5

Im folgenden Diagramm sind Verläufe der Schmierfilmdicke über der Zeit für ausgewählte Stempelradien R und mittlere Stempel-Flächenpressungen $\bar{P}$ dargestellt.

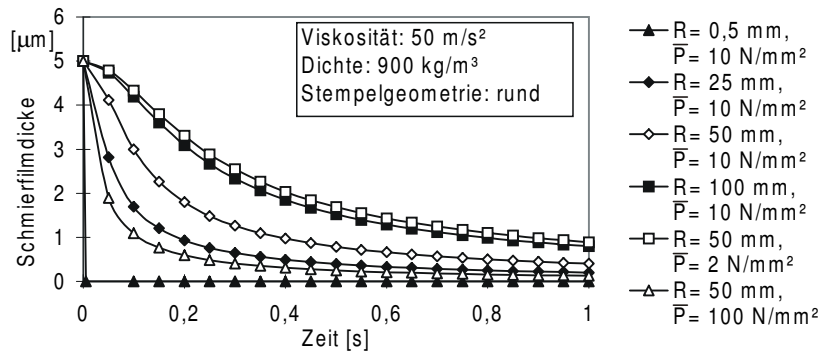


Bild 21: Verlauf der Schmierfilmdicke für unterschiedliche Stempeldurchmesser und Flächenpressungen

Bei kleinen Kontaktflächen in der Größenordnung einzelner Rauheitsspitzen wird der Schmierstoff sehr schnell seitlich verdrängt. Bei sehr kurzen Kontaktzeiten, wie beim Impuls durch den Aufprall einer Kugel auf eine Platte wurde nachgewiesen, daß der Schmierfilm nicht unterbrochen wird [182]. Unter diesen Beanspruchungsbedingungen ist auch die Abhängigkeit der Viskosität des Schmierstoffs von Druck und Temperatur zu berücksichtigen. Die Beobachtung, daß beim Auftreffimpuls des Niederhalters die Topografie kaum einglättet, kann durch diesen Mechanismus erklärt werden [190].

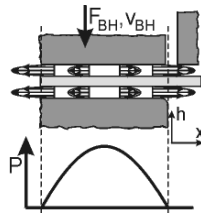


Bild 22

Bei größeren homogen beanspruchten Bereichen im Werkzeug, wie unter dem Niederhalter (Bild 22) oder am Stempelboden, hat der Schmierstoff längere Strecken zurückzulegen, bis er entweichen kann. Bild 21 zeigt, daß je nach Flächenpressung und Größe der Kontaktfläche einige Zehntelsekunden benötigt werden, um den Schmierstoff zu verdrängen.

Versuche im Streifenziehversuch mit großen Werkzeugen ($74 \times 144 \text{ mm}$) ergaben, daß bei den kurzen für die Umformung benötigten Kontaktzeiten von Blech und Niederhalter dieser Effekt

die Reibung deutlich beeinflussen kann.

In Bild 23 sind Reibungskraftverläufe im Streifenziehversuch bei Flächenpressungen von 2 und 6 N/mm^2 dargestellt.

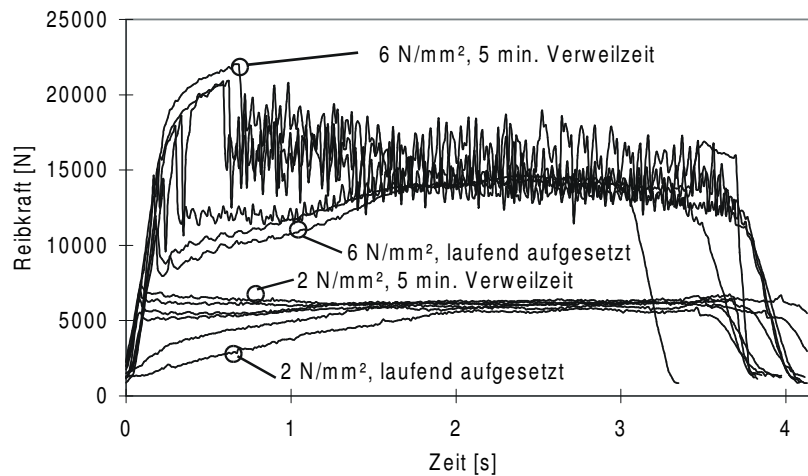


Bild 23: Im Streifenziehversuch gemessene Reibungskraftverläufe für unterschiedliche Aufsetzzeitpunkte des Werkzeugs

Die Reibungskraft für "2 N/mm², laufend aufgesetzt" steigt an, bis sie nach 1,5 bis 2 Sekunden einen stationären Zustand erreicht. Die Kurve "2 N/mm², 5 min. Verweilzeit" stellt den Verlauf der Reibungskraft dar, nachdem das Werkzeug 5 Minuten ohne Gleitbewegung auf dem Blech auflag. Die Reibungszahl erreicht sofort den stationären Bereich. Für "6 N/mm² laufend aufgesetzt" erfolgt wie bei 2 N/mm² ein Anstieg der Reibungszahl über einen Zeitraum von ca. 1,5 Sekunden, um dann in den stationären Zustand überzugehen. Nach 5 Minuten Verweilzeit haftet das Blech zunächst, reißt los und gleitet mit deutlichen Stick-Slip-Effekten. Die übrigen Kurven sind nach Verweilzeiten des Werkzeugs von 0,5, 1, 5 und 30 Sekunden gemessen worden.

Die Messungen bestätigen den Mechanismus der Quetschströmungen und die Ergebnisse der Berechnung. Je länger das Werkzeug vor dem Gleiten des Bleches aufliegt, desto mehr Schmierstoff kann seitlich verdrängt werden und desto höher ist die Haftreibung zu Beginn des Versuchs. Nach etwa 2 Sekunden hat sich weitgehend unabhängig von der Verweilzeit ein stationärer Bereich gebildet.

Bei offenen leeren Topografien kann der Schmierstoff durch die tiefliegenden breiten Kanäle schneller aus der Kontaktzone entweichen als bei geschlossenen vollen Topografien.

Neben der Haftreibung beeinflusst dieser Mechanismus auch die Gleitreibung. Sind im oberen Bereich der Topografie feine Spitzen vorhanden, dann setzt der Niederhalter schnell auf diesen Spitzen auf. Messungen und FE-Simulationen zeigen, daß die feinen Spitzen relativ hohe Kontaktnormalspannungen tragen können, ohne einzuglätten. Selbst der Auftreffimpuls des Niederhalters glättet solche Spitzen kaum ein [190]. Sobald das Blech nach dem Aufsetzen des Niederhalters gleitet, werden die

Spitzen durch Reibschubspannungen und Zugspannungen im Grundwerkstoff weiter eingeglättet. Währenddessen muß der Schmierstoff weiter verdrängt werden und trägt einen Teil der Kontaktnormalspannung. Je leerer die Topografie im Bereich der Spitzen ist, desto mehr Schmierstoff muß während der Umformung herausgedrückt werden und desto deutlicher kann dieser Effekt wirken. Daß feine und hohe Spitzen die Reibung senken können, wird in mehreren Untersuchungen bestätigt [80, 89, 125, 130] und kann durch diesen Mechanismus erklärt werden.

5.2.5 Hydrostatisch wirkende Makro-Schmirtaschen

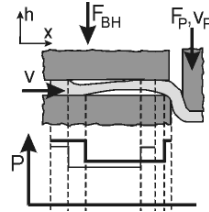


Bild 24

Die von Grahert und Emmens beschriebene Entstehung von Makroschmirtaschen ist ein hydrostatischer Mechanismus. Bei rotationssymmetrischen Näpfen dickt der Rand der Ronde während des Ziehvorgangs auf. Im Raum zwischen dem aufdickenden Rand und der Matrizenrundung kann Schmierstoff eingeschlossen und komprimiert werden. Dieser Mechanismus wird jedoch weniger von der Topografie beeinflusst, als durch die Geometrie des Werkzeugs. Er wirkt auf die Gleitreibung, da das Blech zunächst fließen und am Rand aufdicken muß, bevor sich der Druck aufbaut. Zur Berechnung der Drücke in komplexen Ziehtteilen reichen einfache Ansätze nicht aus, es werden Methoden wie die FEM benötigt.

5.2.6 Hydrodynamisch wirkende Makro-Flanken

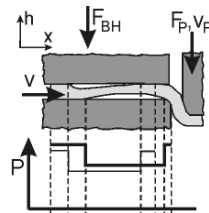


Bild 25

In Analogie zu den Mikro- und Makro-Schmirtaschen können auch Flanken lokale und makroskopische hydrodynamische Effekte bewirken. Makroskopische Flanken entstehen wie die makroskopischen Schmirtaschen bei entsprechender Werkzeuggeometrie und bei entsprechender Dickenänderung des Bleches. Auch im Streifenziehversuch mit ebenen Werkzeugen ist dieser Effekt zu berücksichtigen, wenn die Werkzeuge nicht ideal parallel, sondern leicht geneigt angeordnet sind [96]. Zur Berechnung kann der gleiche Ansatz wie bei den Mikro-Flanken verwendet werden (Gleichung 3, Bild 26).

Kleine Winkel, lange Keile und geringe Spalthöhen bewirken hohe Drücke. Bei Bauteilen, an denen das Blech unter dem Niederhalter in Ecken zur Matrize hin aufdickt, kann dieser Mechanismus einen erheblichen Teil der Niederhalterkraft tragen. Interessant ist zu beobachten, daß bei größeren Anstellwinkeln das Druckmaximum in Richtung Auslauf verschoben wird. Im Streifenziehversuch mit ebenen Werkzeugen führt die Verschiebung des Druckmaximums zu einem selbstausrichtenden Effekt, durch den kippende Werkzeuge wieder parallel ausgerichtet werden.

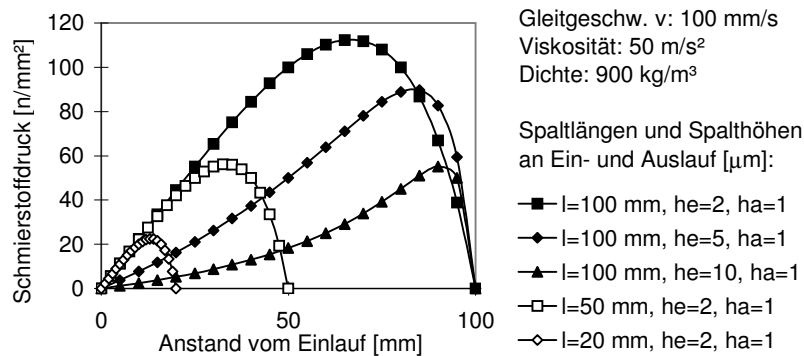


Bild 26: Berechnete Drücke im Schmierpalt von Makro-Schmieraschen unterschiedlicher Geometrie

5.2.7 Hydrodynamisch wirkende Makro-Stufen

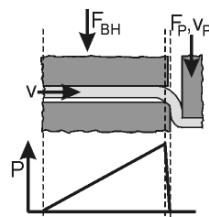


Bild 27

Die Analogien zwischen lokalen und makroskopischen Effekten führen zu der Überlegung, ob die hydrodynamischen Effekte einer Stufe auch makroskopisch wirken können. Liegt unter dem Niederhalter ein Bereich ohne Kontaktnormalspannung vor, z.B. weil in benachbarten Bereichen das Blech aufgedickt ist und den Niederhalter angehoben hat, dann verbleibt ein schmaler Spalt zwischen Blech und Werkzeug. Beim Einlauf in die Matrizenrundung wird der Spalt plötzlich verengt. Für die Abschätzung der Drücke in Bild 28 (Gleichung 4) wurde die Länge des Bleches unter dem Niederhalter mit 100 mm und die Länge, über der das Blech am Matrizenradius anliegt, mit 10 mm angenommen.

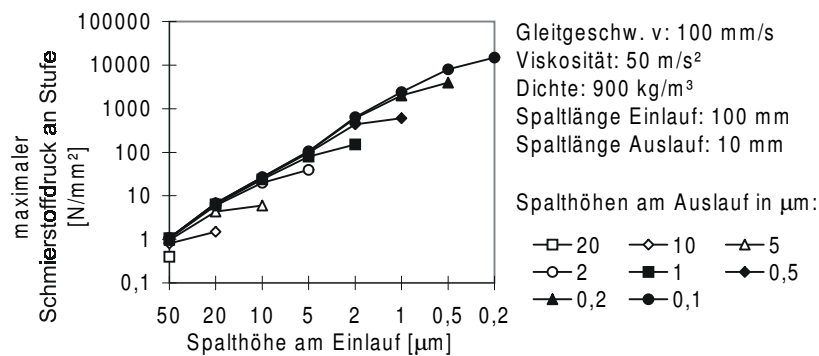


Bild 28: Berechnete Schmierstoffdrücke an Makro-Stufen

Wie bei den lokalen hydrodynamischen Effekten entstehen durch die makroskopische Stufe Drücke über die Fließgrenze des Bleches hinaus. Diese führen entweder zur großflächigen Deformation des Bleches, eher aber zum Anheben des Niederhalters und dazu, daß Schmierstoff in die Matrizenrundung gedrückt wird. Der Niederhalter hebt so weit ab, und die Dicke des Schmierfilms in der Matrizenrundung steigt so lange an, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Schmierstoffdruck und den Spalthöhen einstellt.

Das folgende Beispiel dient dazu die überraschend hohen Drücke kurz zu veranschaulichen. Es wird von einer reinen Couette-Strömung, das heißt einer laminaren Schichtenströmung im Schmierpalt ausgegangen. Sowohl an der Blech- als auch an der Werkzeugoberfläche haften die Schmierstoffmoleküle. Die Moleküle am Werkzeug bewegen sich nicht, die Moleküle am Blech werden mit der Geschwindigkeit des Bleches in Richtung Matrizenrundung gezogen. Durch die Scherung des Schmierstoffs bewegen sich die übrigen Schmierstoffmoleküle ebenfalls in Richtung Matrizenrundung. Am Platinenrand herrscht im Schmierstoff Umgebungsdruck. Je weiter man sich vom Platinenrand entfernt, desto mehr Schmierstoffmoleküle schieben vom Platinenrand her nach und desto höher wird der Druck. Je länger der Schmierfilm ist, desto höher wird der Druck und je dünner der Schmierfilm ist, desto stärker wird er geschert und desto weiter steigt der Druck. Bedenkt man, daß der Schmierfilm unter dem Niederhalter bei z.B. 5 μm Dicke und 100 mm Länge ein Verhältnis von Länge zu Dicke von 20.000:1 aufweist, dann wird deutlich, daß sehr hohe Drücke entstehen können.

5.3 Anforderungen an die Topografie

Um die hohen hydrostatischen Drücke in abgeschlossenen Schmiertaschen zu nutzen, muß die Topografie geschlossen und leer sein. Die Abgeschlossenheit ist erforderlich, damit die Schmiertaschen bereits bei geringer Einglättung abgeschlossen werden und die Topografie muß leer sein, um große Schmiertaschen zu erreichen. Für hydrodynamisch wirkende Mikro-Flanken und Mikro-Stufen sind große Kuppen mit niedrigen Flankenwinkeln günstig. Je größer und flacher die Kuppen sind, desto mehr Fläche steht zur Verfügung, auf der dünne Schmierfilme hohe hydrodynamische Drücke bewirken können. Für große flache Kuppen werden volle Topografien benötigt.

Leere Topografien begünstigen dagegen Makro-Quetschströmungen, da sie nach dem Aufsetzen des Niederhalters leichter einglätten als volle Topografien, wodurch mehr Schmierstoff verdrängt werden muß. Günstig wirkt sich zusätzlich aus, wenn die Topografie geschlossen ist, der Schmierstoff nicht durch tiefliegende Kanäle entweichen kann und wenn die Topografie fein ist, so daß viele kleine Spitzen das Entweichen des Schmierstoffs bremsen.

Für die Makro-Effekte sind Topografien mit hoher Dichtwirkung günstig. Geschlossene und feine Topografien verhindern, daß der Schmierstoff zu schnell seitlich entweichen kann, ohne hydrostatisch oder hydrodynamisch Druck aufzubauen.

Bei mehreren Mechanismen führen geschlossene und feine Topografien zu niedriger Reibung. In keinem Fall verbessern offene oder grobe Strukturen das tribologische Verhalten. Die Topografien sollten deshalb fein und geschlossen sein.

Die Anforderungen an die Leere der Topografie widersprechen sich. Zugunsten hydrostatisch wirkender Schmieraschen und makroskopischer Quetschströmungen sind leere Topografien anzustreben, da diese einen großen Leerflächenanteil aufweisen und leicht eingelätet werden können. Für hydrodynamisch wirkende Flanken, Stufen und Quetschströmungen sollte die Topografie voll sein, um bereits bei geringer Einglätung hohe Flächenanteile mit dünnen Schmierfilmen zu erreichen. Diese widersprüchlichen Anforderungen können die Ursache dafür sein, daß in der Literatur von einigen Autoren leicht einglätende Topografien [60, 89, 125, 130] und von anderen Topografien ohne Feinspitzenbereich [94, 186] als günstig beurteilt werden.

Einen Kompromiß könnte eine Topografie mit hohen und gleichzeitig leicht einglätenden Spitzen bei einem flachen Kernbereich darstellen. Der Materialanteil der Spitzen im oberen Bereich sollte so hoch sein, daß die Topografie durch das Aufsetzen des Niederhalters kaum einglätet. Im unteren Bereich (im Übergang zum Kernprofil) müssen die Spitzen einen geringen Materialanteil haben, damit die Topografie bei zusätzlichen Zugspannungen in Blechebene bis auf das Kernprofil einglätet. Ein flaches Kernprofil wirkt sich reibungssenkend aus, da es durch flache Winkel und Plateaus hydrodynamische Effekte unterstützen kann.

Eine aus tribologischer Sicht optimierte Topografie muß nach diesen Überlegungen die folgenden Eigenschaften aufweisen:

Anforderungen an die Leere:

1. Hohe Spitzen, um Drücke durch Quetschströmungen nutzen zu können
2. Schmale Spitzen mit niedrigen Materialanteilen, um der Topografie das Einglätten bis zum Kernprofil zu ermöglichen
3. Einen flachen Kernbereich, um flache Winkel und Stufen für hydrodynamische Effekte zur Verfügung zu stellen
4. Im unteren Bereich der Topografie sollte ein größeres Leervolumen vorhanden sein, aus dem auch bei stärkerer Einglätung eine "Schmierstoffreserve" in die Kontaktzone gedrückt werden kann.

Anforderungen an die Abgeschlossenheit:

5. Hohe Anteile abgeschlossener Leerflächen, um große Flächenanteile mit hydrostatisch wirkenden Schmieraschen zu erreichen
6. Topografie hoch abgeschlossen, um bereits bei geringer Einglätung hydrostatische Anteile nutzen zu können

Anforderungen an die Feinheit:

7. Feine Spitzen sind bei Quetschströmungen günstig, da sie das Herausfließen des Schmierstoffs mit vielen schmalen Kanälen stärker bremsen als grobe Topografien mit wenigen größeren Kanälen.
8. In einer feinen Topografie mit vielen Tälern sind mehr Stufen vorhanden als in einer groben Topografie mit wenigen Tälern. Die Oberfläche sollte, um hydrodynamische Effekte an Stufen nutzen zu können, eine hohe Anzahl von Tälern aufweisen.

Anforderungen an die Richtung:

9. Bei gerichteten Topografien können die tribologischen Eigenschaften von der Ziehrichtung abhängen. Ungerichtete Strukturen sind vorzuziehen, um in allen Gleitrichtungen gleiche tribologische Eigenschaften zu erreichen.

Anforderungen an die Gleichmäßigkeit:

10. Alle bisher zur Verfügung stehenden deterministischen (gleichmäßigen) Blechstrukturen sind gerichtet. Wenn die Anforderungen an Abgeschlossenheit, Leere und Feinheit von deterministischen und stochastischen Strukturen in gleicher Weise erfüllt werden können, dann sollten stochastische Strukturen vorgezogen werden, um in allen Raumrichtungen gleiche tribologische Eigenschaften zu erreichen.

Aus Sicht der Blechherstellung sind zwei Anforderungen besonders schwierig zu erfüllen.

- Hohe Spitzen sind mit den bekannten Fertigungsverfahren im allgemeinen nur bei gleichzeitig relativ hohen Materialanteilen der Spitzen zu realisieren.
- Hohe Spitzen und gleichzeitig hohe Abgeschlossenheit sind nur dann möglich, wenn die Spitzen nicht isoliert stehen, sondern durch hohe "Grate" miteinander verbunden sind. Diese Grate lassen sich mit den zur Zeit zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren nicht herstellen.

5.4 Anforderungen an tribologische Prüfmethoden

Aus der Untersuchung der Wirkmechanismen der Topografie (Kapitel 5) lassen sich die im Stand der Erkenntnisse beschriebenen Anforderungen an die tribologische Prüfung im Modellversuchen ergänzen:

1. Die Mechanismen beeinflussen Haft- und Gleitreibung in unterschiedlicher Weise. Für das Umformergebnis sind sowohl die Haft- als auch die Gleitreibung zu berücksichtigen. Die Prüfmethode sollte es deshalb ermöglichen, Haft- und Gleitreibung unabhängig voneinander zu beurteilen.
2. Um die Wirkung der Spitzen auf die Quetschströmung zu beurteilen, werden ausreichend große Werkzeuge benötigt, da sonst der Schmierstoff im Vergleich zum Realwerkzeug zu schnell aus der Kontaktzone entweicht.
3. Um die Auswirkungen hydrodynamischer Effekte beurteilen zu können, sollte die Prüfmethode die Variation der Gleitgeschwindigkeit ermöglichen.
4. Die Zeit zwischen dem Aufsetzen des Niederhalters und dem Ziehbeginn muß man realitätsnah abbilden, da sie die gemessene Haftreibung entscheidend beeinflusst.
5. Das Blech sollte während der Reibungskraftmessung umgeformt werden, um die dadurch erhöhte Einglättung des Bleches zu berücksichtigen.

5.5 Anforderungen an Oberflächenkenngrößen

1. Es können mehrere tribologische Mechanismen parallel wirken und sich über nichtlineare Wechselwirkungen gegenseitig beeinflussen. Das tribologische Verhalten wird von verschiedenen Eigenschaften der Topografie gleichzeitig bestimmt. Zur funktionsorientierten Beschreibung sind deshalb mehrere Oberflächenkenngrößen notwendig.
2. Für die Funktion besonders relevante Eigenschaften der Topografie sind Abgeschlossenheit, Leere und Feinheit. Funktionsorientierte Oberflächenkenngrößen sollten diese Eigenschaften quantifizieren können.
3. Wenn die oberen Bereiche der Topografie leicht einglätten und danach Plateaus für hydrodynamische Effekte vorhanden sein sollen, dann muß die Leere der Topografie als Funktion der Durchdringung beschrieben werden. Eine einzelne Kenngröße reicht zur Beschreibung der Leere nicht aus. Es werden Kenngrößen benötigt, mit denen
 - die Höhe der Spitzen
 - die Breite (der Materialanteil) der Spitzen
 - die Anteile von plateauförmigen Flächen und
 - die im Profil enthaltene "Schmierstoffreserve"

beurteilt werden können.

6 Auswahl der Prüfmethode für die Beurteilung tribologischer Eigenschaften

Niedrige Reibung erhöht im allgemeinen die Verfahrensgrenzen, da sie die durch das Blech zu übertragenden Kräfte senkt. Geringere Kräfte führen dazu, daß das Blech nicht so schnell durch Reißen oder Einschnürungen versagt. Je nach Werkzeuggeometrie kann es erforderlich sein, den Materialfluß an einigen Stellen durch hohe Reibung zu bremsen, um Faltenbildung zu verhindern. Für diesen Zweck muß jedoch nicht die Topografie hohe Reibung erzeugen, es können Ziehsicken angebracht oder die Niederhalterkräfte erhöht werden. Eine Topografie mit niedriger Reibung ist deshalb günstiger zu bewerten als eine, die zu hoher Reibung führt. Bezüglich der Reibung ist zwischen Haft- und Gleitreibung zu unterscheiden. Zu hohe Haftreibung kann bewirken, daß das Blech an einigen Stellen im Werkzeug nicht oder zu spät gleitet, stark gedehnt wird und reißt. Zu hohe Gleitreibung kann den Materialfluß ebenfalls so stark bremsen, daß das Blech reißt. Das Niveau der Haft- und Gleitreibung wird im folgenden zur Beurteilung der Güte einer Topografie genutzt. Welche Kenngrößen der Haft- und Gleitreibung zur Beurteilung der Topografie geeignet ist, wird untersucht.

Im Stand der Erkenntnisse wurde beschrieben, daß das Auftreten von Stick-Slip-Effekten ein zusätzliches Kriterium zur Beurteilung der tribologischen Eigenschaften sein kann. Deshalb wird im folgenden überprüft, welche Zusammenhänge von Haft- und Gleitreibung zum Auftreten von Stick-Slip-Effekten bestehen.

Es wird eine Prüfmethode benötigt, die den Einfluß der Topografie auf das Niveau von Haft- und Gleitreibung sowie das Auftreten von Stick-Slip-Effekten quantifiziert.

6.1 Auswahl des Prüfprinzips und der Meßgrößen

In diesem Kapitel wird ein Prüfprinzip ausgewählt, das die meßtechnische Erfassung der Haft- und Gleitreibung sowie von Stick-Slip-Effekten unter dem Realprozeß entsprechenden Bedingungen ermöglicht.

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten Prinzipien der Kategorien I bis III erlauben es nicht, einzelne Mechanismen der Topografie unabhängig voneinander zu beurteilen. Die Prinzipien der Kategorie VI bieten keine auf den Realprozeß übertragbaren Ergebnisse.

Modellversuche der Kategorie IV an Bauteilen wie rotationssymmetrischen Näpfen sind zur Untersuchung von Topografien aus zwei Gründen kritisch.

- Die meßbaren Kräfte oder Ziehtiefen werden sowohl durch Anteile aus der Reibung als auch durch Anteile aus der Umformung des Bleches beeinflusst. Werden verschiedene Bleche mit unterschiedlichen Dressiergraden untersucht, dann ist nicht zu erkennen, ob die Unterschiede in den Meßdaten aus geänderten tribologischen Bedingungen oder geänderten Festigkeitswerten resultieren.

- Je nach Stelle im Werkzeug wird hohe oder niedrige Reibung benötigt. Unter dem Niederhalter eines rotationssymmetrischen Napfes soll die Reibung niedrig sein, damit das Blech ungehindert in die Umformzone einfließen kann. Am Stempelboden wirkt sich hohe Reibung günstig aus, da sie die Krafteinleitung vom Stempel in das Blech verbessert. Treten im Napfziehversuch Reißer auf, dann kann entweder die Reibung unter dem Niederhalter zu hoch oder am Stempelboden zu niedrig gewesen sein. Modellversuche an Bauteilen sollten nur dann eingesetzt werden, wenn bekannt ist, daß das Bauteil entweder nur infolge zu hoher oder nur infolge zu niedriger Reibung reißt. Versagt es je nach Versuchsbedingungen im einen Fall wegen zu hoher und im anderen Fall wegen zu niedriger Reibung, dann sind die Ergebnisse nicht auf andere Bauteile übertragbar [191]. Die Unterscheidung tribologischer Mechanismen ist damit nicht möglich.

Streifenziehversuche der Kategorie V ermöglichen es, die Reibung für unterschiedliche Beanspruchungsbedingungen zu ermitteln. Die Wirkung tribologischer Mechanismen läßt sich in Streifenziehversuchen deshalb besser untersuchen als an komplexen Realteilen. Die Ergebnisse sind auf verschiedene Bauteile übertragbar, wenn bekannt ist, ob das Bauteil, für das eine Topografie ausgewählt werden soll, durch zu hohe oder zu niedrige Reibung versagt.

Innerhalb der Kategorie V stehen Streifenziehversuche verschiedener Prinzipien zur Verfügung, deren Vor- und Nachteile umstritten sind. Im folgenden Kapitel werden deshalb die Ergebnisse der drei am weitesten verbreiteten Prinzipien miteinander verglichen. Anschließend wird in Kapitel 6.1.2 untersucht, inwieweit sich die Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen auf das Ziehen von komplexeren Bauteilen übertragen lassen.

6.1.1 Voruntersuchungen mit Streifenziehversuchen

Derzeit steht eine große Zahl von Streifenziehanlagen zur Beurteilung von tribologischen Systemen der Blechumformung zur Verfügung. Die Ergebnisse der einzelnen Prüfstände sind häufig nicht miteinander zu vergleichen, da unterschiedliche Prinzipien und unterschiedliche Ausführungen eingesetzt werden (Kapitel 2.2.2). Die meisten Anlagen beruhen auf den drei in Bild 29 dargestellten Prinzipien.

Diese Prinzipien bilden unterschiedliche Ausschnitte aus dem Realwerkzeug ab. Es gilt zunächst die Frage zu klären, ob sich die Reibung in diesen Bereichen grundlegend unterscheidet, oder ob ein Prinzip zur Beurteilung der Reibung in allen Bereichen eingesetzt werden kann. Wenn sich die Ergebnisse deutlich unterscheiden, dann ist zu klären, ob ein Bereich dominiert oder ob alle Bereiche zur Beurteilung des Umformergebnisses berücksichtigt und je nach Bauteil gewichtet werden müssen.

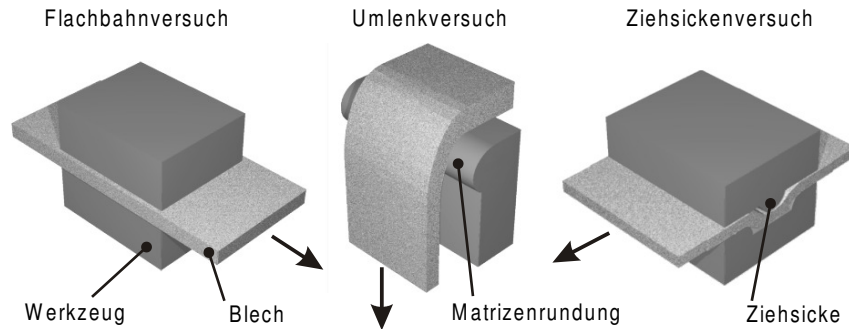


Bild 29: Variationsmöglichkeiten des Streifenziehversuchs

Um diese Zusammenhänge zu untersuchen, wurden am Institut des Autors alle drei Prinzipien auf einer Anlage unter identischen Bedingungen verglichen. Vier Bleche unterschiedlicher Topografie wurden ausgewählt und mit diesen Prinzipien beurteilt.

Als Meßgrößen dienen die maximale Kontaktnormalspannung / Rückhaltespannung und die Gleitreibungszahl. Die Möglichkeiten, die Gleitreibungszahl zu bestimmen und auszuwerten sind in der Literatur ausführlich beschrieben [66, 85, 86, 96]. Die maximale Kontaktnormalspannung / Rückhaltespannung wird im folgenden kurz erläutert.

Erläuterungen zur maximalen Kontaktnormalspannung

Im Flachbahnversuch erhöht man die Kontaktnormalspannung schrittweise. Bei jeder Stufe können verschiedene Gleitgeschwindigkeiten eingestellt werden, um die Reibungszahlen unter verschiedenen Beanspruchungsbedingungen zu messen. Die maximale Kontaktnormalspannung ist erreicht, wenn das Blech die Haftreibung nicht mehr überwinden kann und reißt.

Schon bei deutlich geringeren Kontaktnormalspannungen als der maximalen wird das Blech plastisch gedehnt. Das Fließen beginnt im gesamten Bereich zwischen den Werkzeugen und dem Teil der Anlage, in dem die Zugkraft aufgebracht wird. Durch die Dehnung verfestigt das Blech, und die Zugkraft steigt. Im Bereich der Gleichmaßdehnung wird die Blechbreite dabei kontinuierlich verringert. Mit steigender Zugkraft beginnt das Blech am Auslauf aus den Werkzeugen zu gleiten. Am Einlauf haftet das Blech noch, so daß es unter den Werkzeugen gedehnt wird. Die Fließecke wandert mit steigender Zugkraft vom Auslauf zum Einlauf (Bild 30).

Wie im Stand der Erkenntnisse (Kapitel 2) beschrieben, glättet das Blech unter dieser Beanspruchung durch Kontaktnormalspannung bei gleichzeitiger Dehnung des Grundwerkstoffs deutlich ein. Ist auf dem Blech eine Topografie vorhanden, die bei deutlicher Einglättung eine niedrige Reibung aufweist, dann kann die Reibungskraft vom Blech noch übertragen werden, und das Blech beginnt zu gleiten. Bei einer Topografie, die im eingeglätteten Zustand zu hoher Reibung führt, reißt das Blech.

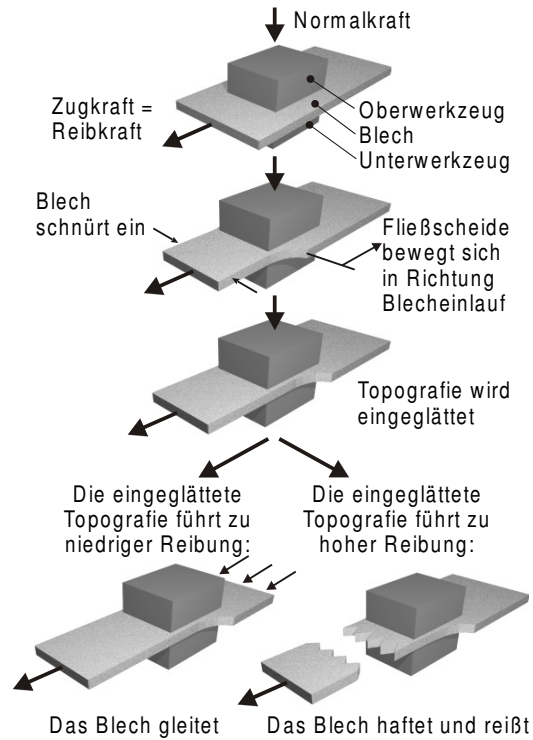


Bild 30: Dehnung des Bleches bei Erreichen der maximalen Kontaktnormalspannung im Streifenziehversuch in der

Die maximal erreichbare Kontaktnormalspannung ist damit ein Maß für die Reibung der bei Dehnung des Grundwerkstoffs eingeglätteten Topografie.

In realen Werkzeugen läuft vor der Entstehung von Einschnürungen oder Reißen ein vergleichbarer Prozeß ab. An einer hoch beanspruchten Stelle des Werkzeugs wird das Blech durch Kontaktnormalspannung beansprucht und gedehnt. Die Topografie glättet ein, und wenn die Reibung der eingeglätteten Topografie zu hoch ist, reißt das Bauteil.

Die Gleitreibung bei niedrigeren Kontaktnormalspannungen kann zwar ebenfalls den Materialfluß beeinflussen, zur Beurteilung des Versagens des Bauteils ist nach dieser Überlegung aber die maximale Kontaktnormalspannung geeigneter.

Mit Streifenziehversuchen, bei denen das Blech mit einer Seite auf einer festen Unterlage aufliegt, kann die Dehnung des Bleches nicht berücksichtigt werden. Der häufig angegebene Vorteil, daß auf Anlagen mit einseitigem Werkzeugkontakt auch einseitig beschichtete Bleche untersucht werden können, ist nur dann vorhanden, wenn bei Anlagen mit beidseitigem Werkzeugkontakt nicht beide Werkzeuge mit Reibungskraftsensoren versehen sind.

Werden mit dieser Methode verschiedene Bleche verglichen, dann ist zu berücksichtigen, daß sowohl die Blechdicke als auch die Zugfestigkeit des Materials die maximale Kontaktnormalspannung beeinflussen. Ein dickeres Blech mit höherer Festigkeit führt bei gleichen tribologischen Eigenschaften zu einer höheren maximalen Kontaktnormalspannung. In einer Versuchsreihe dürfen deshalb nur Bleche vergleichbarer Dicke und Zugfestigkeit beurteilt werden.

Im Umlenk- und Ziehsickenversuch wird die Kontaktnormalspannung zwischen Blech und Werkzeug über die Rückhaltespannung im Blech eingestellt. Höhere Rückhalte-

spannungen führen zu höheren Kontaktnormalspannungen über den Radien. Von einer bestimmten Rückhaltespannung an wird die Reibung so groß, daß das Blech die Rückhaltekraft und dazu die Reibung in den Radien nicht mehr übertragen kann und reißt. Je höher die erreichbare Rückhaltespannung liegt, desto niedriger ist die Reibung der in den Radien eingeglätteten Topografie.

Die Versuchsbedingungen der Voruntersuchungen mit den drei Varianten des Streifenziehversuchs sind in Tabelle 31 im Anhang aufgeführt. Bild 31 enthält die auf das EDT-Blech bezogenen maximalen Spannungen.

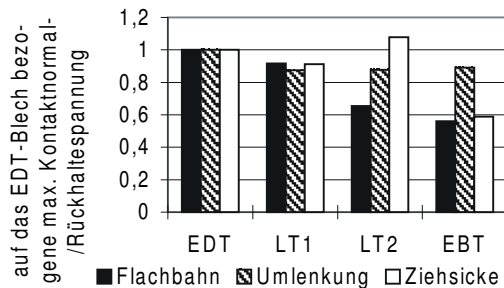


Bild 31: Vergleich von Streifenziehversuchen bei der Beurteilung von Blechen unterschiedlicher Topografie

Für den Flachbahnversuch werden von links nach rechts geringere Kontaktnormalspannungen erreicht. Links sind die Topografien demnach als günstiger zu beurteilen. Im Umlenkversuch sind die Bleche kaum zu unterscheiden. Der Grund für die geringe Differenzierung im Umlenkversuch ist in der kleinen Werkzeugfläche zu vermuten. Das Blech hat zwar eine Breite von 100 mm, in Zugrichtung liegt es aber nur

über ca. 8 mm auf dem Radius der Umlenkwerkzeugs an. Dadurch sind die Reibkräfte im Verhältnis zu den Umformkräften gering, und Ungenauigkeiten in der Messung wirken sich stark aus.

Im Ziehsickenversuch liegt das Blech über eine längere Strecke am Werkzeug an als im Umlenkversuch, was zu einer deutlicheren Differenzierung führt. Die Reihenfolge der Bleche entspricht bis auf Blech LT2 dem Ergebnis aus dem Flachbahnversuch. Eine Erklärung für die günstigere Reibung von Blech LT2 in der Ziehsicke kann in den großen Spitzen der Topografie liegen. Durch die moderaten Kontaktnormalspannungen im Flachbahnversuch glätten diese Spitzen nicht weit genug ein, um die Reibung durch hydrostatisch wirkende Schmiertaschen und Quetschströmung zu senken. Unter den höheren Kontaktnormalspannungen im Ziehsickenversuch ist die Einglättung stärker, die reibungssenkenden Mechanismen können wirken, und die Haftreibung sinkt.

Zur Beurteilung der Gleitreibung, wurden die Reibungszahlen berechnet (Bild 32). In den bei Umlenk- und Ziehsickenversuch gemessenen Kräften sind sowohl Anteile aus der Reibung als auch aus der Biegung des Bleches enthalten. Um die Anteile zu trennen, wurden beide Versuche sowohl mit feststehenden Werkzeugen als auch mit nahezu reibungsfreier Umlenkung über Walzen durchgeführt. Die Differenz der Zugkraft von reibungsbehaftetem und reibungsfreiem Versuch entspricht der Reibungskraft. Zur Berechnung der Reibungszahl diente die Eytelweinsche Gleichung [66].

Es ist bekannt, daß diese Gleichung die lokalen Kontaktverhältnisse über dem Radius nicht realistisch abbildet [86, 69, 77]. Sie stellt aber die einzige Möglichkeit dar, zumindest eine mittlere Reibungszahl über dem Radius zu bestimmen.

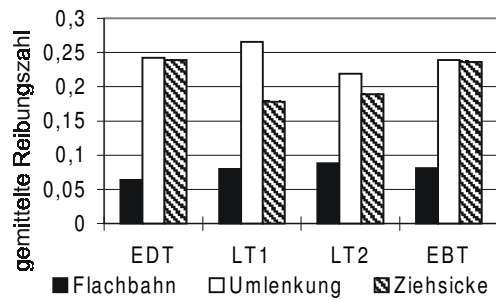


Bild 32: Vergleich der Reibungszahlen in unterschiedlichen Streifenziehversuchen

Die Gleitreibungszahl ist bei Umlenk- und Ziehsickenversuch deutlich höher als im Flachbahnversuch. Im allgemeinen sind die Kontaktnormalspannungen im Umlenkversuch höher als in der Flachbahn. Höhere Kontaktnormalspannungen führen aber meist zu niedrigeren Reibungszahlen [96, 117]. Eine mögliche Erklärung ist, daß die Topografie durch die Biegespannungen im Blechwerkstoff deutlich stärker

eingelätet, was zu einer größeren wahren Kontaktfläche und damit zu einer erhöhten Reibungszahl führt. Das Niveau der Gleitreibung liefert bei den unterschiedlichen Prinzipien keine vergleichbare Rangfolge.

Folgerungen

- Der Umlenkversuch führt zu keiner eindeutigen Differenzierung und wird nicht ausgewählt.
- Zur Beurteilung der Reibung eines gedehnten und deutlich eingeläteten Bleches können Flachbahn- und Ziehsickenversuche genutzt werden. Das Ergebnis in Bild 32 läßt erwarten, daß die Ergebnisse für die meisten Topografien übereinstimmen. Falls dies wie bei Blech LT2 nicht zutrifft, ist die Haftreibung im Niederhalterbereich für das Umformergebnis stärker zu gewichten, da die Haftreibung in der Ziehsicke über die Sickengeometrie den Erfordernissen angepaßt werden kann. Zur Beurteilung der Haftreibung wird deshalb der Bereich unter dem Niederhalter gewählt und durch den Streifenziehversuch in der Flachbahn abgebildet.
- Da das Niveau der Gleitreibung keine vergleichbare Rangfolge liefert, sollten zur Beurteilung der Gleitreibung Niederhalterbereich, Matrizenrundung und Ziehsicke getrennt untersucht werden. Je nach Bauteilgeometrie tragen die einzelnen Bereiche mit unterschiedlichen Anteilen zur Gesamtreibung bei. Bei vielen Bauteilen liegt das Blech, wie auch die Simulationsergebnisse des Pedaltopfs in einer früheren Untersuchung [77] bestätigen, nur über eine kurze Strecke über dem Radius an. Der Anteil der Reibung in der Matrizenrundung ist im Vergleich zur Gesamtreibung im Bauteil relativ gering. Das Niveau der Reibung in der Ziehsicke kann über die Sickengeometrie eingestellt werden. Zur Beurteilung der Gleitreibung wird deshalb der Bereich unter dem Niederhalter gewählt und mit dem Streifenziehversuch in der Flachbahn abgebildet.

Die Vor- und Nachteile der Prinzipien für die Beurteilung der tribologischen Eigenschaften von Blech-Topografien sind in Tabelle 16 zusammenfassend gegenübergestellt.

Flachbahn	Umlenkung	Ziehsicke
Pro		
Bildet den Niederhalterbereich ab, der bei den meisten Bauteilen den größten Anteil der Gesamtreibung ausmacht	Bildet den hoch beanspruchten Matrizenbereich mit hohen Reibungszahlen ab	Bildet den hoch beanspruchten Ziehsickenbereich mit hohen Reibungszahlen ab
Berücksichtigt (bei beidseitigem Werkzeugkontakt) die Plastifizierung des Grundwerkstoffs bei Haftreibung	Berücksichtigt die Plastifizierung des Grundwerkstoffs bei Haft- und Gleitreibung	Berücksichtigt die Plastifizierung des Grundwerkstoffs bei Haft- und Gleitreibung
Kontra		
Bei geringen Reibkräften wird der Einfluß der Plastifizierung des Grundwerkstoffs auf die Reibung nicht berücksichtigt	Die Reibung in der Matrizenrundung macht in den meisten Bauteilen einen kleineren Anteil an der Gesamtreibung aus als die Reibung unter dem Niederhalter	Die Reibung in der Ziehsicke muß nicht über die Topografie beeinflußt werden, da sich die Sickengeometrie leicht den Anforderungen anpassen läßt
	liefert schlecht differenzierbare Ergebnisse	
	Doppelter Aufwand im Vergleich zur Flachbahn	
	Zu kleine Kontaktfläche für Makro-Mechanismen	

Tabelle 16: Pro und Kontra verschiedener Varianten des Streifenziehversuchs

6.1.2 Voruntersuchungen an einem Realteil und einem rotationssymmetrischen Napf

Im vorherigen Kapitel wurde der Streifenziehversuch in der Flachbahn zur Beurteilung der tribologischen Eigenschaften von Blechtopografien ausgewählt. Es wird nun überprüft, ob sich die Ergebnisse des Streifenziehversuchs auf das Ziehergebnis eines rotationssymmetrischen Napfes und eines in einer früheren Arbeit des Autors [77] untersuchten realen Ziehteils (Pedaltopf) übertragen lassen.

Diese Bauteile wurden gewählt, da aufgrund vorangegangener Untersuchungen bekannt war, daß sie durch zu hohe Reibung unter dem Niederhalter versagen. Stimmen die Ergebnisse mit dem Streifenziehversuch überein, dann wird davon ausgegangen, daß der Streifenziehversuch die tribologischen Bedingungen in den für das Bauteilversagen entscheidenden Bereichen korrekt abbildet und daß die im Streifenziehversuch gemessenen tribologischen Mechanismen auch in den Realteilen wir-

ken. Korrelieren die Ergebnisse des Streifenziehversuchs mit denen von Napf und Pedaltopf, dann kann man schließen, daß der vom Streifenziehversuch in der Flachbahn abgebildete Bereich unter dem Niederhalter für die Beurteilung des gesamten Ziehteils genutzt werden kann.

Wie im Kapitel 2 (Stand der Erkenntnisse) beschrieben, lassen sich die Topografien mit Prüfmethoden der Kategorien I bis IV nicht unabhängig von den mechanischen Eigenschaften des Blechwerkstoffs beurteilen. Für die Versuche mit Napf und Pedaltopf wurden deshalb nicht mehrere Blechwerkstoffe, sondern unterschiedliche Schmierstoffe auf dem gleichen Blechwerkstoff untersucht.

Für die Versuche mit dem rotationssymmetrischen Napf wurde ein relativ großer Stempeldurchmesser von 300 mm gewählt, um stabile Ergebnisse durch ein möglichst großes Verhältnis von Reibungskraft zur Umformkraft zu erreichen [192]. Die Versuchsbedingungen sind in Tabelle 32 im Anhang angegeben.

Aus den Ergebnissen der Pedaltopf-Versuche wurde ein Arbeitsdiagramm erstellt, in dem für unterschiedliche Platinengrößen die Flächenpressungen unter dem Niederhalter aufgetragen sind, ab denen entweder Falten oder Reißen auftraten (Bild 33).

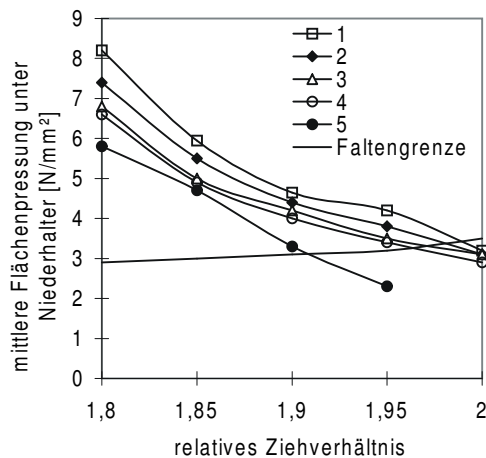


Bild 33: Arbeitsdiagramm des Pedaltopfs bei Variation des Schmierstoffs

Die Schmierstoffe sind nach ihrer Viskosität numeriert. Schmierstoff 1 hat die höchste und Schmierstoff 5 die niedrigste Viskosität. Je höher die Viskosität, desto höhere Flächenpressungen können ohne Reißen des Bleches aufgebracht werden.

Die Faltengrenze ist weitgehend unabhängig vom Schmierstoff. Unterhalb einer Flächenpressung von ca. 3 N/mm² traten mit allen Schmierstoffen und für alle Ziehverhältnisse Falten auf.

Mit jedem Schmierstoff wurde ein rotationssymmetrischer

Napf hergestellt und die Ziehtiefe bis zum Auftreten des ersten Reißers gemessen. Je tiefer der Napf ohne Reißen gezogen werden kann, desto günstiger ist das tribologische System zu beurteilen. Die eingestellte mittlere Flächenpressung unter dem Niederhalter betrug 4 N/mm².

In Bild 34 sind die Ergebnisse von Napf und Pedaltopf denen der Streifenziehversuche in der Flachbahn gegenübergestellt. Alle Daten wurden auf das Ergebnis des

Schmierstoffs 1 bezogen. Die Reibungszahl aus dem Streifenziehversuch in der Flachbahn sollte für eine günstige Bewertung möglichst niedrig sein, die übrigen Größen möglichst hoch. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, wurde in Bild 34 der Kehrwert der Reibungszahl dargestellt. Ein Schmierstoff ist demnach bei hohen Werten günstig zu beurteilen.

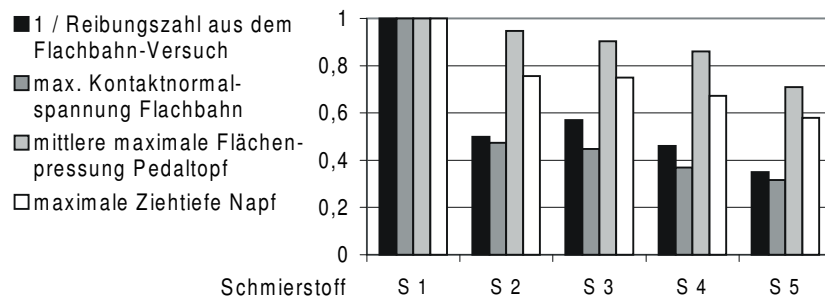


Bild 34: Vergleich der Ergebnisse von Streifenziehversuchen in der Flachbahn mit den Ergebnissen komplexerer Bauteile

Für die maximale Kontaktnormalspannung im Flachbahnversuch ergibt sich die gleiche Rangfolge der Schmierstoffe wie für den Napf und den Pedaltopf. Die Rangfolge der Reibungszahl weicht bei Schmierstoff 2 etwas ab. Nimmt man die Ergebnisse von Napf und Pedaltopf als Referenz, dann lassen sich Korrelationskoeffizienten der Ergebnisse des Flachbahnversuchs zu dieser Referenz berechnen. Das Bestimmtheitsmaß der Reibungszahl beträgt 0,89 und das der maximalen Kontaktnormalspannung 0,97. Beide Kenngrößen aus dem Flachbahnversuch korrelieren gut mit den Versuchsergebnissen des Napfes und des Pedaltopfs. Im Zweifelsfall sollte die maximale Kontaktnormalspannung der Reibungszahl vorgezogen werden, da diese etwas deutlicher mit dem Auftreten von Reißen in den untersuchten Bauteilen übereinstimmt.

Die Untersuchung zeigt, daß die Rangfolge der Schmierstoffe im Streifenziehversuch in der Flachbahn auf komplexere Bauteile übertragen werden kann. Im folgenden wird deshalb vorausgesetzt, daß der Streifenziehversuch die für das Bauteilversagen wesentlichen tribologischen Mechanismen abbildet.

6.2 Auswahl der Ausführung der Anlage

Größe und Lagerung der Werkzeuge

Zur Beurteilung der Topografien wird im Rahmen dieser Arbeit die am Institut des Autors vorhandene Reibversuchsanlage gewählt. Als Vorteil erweist sich bei dieser Anlage neben dem Prinzip vor allem die Größe der Werkzeuge. Die maximale Werkzeuglänge beträgt 144 mm, die Breite 74 mm. Wenn die Wirkung der Quetschströmung beurteilt werden soll, dann sind, wie im Bereich unter dem Niederhalter eines

Realwerkzeugs, größere Flächen erforderlich (Bilder 21 und 23). Zur Beurteilung der Topografien wird deshalb die volle Werkzeuggröße genutzt. Bei der Werkzeuggröße von $144 \times 74 \text{ mm}^2$ werden je nach Schmierstoff, Topografie und Geschwindigkeit maximale Kontaktnormalspannungen bis ca. 20 N/mm^2 erreicht. Diese Werte liegen, wie auch die FE-Simulation des Pedaltopfs zeigt [77], deutlich unter den maximalen Flächenpressungen in realen Werkzeugen. Bei Verwendung kürzerer Werkzeuge lassen sich im Streifenziehversuch auch die hohen Werte der lokalen Kontaktnormalspannungen abbilden. Die Ergebnisse in Kapitel 6.1 zeigen aber, daß nicht die kleinen Bereiche mit den hohen Kontaktnormalspannungen in der Matrizenrundung (Umlenkversuch), sondern die größeren Flächen im Niederhalterbereich mit den moderaten Kontaktnormalspannungen (Flachbahnversuch) den entscheidenden Beitrag zur Reibung liefern.

Die Werkzeuge sind horizontal in Linearlagern geführt und stützen sich auf Wägen ab. Das Verkippen der Werkzeuge wird durch die steife Lagerung und das Abstützen der Reibungskraft in Blechebene verhindert. Infolge der Länge der Werkzeuge von 144 mm wirken die in Kapitel 5.2.6 beschriebenen selbstausrichtenden Effekte.

Reinigung des Bleches

Das Blechmaterial wird direkt vom Coil verarbeitet. Durch die kontinuierliche Betriebsweise ist es möglich, eine hohe Versuchszahl mit entsprechender statistischer Absicherung durchzuführen. Das Blechmaterial ist üblicherweise mit einem im Walzwerk aufgetragenen Korrosionsschutzöl versehen. In der kombinierten Reinigungs- und Beölungsanlage wird zunächst das Korrosionsschutzöl entfernt. Dazu wurde eine modulare Reinigungs- und Beölungsanlage entwickelt, die es durch unterschiedliche Modulauswahl und -anordnung ermöglicht, unterschiedliche Reinigungsverfahren einzusetzen. Ausgehend von bereits veröffentlichten Ergebnissen des Autors [77] wird für die Untersuchung der Topografien die Hochdruckreinigung mit niedrigviskosem Öl gewählt. Anschließend trocknen zusätzliche Module das Blech mit zwei Abquetschwalzenpaaren, einer Rakel und einem Druckluftvorhang.

Beölung des Bleches

Für die Beölung wird ein Modul verwendet, das den Schmierstoff über Kalandrierwalzen auf das Blech überträgt. Bei diesem Verfahren ist die Schmierstoffmenge über den pneumatisch einstellbaren Anpreßdruck der Walzen regulierbar.

Um die richtige Applikationstemperatur des Schmierstoffs sicherzustellen und Ablagerungen am Behälterboden zu vermeiden, wird der Schmierstoff ständig umgewälzt und auf einer konstanten Temperatur von ca. 38°C gehalten.

Die Reinigungs- und Beölungsanlage fördert das Blechmaterial mit konstanter Geschwindigkeit, um einen homogenen Schmierfilm sicherzustellen. Die lichtschrankenüberwachte Schlaufengrube dient als Blechspeicher.

6.3 Auswahl der Beanspruchungsbedingungen

In den Modellversuchen sollen Gleitreibungszahl, maximale Kontaktnormalspannung und Stick-Slip-Beginn erfaßt werden. Um die tribologischen Mechanismen im Modellversuch korrekt abzubilden, sind dem Realprozeß entsprechende Beanspruchungsbedingungen einzustellen.

Kontaktnormalspannung

Zur Bestimmung der maximalen Kontaktnormalspannung wird die Niederhalterkraft in den Streifenziehversuchen schrittweise bis zum Versagen des Bleches erhöht. Je kleiner die Schritte sind, desto genauer ist die maximale Kontaktnormalspannung bestimmbar. Versuche auf der verwendeten Anlage zeigen eine Wiederholgenauigkeit der maximalen Kontaktnormalspannung von ca. 1 N/mm². Bei der Durchführung der Versuche wird die Kontaktnormalspannung deshalb in Schritten von 1 N/mm² erhöht. Mit jeder Kontaktnormalspannung werden 3 Versuche durchgeführt. Erst wenn das Blech in allen drei Versuchen haftet, gilt die maximale Kontaktnormalspannung als erreicht.

Gleitgeschwindigkeit

Um die Wirkung hydrodynamischer Effekte beurteilen zu können, wird die Gleitgeschwindigkeit variiert. Je schneller man das Blech zwischen den Werkzeugen hindurchzieht, desto stärker können hydrodynamische Effekte auf die Gleitreibung wirken. Auch auf die Haftreibung wirkt sich die Geschwindigkeit aus. Je schneller das Blech angezogen wird, desto schneller glätten die Spitzen der Topografie ein, und desto höher werden die Drücke infolge der Quetschströmung. Die gewählten Gleitgeschwindigkeiten betragen 25, 50, 100, 200 und 400 mm/s. Die Geschwindigkeit von 100 mm/s gilt als ein typischer Wert für Tiefziehteile. Mit 25 und 400 mm/s wurden extreme Werte eingestellt, um die hydrodynamischen Effekte deutlich aufzeigen zu können.

Temperatur von Werkzeug und Blech

Da sich die Werkzeuge im Realprozeß aufgrund der hohen Hubzahlen auf etwa 40 bis 60 °C erwärmen, werden die Werkzeuge der Reibversuchsanlage beheizt. Hierzu dient ein Aggregat, das ein temperiertes Öl durch die Aufnahme der Werkzeuge fördert und deren Temperatur auf 40 °C hält. Die Isttemperatur mißt ein Sensor direkt im Werkzeug. Das Blech wird mit Raumtemperatur zugeführt.

Beanspruchungsverlauf

Der Versuchsablauf ist automatisiert. Nach Betätigen der Starttaste senkt sich das Oberwerkzeug ab und bringt die eingestellte Kontaktnormalspannung auf das Blech auf. Nach einer Verweilzeit von 500 ms wird das Blech mit der in der CNC-Steuerung eingestellten Geschwindigkeit zwischen den Werkzeugen hindurchgezogen. Anschließend hebt das Oberwerkzeug wieder ab, um für den nächsten Versuch frisch beöltes Blech einzuziehen zu können.

6.4 Auswahl der Meßgrößen und der Auswertungsweise

Die Niederhalterkraft wird über den Druck im Hydraulikzylinder gemessen, die Reibungskraft am Oberwerkzeug über zwei rechts und links vom Blech liegende Wägezellen. Für die Reibungskraft am Unterwerkzeug ist eine dritte Wägezelle vorhanden. Zwei Weggeber messen die Geschwindigkeiten des Bleches an Einlauf und Auslauf. Über die Differenz der beiden Geschwindigkeiten kann man die Dehnung des Bleches während des Versuchs beurteilen.

Die Meßdatenerfassung erfolgt über einen PC. Die Signale der einzelnen Sensoren werden über einen Meßverstärker und eine AD-Wandlerkarte in den PC übertragen. Startet auf der Anlage ein Versuch, dann beginnt der PC automatisch mit der Messung und beendet sie nach Versuchsende.

Die Reibungszahlen müssen eindeutig einer Beanspruchung zugeordnet werden können. Zur Auswertung ist deshalb ein Bereich auszuwählen, in dem die Parameter weitgehend konstant verlaufen. Alle Versuche werden nacheinander auf dem Bildschirm angezeigt. Die Signale der Kontaktnormalspannung, der Reibungskraft und der Gleitgeschwindigkeit sind gleichzeitig dargestellt. Der entsprechende Bereich wird markiert, und das Programm errechnet die über diesen Bereich gemittelte Reibungszahl.

Zur statistischen Absicherung werden zu jeder Kombination von Gleitgeschwindigkeit und Kontaktnormalspannung drei Messungen durchgeführt und gemittelt.

Sind auf diese Weise alle Daten einer Versuchsreihe bearbeitet, faßt das Programm die einzelnen Reibungszahlen in Abhängigkeit von Kontaktnormalspannung und Gleitgeschwindigkeit in einem Diagramm zusammen.

Neben den einzelnen Reibungszahlen ist abzulesen, wie sich die Reibungszahl in Abhängigkeit von Kontaktnormalspannung und Gleitgeschwindigkeit ändert, und bei welcher Gleitgeschwindigkeit welche maximale Kontaktnormalspannung erreicht wurde. Die Darstellung der Reibungszahlen im Stribeck-Diagramm wird nicht gewählt, weil darin die unterschiedlichen Einflüsse von Flächenpressung und Gleitgeschwindigkeit nicht mehr erkennbar sind.

7 Auswahl der Meßmethode für die Beurteilung geometrischer Eigenschaften der Blechoberfläche

Mit Kapitel 5.3 wurden die für das tribologische Verhalten der Topografien relevanten geometrischen Eigenschaften von Topografien beschrieben. In diesem Kapitel wird eine Methode ausgewählt, mit der diese geometrischen Eigenschaften

- Abgeschlossenheit
- Leere
 - Höhe der Spitzen
 - Breite (Materialanteil) der Spitzen
 - Anteile von plateauförmigen Flächen
 - im Profil enthaltene "Schmierstoffreserve"
- und Feinheit

quantifizierbar sind.

7.1 Auswahl der Oberflächenkenngößen

Aus der großen Zahl von berechenbaren 2D- und 3D-Oberflächenkenngößen sollen diejenigen ausgewählt werden, die nach den Überlegungen aus Kapitel 5 eine Beurteilung der funktionsrelevanten Eigenschaften ermöglichen. Die Vor und Nachteile vieler Kenngößen sind noch nicht bekannt. In diesem Kapitel wird deshalb noch eine relativ große Anzahl von Kenngößen ausgewählt, um ihre Eignung vergleichen zu können. Ziel ist es letztlich, einen möglichst kleinen Satz von Oberflächenkenngößen festzulegen, mit dem alle funktionsrelevanten Eigenschaften der Oberfläche quantifiziert werden können.

Die Standard-Kenngößen zur Beschreibung der Topografie von Blechen sind der Mittenrauhwert R_a und die Spitzenzahl PC . Sie stellen die Referenz für die Beurteilung anderer Kenngößen dar. PC kann als Maß für die Feinheit genutzt werden, Leere und Abgeschlossenheit lassen sich mit diesen Kenngößen nicht beschreiben.

Abgeschlossenheit

Die Abgeschlossenheit ist, wie in Kapitel 2.5.3 dargestellt, nur über 3D-Messungen erfaßbar. Die Oberflächenkenngöße α_{clm} (Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils) quantifiziert den größtmöglichen Anteil abgeschlossener Leerflächen, in denen hydrostatisch Druck aufgebaut werden kann. Sie beschreibt eine Kombination der Eigenschaften Abgeschlossenheit und Leere und bietet sich zur Beurteilung hydrostatisch wirkender Schmieraschen an, für die abgeschlossene und leere Topografien erforderlich sind. Die Oberflächenkenngöße c_{clm} wird berechnet, um zu überprüfen, welchen Einfluß die Schnittiefe, bei der das Maximum der geschlossenen Leerflächenanteile vorliegt, auf das tribologische Verhalten hat. Das geschlossene Leervolumen V_{cl} wird ebenfalls ermittelt, da diese Kenngöße sich in vorangegangenen Untersuchungen zur Beurteilung des erforderlichen Mindestvolumens als geeignet erwiesen hat.

Leere

Die Leere einer Topografie ist mit Kenngrößen wie dem Profileeregrad quantifizierbar. In Kapitel 5.3 wurde festgestellt, daß es erforderlich sein kann, die Leere über mehrere Kenngrößen genauer zu beurteilen. Die R_k -Kenngrößen bieten sich dazu an, da sie den Verlauf der Materialanteilkurve mit drei Geraden annähern und mit wenigen Kenngrößen abbilden können.

Im folgenden wird erläutert, daß die an einer 2D-Messung berechnete Materialanteilkurve der an einer 3D-Messung berechneten entspricht. Für die Auswahl der Kenngrößen ist die Art der Messung deshalb unerheblich.

Vorausgesetzt werden 2D- und 3D-Messungen, die für die Oberfläche repräsentativ sind, das heißt, daß sie einen für die Oberfläche charakteristischen Anteil von Tälern und Spitzen erfassen. Nicht repräsentativ sind beispielsweise ein zu kurzer Tastschnitt oder eine zu kleine Meßfläche. Bei deterministischen Blechoberflächen ist ein Tastschnitt nicht repräsentativ, wenn er die Oberfläche in einem ungünstigen Winkel schneidet, so daß er überwiegend durch Täler oder überwiegend über Spitzen verläuft.

Trägt man die Wahrscheinlichkeit, einen Punkt der Oberfläche in einer bestimmten Schnittiefe vorzufinden über der Schnittiefe auf, erhält man die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (DIN ISO 13565-2). Den gleichen Kurvenverlauf erhält man durch Auftragen der Häufigkeit der Meßpunkte über der Schnittiefe (Häufigkeitsverteilung [193]). Die Wahrscheinlichkeit, in einer vorgegebenen Schnittiefe einen Punkt der Oberfläche vorzufinden und die Häufigkeit der Meßpunkte in einer Tiefe sind unabhängig von der Art der Messung, das heißt unabhängig davon, ob die Punkte durch eine 2D-, eine 3D-Messung oder durch statistisch über der Oberfläche verteilte Meßpunkte erfaßt wird. Die Häufigkeitsverteilungen einer 2D- und einer 3D-Messung sind deshalb gleich. Die Häufigkeitsverteilung ist die Ableitung der Materialanteilkurve, weshalb auch die Verläufe der Materialanteilkurve für beide Flächen gleich sein müssen.

➔ Folglich unterscheiden sich die aus den Materialanteilkurven berechneten R_k -Kenngrößen von 3D- und 2D-Messungen nicht.

Für alle Kenngrößen, die aus der Materialanteilkurve abgeleitet werden können, sind deshalb keine 3D-Messungen notwendig. Beispiele für solche Kenngrößen sind in Tabelle 17 aufgeführt.

2D-Kenngröße	R_t	R_y	R_a	R_q	R_k	R_{pk}	R_{vk}	M_{r1}	M_{r2}	R_p
entsprechende 3D-Kenngröße	S_t	S_y	S_a	S_q	S_k	S_{pk}	S_{vk}	S_{r1}	S_{r2}	V_{v0}

Tabelle 17: 2D- und 3D-Oberflächenkenngrößen gleichen Informationsgehalts

Im Rahmen dieser Arbeit werden die R_k -Kenngrößen an 3D-Messungen berechnet, da sie aufgrund der höheren Meßpunktezahl mit einer größeren statistischen Sicherheit bieten und nicht die Gefahr beinhalten, daß ein für die Oberfläche nicht repräsentativer Schnitt ausgewertet wird.

Feinheit

Die Feinheit der Topografie wird durch die Spitzenzahl PC quantifiziert. Die Methode zur Bestimmung dieser Spitzenzahl nach SEP 1940 verwendet feste Schnittiefen, die über- bzw. unterschritten werden müssen, damit eine Rauheitserhebung als Spitze gezählt wird. Die festen Schnittiefen führen zu einer Abhängigkeit der ermittelten Spitzenzahl von der Höhe der Rauheit. Hinzu kommt, daß in einer 2D-Messung eine echte Spitzenzählung nicht möglich ist (Kapitel 2.5.3). Die in [168] vorgeschlagene 3D-Methode zur Spitzenzählung berücksichtigt nicht, in welcher Tiefe die Spitzen liegen. Diese Spitzenzählmethode verspricht wenig Erfolg. Die in [175] vorgeschlagene Methode berücksichtigt die Lage der Spitzen. Zusätzlich zu PC wird deshalb die Anzahl der Materialflächen (N_{ma}) sowie der offenen (N_{vo}) und geschlossenen Leerflächen (N_{cl}) anhand von 3D-Messungen berechnet.

Zur Beurteilung der Leere und der Feinheit stehen in der Literatur damit genug erfolgversprechende Kenngrößen zur Verfügung. Die Kenngrößen zur Quantifizierung der Abgeschlossenheit werden aus den folgenden Gründen noch ergänzt:

1. Je nach Topografie liegt das Maximum der abgeschlossenen Leerflächenanteile in unterschiedlichen Durchdringungen (Tiefen) c_{clm} . Die Oberflächenkenngröße α_{clm} berücksichtigt nicht, ob die Oberfläche während der Umformung tatsächlich bis zur Durchdringung c_{clm} einglättet, oder ob nur geringere Durchdringungen und abgeschlossene Leerflächenanteile erreicht werden. In einen früheren Forschungsprojekt [77] wurde festgestellt, daß alle dort untersuchten Bleche bei den Beanspruchungsbedingungen im Streifenziehversuch bis zu einem charakteristischen Materialanteil von ca. 20% einglätteten. Neben α_{clm} sind deshalb im folgenden auch die Leervolumina, Spitzen- und Talzahlen bei festen vorgegebenen Materialanteilen α_{ma} von 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40 und 50% berücksichtigt.

2. Liegen Schmieraschen in unterschiedlichen Schnittiefen, dann können hochliegende Schmieraschen während der Umformung nach unten gedrückt werden und auch bei starker Einglättung zur Senkung der Reibung beitragen. Die Oberflächenkenngröße α_{clm} berücksichtigt die über der Schnittiefe c_{clm} liegenden Schmieraschen nicht (Bild 35).

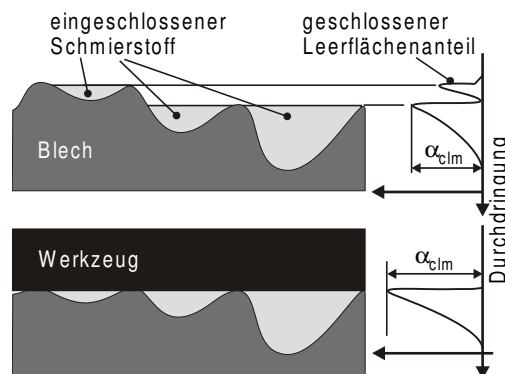


Bild 35: Einfluß einglättender Schmieraschen auf den geschlossenen Leerflächenanteil

Um die höher liegenden Schmiertaschen mit einzurechnen, wird die Oberflächenkenngröße α_{clf} definiert. Sie gibt den Anteil abgeschlossener Leerflächen als Funktion der Durchdringung einschließlich der höherliegenden Schmiertaschen an. Die Kenngröße α_{clf} ist der Maximalwert der Kurve bei einer Durchdringung von 100 %. Die Methode zur Berechnung ist im Anhang (Kapitel 13.2.1) beschrieben.

3. Die Größe der Meßfläche beeinflusst die Werte von α_{clm} , V_{cl} und c_{clm} . Auch wenn die Ergebnisse für ausreichend große Meßflächen korrelieren, ist die Methode zur Bestimmung dieser Kenngrößen nicht korrekt, da sie die am Rand liegenden Leerflächen als offen wertet, auch wenn sie sich bei größerer Meßfläche als geschlossen erweisen. Einen mathematisch korrekten Ansatz für dieses Problem bietet die Perkolationstheorie [194]. Eine hochliegende horizontale Schnittfläche durch die Topografie schneidet im allgemeinen nur Spitzen, so daß ein zusammenhängendes Leervolumen berechnet wird. Schmierstoff kann von einer Seite des Meßrandes zur anderen fließen, die Perkolation (das Hindurchfließen) ist möglich. In einem tieferen Schnitt wird so viel Material geschnitten, daß kein zusammenhängendes Leervolumen mehr vorhanden ist. Schmierstoff kann ab dieser Durchdringung nicht mehr von einer Seite der Meßfläche zur anderen fließen. Der Übergang erfolgt plötzlich und bei einer charakteristischen Durchdringung, die als Perkolationstiefe p bezeichnet wird. Ab dieser Perkolationstiefe ist das Leervolumen geschlossen. Der Schmierstoff kann seitlich nicht mehr entweichen so daß bei weiterer Einglättung hydrostatischer Druck aufgebaut wird. Die Perkolationstiefe ist ein Maß für die Abgeschlossenheit der Topografie. Zum Anteil der hydrostatisch tragenden Flächen trägt ab dieser Tiefe die gesamte Leerfläche $\alpha_{vo}(p)$ bei, auch die am Rand der Meßfläche liegenden Leerflächen. Wie für die Methode zur Bestimmung von α_{clm} ist auch für diese Methode eine Mindestgröße der Meßfläche notwendig, sie liegt aber deutlich niedriger. In Kapitel 8 wird überprüft, ob die Abgeschlossenheit auch mit der Kenngröße $\alpha_{vo}(p)$ anstelle von α_{clm} beurteilt werden kann. Ist dies der Fall, dann reichen eventuell auch kleinere Meßflächen zur Beurteilung der Abgeschlossenheit aus.
4. Die Welligkeit hat einen deutlichen Einfluß auf α_{clm} . Der Wert von α_{clm} hängt wie in früheren Untersuchungen des Autors gezeigt [195, 137], deutlicher von der Filterung ab als andere Kenngrößen. Dieser Effekt wird am Beispiel von zwei Modelloberflächen veranschaulicht. Bild 36 zeigt die gleiche Modelloberfläche oben mit "Wellenberg" und unten mit "Wellental". In der oberen Fläche wird der höchste Wert für α_{clm} bei einer Schnittiefe knapp unter dem höchsten Punkt der Topografie berechnet. Der maximale abgeschlossene Leerflächenanteil beträgt etwa 40%. Im zweiten Fall berührt die Schnittfläche knapp unter dem höchsten Punkt nur den Rand der Topografie. Die gesamte Leerfläche im

Inneren ist durch den nach oben gewölbten Rand abgeschlossen, so daß für α_{clm} ein Wert von 100% berechnet wird.

Dieses Beispiel verdeutlicht, daß auch eine beliebig geringe Welligkeit den Wert von α_{clm} entscheidend verfälschen kann und daß die Methode zur Berechnung von α_{clm} nicht stabil ist. Die in Kapitel 7.4 auszuwählenden Filter dienen dazu, die Welligkeit so weit wie möglich aus den Meßdaten herauszurechnen.

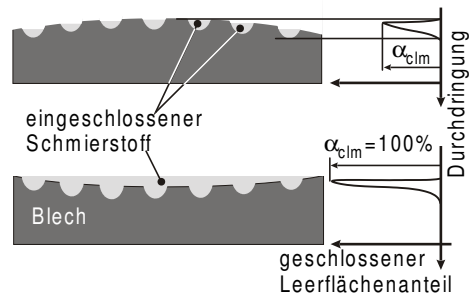


Bild 36: Einfluß der Welligkeit auf den berechneten Anteil geschlossener Leerflächen

Für die Beschreibung der geometrischen Eigenschaften der Topografie werden aufgrund dieser Überlegungen die in Tabelle 18 zusammengefaßten Kenngrößen ausgewählt. Die Algorithmen zur Berechnung der neu entwickelten Kenngrößen α_{clf} und Perkolationsstiefe werden im Anhang (Kapitel 13.2) beschrieben.

Merkmal		Kenngröße
Abgeschlossenheit	Lage der abgeschlossenen Schmieraschen	p, c_{clm}
Leere	allgemeine, aus 2D abgeleitete Kenngrößen	$R_a, S_t, S_z, S_{z2}, S_a, S_q, S_{sk}, S_{ku},$
	Höhe der Spitzen	$S_{pk}, S_{pk}^*, c(N_{mam}), c(N_{vom}), c(N_{clm})$
	Breite (Materialanteil) der Spitzen	S_{r1}, S_{rk}
	Anteile plateauförmiger Flächen	S_k
	Schmierstoffreserve	$R_p, R_{pm}, V_{vo}, V_{vo}(k), V_{vo}(p), V_{vo}(c_{clm}), V_{vo}(\alpha_{ma}=1-50\%), V_{cl}, S_{vk}, S_{vk}^*, S_{r2}$
Feinheit	Anzahl der Spitzen	$PC, N_{mam}, N_{ma}(k), N_{ma}(p), N_{ma}(c_{clm}), N_{ma}(\alpha_{ma}=1-50\%)$
	Anzahl der Täler	$N_{vom}, N_{vo}(k), N_{vo}(p), N_{vo}(c_{clm}), N_{vo}(\alpha_{ma}=1-50\%)$
Abgeschlossenheit und Leere	Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils	$V_{cl}, \alpha_{clm}, \alpha_{clf}, \alpha_{vo}(k), \alpha_{vo}(p)$
Abgeschlossenheit und Feinheit	Anzahl geschlossener Leerflächen	$N_{clm}, N_{cl}(k), N_{cl}(p), N_{cl}(c_{clm}), N_{cl}(\alpha_{ma}=1-50\%)$

Tabelle 18: Ausgewählte Oberflächenkenngrößen

7.2 Auswahl des Meßverfahrens

Zur Auswahl des Meßverfahrens wurden Voruntersuchungen mit zwei mechanisch tastenden Geräten und einem Laserscanner durchgeführt.

	Mitotuyo Surftest	Hommel- Tester T20	TopScan 3D
Meßprinzip	mechanisch tastend		Laserscanner
Dimension	2D	3D	
max. Punktezahl		250 x 800	256 x 256
maximale Meßlänge oder maximale Größe der Meßfläche	12,5 mm	25 x 25 mm ²	2 x 2 mm ²
Tastnadelradius oder Meßfleckdurchmesser	5 µm		
Bezugssystem	Gleitkufe	Bezugsebene	
Meßdauer ca.	30 s	2 h	12 min

Tabelle 19: Technische Daten der verwendeten Oberflächen-Meßgeräte

Bei 2D-Messungen liefern die beiden mechanischen Geräte trotz der unterschiedlichen Bezugssysteme gut übereinstimmende Werte. Der Vergleich der 3D-Messungen des Hommel-Testers und des Laserscanners zeigte deutliche Unterschiede. In den Meßdaten des Laserscanners sind hohe Spitzen enthalten. Solche Abweichungen von optischen Geräten können auftreten, wenn das Licht an steilen Flanken der Topografie gestreut wird. An diesen Stellen läßt sich die Messung nicht korrekt auswerten. Abhängig vom verwendeten optischen Meßprinzip und von Reflexion und Geometrie der vermessenen Oberfläche können bei Blechoberflächen weit über 10% der Meßdaten fehlerhaft sein. Modernere optische Meßgeräte erkennen fehlerhafte Meßdaten und interpolieren die fehlenden Daten aus benachbarten Punkten. Wird diese Korrektur nicht durchgeführt, dann können besonders Oberflächenkenngrößen wie R_y und R_p aber auch R_{pm} , R_{pk} und R_{vk} , die von einzelnen Ausreißern stark beeinflusst werden, gravierend abweichen. Auch der Vergleich der Meßdaten mit einem weiteren optischen Gerät im Arbeitskreis Rauheit des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute zeigt ähnlich hohe Abweichungen [77].

Da zur Beurteilung der Topografie besonders die Spitzen genau gemessen werden sollten, erscheint das optische Gerät ungeeignet. Mit dem Hommel-Tester sind sowohl 2D- als auch 3D-Messungen möglich. Damit ist ein direkter Vergleich von 2D- und 3D-Kenngrößen möglich. Das Mitotuyo-Gerät wurde zur regelmäßigen Überprüfung des Hommel-Testers eingesetzt.

7.3 Auswahl der Meßbedingungen

Die 2D-Messungen wurden mit Ausnahme des Bezugssystems nach den Meßbedingungen des Stahleisen-Prüfblattes SEP 1940 durchgeführt. Anstelle eines Gleitkufentasters kam ein Bezugsebenentaster zum Einsatz, da der Einfluß der Welligkeit untersucht werden soll. Im Gegensatz zum Bezugsebenentaster filtert ein Gleit-

kufentaster während der Messung einen unbekannten Teil der Welligkeit aus den Meßdaten heraus, so daß diese Welligkeit nicht gemessen werden kann.

Für 3D-Messungen bestehen keine entsprechenden Meßvorschriften. Ausgehend von Untersuchungen des Arbeitskreises 3D-Oberflächenkenngrößen [175] wurde eine Meßfeldgröße von 3 x 3 mm gewählt. Der Hommel-Tester ermöglicht maximal 250 parallele Schnitte. Bei 250 x 250 Meßpunkten ist nach den Ergebnissen von Pfestorf [88] mit Abweichungen zu rechnen, er empfiehlt 1000 x 1000 Punkte.

Die Rechenzeit zur Filterung und zur Berechnung der Kenngrößen hängt stark von der verwendeten Punktezahl ab. Je nach Algorithmus ist die Rechenzeit proportional zur Punktezahl bis proportional zur dritten Potenz der Punktezahl. Geringere Punktezahlen können dadurch zu drastisch reduzierten Rechenzeiten führen. Eigene Voruntersuchungen des Autors haben ergeben, daß auch mit 200 x 200 Punkten noch vergleichbare Werte erreichbar sind. Um dies näher zu untersuchen, werden alle Messungen zunächst mit der mit dem Hommel-Tester maximal möglichen Punktezahl von 250 x 800 durchgeführt. Für die Auswertung werden dann Flächen mit Punktezahlen von 250 x 250, 200 x 200, 150 x 150 und 100 x 100 aus den gemessenen Daten berechnet.

7.4 Auswahl der Filterung der Meßdaten

In Kapitel 2 (Der Stand der Forschung) wurde darauf hingewiesen, daß man die Welligkeit zur Beurteilung der tribologischen Eigenschaften aus den Meßdaten herausfiltern sollte, da eine im Blech vorhandene Welligkeit während des tribologischen Kontakts leichter einebnet als die Rauheit [154] und sich deshalb kaum auf das tribologische Verhalten auswirken kann. In diesem Kapitel werden Filter und Filterparameter ausgewählt, um deren Eignung anhand des Vergleichs der Oberflächenkenngrößen in Kapitel 8.4 beurteilen zu können.

Aus der 2D-Meßtechnik abgeleitete Filter

Neben dem ungefilterten Profil, das aus der mit der Methode der kleinsten Quadrate ausgerichteten Meßfläche besteht, wird der in der 2D-Meßtechnik als Standard geltende Gauß-Filter eingesetzt. Der Rechteckfilter benötigt einen etwas geringeren Rechenaufwand als der Gauß-Filter. Um den Nachteil des schlechteren Übertragungsverhaltens des Rechteckfilters mit dem Vorteil kürzerer Rechenzeiten abwägen zu können, wird auch die Rechteckfilterung durchgeführt. In einer früheren Arbeit des Autors [77] sind die Nachteile dieser Filter bei der Anwendung auf tribologisch beanspruchte Blechoberflächen dargestellt. Durch die Filterung können Profilverzerrungen auftreten, die die Werte der Oberflächenkenngrößen deutlich verfälschen.

Die doppelte Filterung, mit der diese Verzerrungen minimiert werden sollen, hat sich für Blechoberflächen als ungeeignet erwiesen, da sich die Ergebnisse kaum von denen der einfachen Filterung unterscheiden. In dem Vorschlag für ein neues Stahlleisen-Prüfblatt für deterministische Blech-Oberflächenstrukturen ist die doppelte Filterung vorgesehen. Um zu überprüfen, ob der Aufwand für die doppelte Filterung ge-

rechtfertigt ist, werden auch die Messungen dieser Arbeit mit doppelter Gauß- und Rechteckfilterung untersucht.

Für die Grenzwellenlänge der Filter wurde vom Arbeitskreis 3D-Oberflächenkenngrößen ein Wert von 0,6 mm vorgeschlagen. Zur Prüfung anderer Werte werden für alle Filter auch die Grenzwellenlängen 0,3 und 0,9 mm untersucht. Tabelle 34 im Anhang enthält die ausgewählten Filter und Filterparameter.

Der modifizierte Kugelfilter

Eine der Ursachen für die Verzerrungen der Gauß- und Rechteckfilter liegt darin, daß sie als Welligkeit eine Mittellinie durch das Profil berechnen (M-System). Die aus tribologischer Sicht relevante Welligkeit kann dieser nur dann entsprechen, wenn die Topografie bis zur Mitte der Topografie einglättet. In der Blechumformung glätten die Bleche nur selten so weit ein [183].

Bei der Anwendung der Filter auf moderne Blechoberflächen mit Krater-Strukturen können zusätzliche Profilverzerrungen entstehen. Abbildung veranschaulicht diesen Effekt an einer Modelloberfläche mit einem rechteckigen Krater. Diese Fläche enthält keine Welligkeit, denn der Krater soll in der gefilterten Fläche erhalten bleiben und nicht zur Welligkeit gerechnet werden. Eine Filterung wäre demnach nicht nötig. Wird die Oberfläche trotzdem gefiltert, dann soll das Ergebnis möglichst unverfälscht sein, und der ungefilterten Fläche entsprechen.

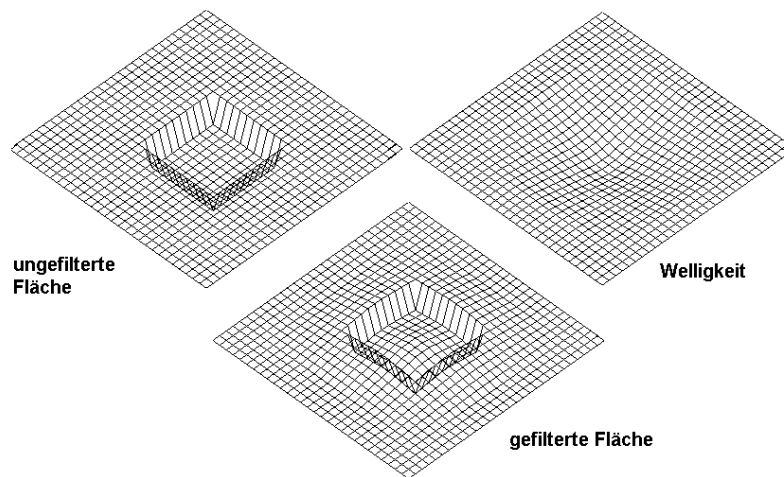


Bild 37: Verzerrung der Meßdaten bei Gauß-Filterung am Beispiel einer Modelloberfläche

Die durch die Filterung berechnete Welligkeit ist rechts dargestellt. Die gefilterte Fläche wird aus der Differenz der ungefilterten Fläche und der Welligkeit berechnet. Das Ergebnis zeigt, daß der Rand des Kraters der gefilterten Fläche höher liegt als bei der ungefilterten Fläche. An der gefilterten Oberfläche wird ein zu hohes Leervolumen berechnet, da das Werkzeug nicht wie bei der ungefilterten Fläche auf dem ge-

samten Plateau aufliegt, sondern auf dem höchsten Punkt des aufgeworfenen Kraterandes.

Bild 38 zeigt oben einen Schnitt durch eine Modell-Topografie, die aus einer feinen Rauheit, 2 Kratern und einer überlagerten Welligkeit besteht. Etwa in der Mitte ist eine kleine etwas höhere Spitze enthalten. Solche Spitzen können entweder durch

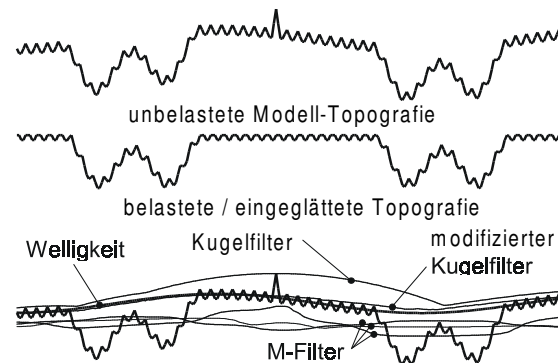


Bild 38: Mit unterschiedlichen Filtern berechnete Welligkeitsprofile an einer Modelloberfläche

Ausreißer in der Messung entstehen oder tatsächlich auf dem Blech vorhanden sein.

Wird diese Topografie durch tribologischen Kontakt belastet, dann glätten die Welligkeit und die Spitzen ein.

Damit der Filter die Einglättung der Topografie richtig abbilden kann, sollte die berechnete Welligkeit möglichst genau der im unteren Bild eingezeichneten sinusförmigen Welligkeit entsprechen (dickere Linie). Das gefilterte Profil

wird berechnet, indem man die Welligkeit vom ungefilterten Profil subtrahiert. Das führt dazu, daß die Punkte der ungefilterten Topografie, durch die die Welligkeit verläuft, im gefilterten Profil auf der Höhe 0 liegen.

Soll die Einglättung der Spitzen berücksichtigt werden, dann lassen sich zusätzlich alle Werte >0 auf $=0$ setzen (belastete/eingeglättete Topografie in Bild 38). Da auch die Spitzen wichtige Informationen enthalten, werden sie im allgemeinen nicht abgeschnitten, sondern je nach zu berechnender Kenngröße entweder alle Daten oder nur die Daten <0 ausgewertet.

Die drei mit M-Filtern berechneten Welligkeiten geben den Verlauf der durch den tribologischen Kontakt eingeebneten Welligkeit nur schlecht wieder.

Filter nach dem E-System wie der Kugelfilter berechnen eine einhüllende Kurve, die die Topografie in den höchsten Punkten berührt. Beim Kugelfilter wird ein Kreis rechnerisch so über den Tastschnitt gerollt, daß er ihn ständig in mindestens einem Punkt berührt. Der tiefste Punkt des Kreises beschreibt dabei eine Bahn, die als Welligkeit des Profils interpretiert wird. Ohne die einzelne Spitze der in Bild 38 dargestellten Topografie würde der Kugelfilter die Welligkeit deutlich besser abbilden können als die Filter des Mittellinien-Systems. Spitzen führen aber dazu, daß die Welligkeit stark

verzerrt wird, da die Kugel über die Spitzen hinwegrollen muß. Bild 39 veranschaulicht diesen Effekt am Beispiel einer Fläche.



Bild 39: Verzerrung einer Modelloberfläche mit Spitze bei Kugelfilterung

Links ist eine ebene Fläche mit einer einzelnen Spitze in der Mitte dargestellt. Die mittlere Abbildung zeigt die vom Kugelfilter berechnete Welligkeit. Durch Subtraktion der Welligkeit von der Ausgangsfläche resultiert die rechts dargestellte Fläche. Infolge der Filterung entsteht damit ein Krater in der Oberfläche, der in der ursprünglichen Fläche nicht vorhanden ist.

Filter nach dem M(ittellinien)-System simulieren eine zu starke und Filter nach dem E(inhüllenden)-System keine Einglättung der Spitzen. Beide Filtermethoden führen zu Verzerrungen der Meßdaten. Stünde ausreichende Rechenleistung zur Verfügung, dann wäre es eine Lösung, die Einglättung jeder gemessenen Topografie mit der Methode der Finiten Elemente zu simulieren. Bei den hohen Meßpunktezahlen liegen die Rechenzeiten dafür zur Zeit noch im Bereich von Tagen.

Um die Einglättung der Spitzen trotzdem berücksichtigen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit der modifizierte Kugelfilter entwickelt. Er beruht auf dem von Weingräber [169] beschriebenen und aus der 2D-Meßtechnik bekannten Kugelfilter.

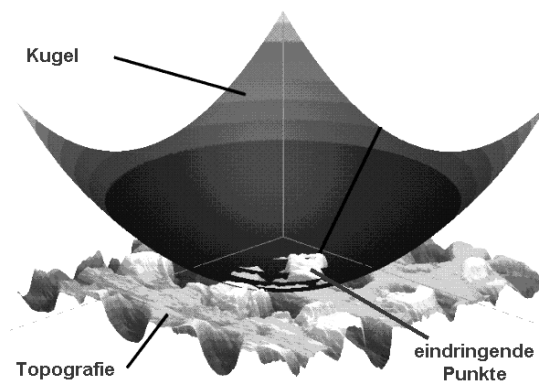


Bild 40: Prinzip des modifizierten Kugelfilters mit eindringenden Punkten

Die Modifikation des Kugelfilters besteht darin, daß bei einer 3D-Messung eine feste Anzahl von Punkten in die Kugel eindringen kann. Die Punkte der Fläche, die während des Überrollens in die Kugel eingedrungen sind, werden als durch den tribologischen Kontakt eingeebnete Spitzen interpretiert.

Durch die beiden Parameter des Filters (Radius der Kugel und Anzahl der eindringenden Punkte) wird festgelegt, wie stark die Kugel in die Topografie einsinkt und wie groß

die berechnete Einglättung der Topografie ist. Der Materialflächenanteil der durch den Kugelfilter eingeglätteten Spitzen stellt eine weitere Oberflächenkenngröße dar, die zur Beschreibung der Topografie genutzt werden kann. In Anlehnung an den Materialanteil der Spitzen M_{r1} wird diese Kenngröße im folgenden mit S_{rk} bezeichnet und hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung der Topografie untersucht.

Der Algorithmus des Kugelfilters und seine Programmierung sind im Anhang erläutert.

Die feste Anzahl von Punkten entspricht einer konstanten Beanspruchung des Bleches durch Kontaktnormalspannung. Bei Annahme einer konstanten Fließspannung k_f des Blechwerkstoffs wird die Kugel mit einer Normalkraft

$$F_K = k_f \cdot n \cdot dx \cdot dy$$

Gleichung 6

in die Topografie gedrückt, wobei n die Anzahl der eindringenden Punkte und dx bzw. dy die Abstände der Meßpunkte in beiden Koordinatenrichtungen bezeichnen.

Der Radius der Kugel legt die Grenzwellenlänge der Filterung fest. Ein großer Radius führt dazu, daß nur langwellige Anteile in der Welligkeit enthalten sind, bei kleineren Radien werden auch kürzere Wellenlängen zur Welligkeit gerechnet.

Bei geeigneten Filterparametern kann der modifizierte Kugelfilter die Welligkeit der Topografie in Bild 38 deutlich besser abbilden als die übrigen Filter. Bei Untersuchungen des Autors zur Beurteilung der zum Ziehen erforderlichen Schmierstoffmenge hat dieses Filter zu den besten Ergebnissen geführt [77] und Korrelationen zwischen Oberflächenkenngrößen und dem tribologischen Verhalten konnten von Jonasson nur bei Verwendung dieses vom Autor entwickelten Filters aufgezeigt werden [196].

Zur Bestimmung der beiden Filterparameter des Kugelfilters wurden bisher nur einzelne Voruntersuchungen durchgeführt. In dieser Arbeit werden die Filterparameter systematisch variiert, um die für die Beurteilung von Topografien optimalen Filterparameter zu bestimmen (Tabelle 34 im Anhang, Zeile 6). Der Radius von 5 mm hat sich bisher als geeignet erwiesen. Bei zu niedrigen Radien taucht die Kugel in Krater ein, was dazu führt, daß die Krater zur Welligkeit gerechnet werden. Da die Kraterdurchmesser etwa 0,2 bis 0,3 mm betragen, wird ein minimaler Kugelradius von 1 mm gewählt, damit die Kugel in keinem Fall vollständig in die Krater eintauchen kann.

Die maximale Punktezahl von 250 x 250 erfordert eine Rechenzeit für die Kugelfilterung auf einem PC mit Pentium Pro 200 Prozessor je nach Kugelradius und Anzahl der eindringenden Punkte von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden. Da die Rechenzeit mit der dritten Potenz der Punktezahl zunimmt, führen geringere Punktezahlen zu deutlich niedrigeren Rechenzeiten. Bei voller Punktezahl werden sowohl die Rauheit als auch die Welligkeit mit jeweils 250 x 250 Punkten abgebildet. In der Welligkeit sind keine kurzwelligen Anteile mehr enthalten, so daß zu ihrer Beschreibung nicht die volle Punktezahl benötigt wird. Um zu untersuchen, wie weit die

Punktezah zur Beschreibung der Welligkeit reduzierbar ist, wird die Filterung mit den Punktezahlen von 200 x 200, 150 x 150 und 100 x 100 Punkten durchgeführt (Tabelle 34 im Anhang, Zeile 7). Durch die Subtraktion der Welligkeit von der ursprünglichen Fläche mit voller Punktezah behält die gefilterte Fläche die volle Punktezah und den vollen Informationsgehalt der Rauheit.

Bei der Filterung mit reduzierter Punktezah werden 100 eindringende Punkte verwendet. Damit steigt wird bei gleicher Anzahl eindringender Punkte deren Anteil und es eine stärkere Einebnung der Oberfläche simuliert.

Die MOTIF-Methode ist in erster Linie zur Berechnung von 2D-Oberflächenkenngrößen entwickelt worden, beinhaltet aber auch eine Filterung, die auf 3D-Meßdaten übertragen werden kann [197]. Sie erfordert allerdings komplexe Regeln zur Ermittlung und Kombination der 3D-Motifs, die sich zur Zeit noch in der Entwicklung befinden. Zusätzlich sind Methoden zur Unterdrückung einzelner Spitzen notwendig [DIN ISO 12085]. Diese Methoden der Spitzenunterdrückung sind nicht wie beim modifizierten Kugelfilter für die Abbildung der Einglättung, sondern zur Unterdrückung von Ausreißern in der Messung entwickelt worden. Die MOTIF-Methode läßt deshalb keine Vorteile gegenüber dem modifizierten Kugelfilter erwarten und wird hier nicht ausgewählt.

Spline und Fourier-Filter werden nicht berücksichtigt, da sie nach dem M-System arbeiten und dadurch hoch und tief liegende Spitzen gleich gewichten. Unterschiedlich tiefe Krater wirken sich wie bei Gauß- und Rechteckfilter auf die berechnete Welligkeit aus und können die tribologische Kontaktfläche verzerren (Bild 37).

Insgesamt stehen mit dieser Auswahl von jeder Messung 104 unterschiedlich gefilterte Flächen zur Verfügung (Tabelle 34), an denen die in Kapitel 7.1 (Tabelle 18) beschriebenen 78 Oberflächenkenngrößen berechnet werden.

8 Vergleich von tribologischen und geometrischen Kenngrößen

In den vorangegangenen Kapiteln konnte bisher nur anhand von Voruntersuchungen und auf den Modellvorstellungen begründeten Überlegungen beurteilt werden, welche der

- tribologischen Kenngrößen (Kapitel 6),
- Oberflächenkenngrößen (Kapitel 7.1, Tabelle 18) und
- der Filter (Kapitel 7.4 und Tabelle 34)

zur Beurteilung von Blechoberflächen geeignet sind.

In diesem Kapitel wird in Experimenten beurteilt, welche Zusammenhänge zwischen Oberflächenkenngrößen und tribologischen Kenngrößen bestehen. Dazu werden Versuchsreihen mit insgesamt 16 Blechen unterschiedlicher Topografie ausgewertet. Die Ergebnisse der Oberflächenvermessung und der Reibungsuntersuchungen sind in den Kapiteln 8.1 und 8.2 dargestellt. Der Vergleich der tribologischen Kenngrößen und der Oberflächenkenngrößen erfolgt in Kapitel 8.3.

Tabelle 20 enthält eine Übersicht der untersuchten Topografien.

Blech Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Topografie	SBT	SBT	SBT	EDT	EDT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT/EDT	EBT	EBT	EBT	EBT
Ra	0,93	1,54	1,5	1,09	1,51	1,87	1,47	2,12	1,34	2,3	2	1,69	2	2,38	2,18	1,7
PC	49	45	53	113	116	38	43	55	47	47	62	70	92	88	59	85
Beschichtung	-	-	-	ZN	-	ZN	-	-	-	ZN	ZN	ZN	ZN	ZN	ZN	ZN
Blechedicke [mm]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,75	1	1	1	0,8	0,75	0,75	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Untersuchungsauftrag im Literaturverzeichnis	198	198	199		199				198	198	198	199	198	176	176	176

Tabelle 20: Herstellungsverfahren, Beschichtung und Oberflächenkenngrößen der untersuchten Bleche

Die Bleche weisen geringe Unterschiede in der Blechedicke auf. Auch aufgrund der Toleranzen in den Festigkeitswerten des Blechwerkstoffs St 14 ist im Streifenziehversuch, wie in Kapitel 6.1.1 beschrieben, mit zusätzlichen Streuungen der Werte der maximalen Kontaktnormalspannung zu rechnen.

8.1 Vergleich der Oberflächenkenngrößen

Die Vermessung der Oberflächen erfolgte mit den in Kapitel 7 beschriebenen mechanisch tastenden Geräten. Die 2D- Kenngrößen wurden nach den Richtlinien des SEP 1940 gemessen und zur Filterung der 3D-Meßdaten diente ein Gauß-Filter mit der Grenzwellenlänge 0,6 mm.

In einem ersten Schritt werden die Meßgeräte sowie 2D- und 3D-Kenngrößen verglichen. Bild 41 zeigt die mit dem Hand-Gerät gemessenen R_a -Werte über den R_a -Werten des Hommel-Testers.

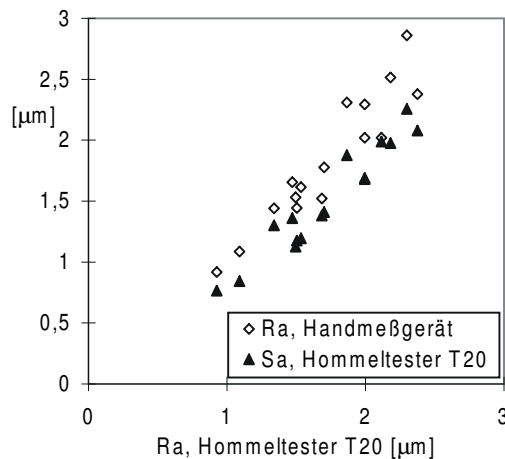


Bild 41: Vergleich der Mittenrauhwerte

Die Ergebnisse beider Geräte stimmen gut überein, obwohl der Hommel-Tester mit einem Bezugsebenentaster und das Handgerät mit einem Gleitkufentaster arbeitet.

Die S_a -Werte in Bild 41 wurden aus 3D-Messungen mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten PC-Software TopoGraf berechnet.

Da die gleiche Methode wie bei der Berechnung des 2D- R_a -Wertes verwendet wird, stimmen die Ergebnisse weitgehend überein (Bild 10, Spalten 1 und 3).

Die 2D- R_a -Werte liegen etwas höher als die 3D- S_a -Werte, weil in den 2D-Messungen aufgrund der größeren Meßlänge auch längerwellige Anteile enthalten sind.

Vergleich von 2D- und 3D-Kenngrößen zur Beurteilung der Leere

Bild 42 zeigt die 2D- R_p - und R_{pm} -Werte und das an einer 3D-Messung berechnete Leervolumen. Zur Berechnung von V_{vo} wird die 2D-Methode zur Berechnung von R_p auf eine 3D-Messung angewendet. Auch hier bieten die 2D-Kenngrößen die gleichen Informationen wie die 3D-Kenngrößen.

Diese Ergebnisse bestätigen die in Kapitel 7.1 dargestellten Zusammenhänge zwischen 2D- und 3D-Kenngrößen. Die Kenngrößen der Spalten 1 bis 4 in Bild 10 werden nach den gleichen Methoden berechnet und liefern bis auf Unterschiede in

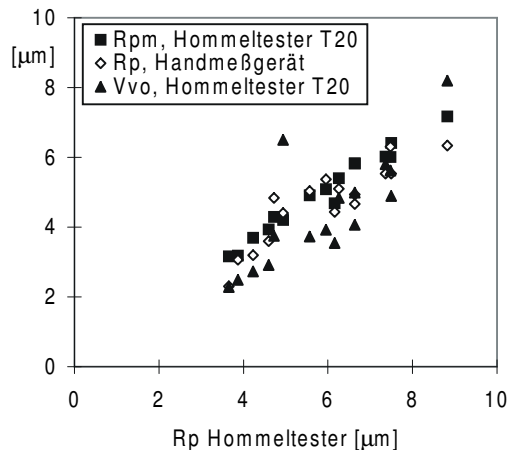


Bild 42: Vergleich der Glättungstiefen und des Leervolumens

der Filterung die selben Informationen. Ein für die Oberfläche repräsentativer 2D-Schnitt kann die Materialanteilkurve und damit die Leere der Topografie genau so gut abbilden wie eine 3D-Messung.

Vergleich von 2D- und 3D-Kenngrößen zur Beurteilung der Feinheit der Topografie

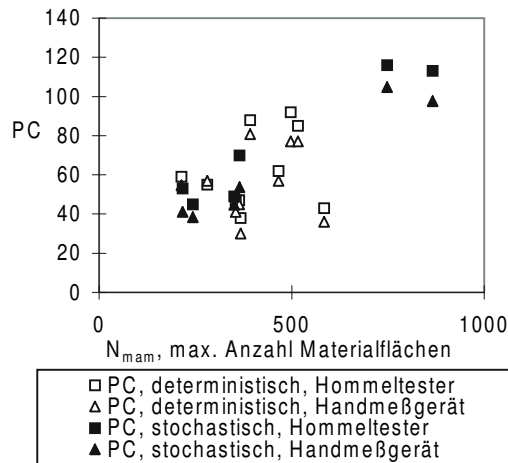


Bild 43: Vergleich der 2D- und 3D-Spitzenzahlen an stochastischen und deterministischen Blechoberflächen

Spitzen und Täler können wie in Kapitel 2.5.3 dargestellt, erst anhand von 3D-Messungen eindeutig identifiziert werden. In Bild 43 sind die 2D- über den über alle Filter gemittelten 3D-Spitzenzahlen aufgetragen.

Für die stochastischen Blechoberflächen werden bei hohen 3D- auch hohe 2D-Spitzenzahlen gemessen. Bei den deterministischen Strukturen ist kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen.

In der Literatur sind für stochastische Strukturen Zusammenhänge zwischen den 2D-Spitzenzahlen und dem tribologischen Verhalten beschrieben, für deterministische Strukturen

ist das nicht möglich. Die Ergebnisse zeigen, daß 3D-Spitzenzahlen andere Informationen beinhalten. Es wird deshalb überprüft, ob 3D-Spitzenzahlen zur Beurteilung von stochastischen und gleichzeitig deterministischen Topografien geeignet sind.

Vergleich von 2D- und 3D-Kenngrößen zur Beurteilung der Abgeschlossenheit

2D-Kenngrößen beinhalten nach den Überlegungen in Kapitel 2.5.3 keine Informationen über die Abgeschlossenheit der Topografie. Es ist aber möglich, daß aufgrund der Herstellungsverfahren der Topografie Zusammenhänge zwischen der Abgeschlossenheit und Eigenschaften wie Leere und Feinheit bestehen. Im folgenden Abschnitt werden deshalb Korrelationen zwischen diesen Eigenschaften untersucht.

Korrelationen zwischen Kenngrößen

Die Herstellungsverfahren der Topografien ermöglichen es nicht, alle Eigenschaften der Topografie unabhängig voneinander zu variieren. So kann man zum Beispiel keine Topografien mit sehr hohen Spitzenzahlen bei gleichzeitig hoher Rauheit herstellen. Im folgenden wird untersucht, ob weitere Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der in dieser Arbeit untersuchten Bleche bestehen.

In Bild 44 sind Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der Leere dargestellt.

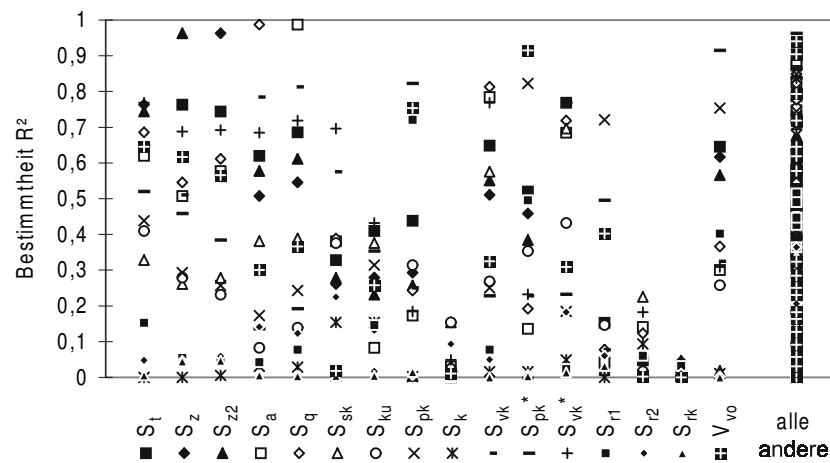


Bild 44: Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der Leere

Über jeder Oberflächenkenngröße ist das lineare Bestimmtheitsmaß (Pearsonscher Korrelationskoeffizient R^2) zu den übrigen Kenngrößen der Leere angegeben. Die Messungen der 16 Bleche wurden mit den 104 Filtern untersucht, so daß für jeden Korrelationskoeffizienten 1664 Punkte zur Verfügung stehen.

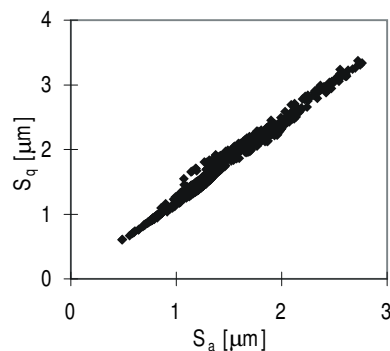


Bild 45: Zusammenhang zwischen arithmetischem und quadratischem Mittenrauhwert

S_z entspricht dem Mittelwert der Differenz der 5 höchsten und der 5 niedrigsten Punkte der gesamten Topografie. Eine größere, aus mehreren Punkten bestehende Spitze kann alle 5 höchsten

Der deutlichste Zusammenhang besteht zwischen S_a und S_q . Bild 45 veranschaulicht, daß beide Kenngrößen die gleichen Informationen beinhalten.

Ein zweiter deutlicher Zusammenhang besteht zwischen S_z und S_{z2} (Bild 46).

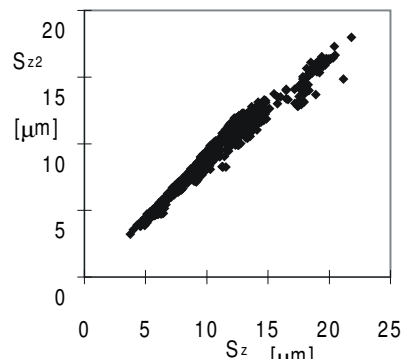


Bild 46: Einfluß der Bezugsflächen auf die Rauhtiefe

Punkte einer Topografie enthalten und ein tiefes Tal alle 5 tiefsten Punkte, so daß diese Kenngröße wenig aussagefähig sein kann. Um gleichmäßig über der Fläche verteilte Spitzen und Täler auszuwerten, wird die Fläche bei S_{z2} in 5 x 5 gleich große Bezugsflächen aufgeteilt. S_{z2} berechnet man aus dem Mittelwert der Differenz des höchsten und des tiefsten Punktes jeder Bezugsfläche. Da beide Kenngrößen gut korrelieren, erscheint diese Aufteilung nicht erforderlich zu sein.

Eine weiterer hoher Korrelationskoeffizient besteht zwischen S_{pk}^* und dem 3D-Leervolumen V_{vo} und damit auch mit der 2D-Oberflächenkenngröße R_{pm} . Da das Leervolumen vom höchsten Punkt der Topografie bis zum tiefsten berechnet wird, beeinflussen hohe Spitzen das berechnete Leervolumen deutlich, tiefe Täler dagegen kaum. Die hohe Korrelation zwischen S_{pk}^* und V_{vo} weist darauf hin, daß das Leervolumen im Bereich der Spitzen den entscheidenden Anteil am Gesamtvolumen hat.

Zwischen den anderen Kenngrößen der Leere bestehen mit Korrelationskoeffizienten unter 0,8 geringere Zusammenhänge, so daß diese Kenngrößen unterschiedliche Informationen beinhalten und einander nicht durch lineare Beziehungen ersetzen können.

Rechts in Bild 44 sind die Korrelationskoeffizienten der Kenngrößen der Leere zu den Kenngrößen der Feinheit und der Abgeschlossenheit dargestellt. S_{pk}^* , V_{vo} und S_a korrelieren mit einigen dieser Kenngrößen relativ gut. Um diesen Zusammenhang näher zu untersuchen, sind S_{pk}^* , V_{vo} und S_a in Bild 47 zusätzlich zu den Kenngrößen der Abgeschlossenheit dargestellt.

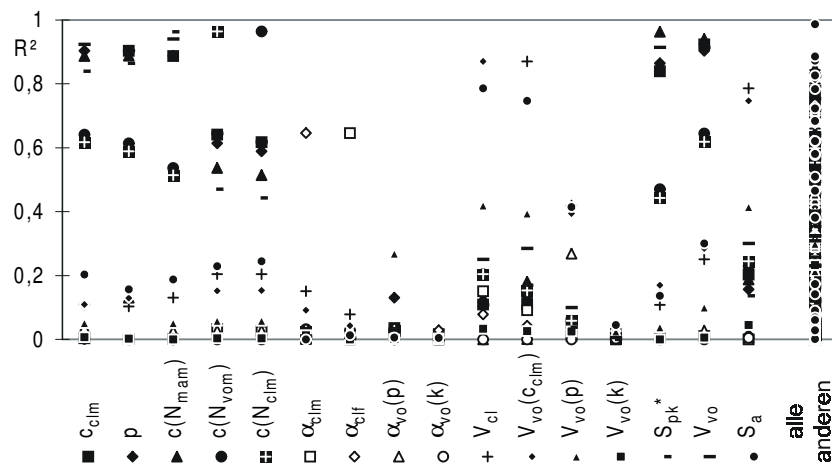


Bild 47: Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der Abgeschlossenheit

Die Kenngrößen zur Beschreibung der Tiefen, in denen die größten Anteile abgeschlossener Leerflächen, die höchsten Spitzen- und Talzahlen auftreten, und die Perkolationstiefe korrelieren deutlich (Kenngrößen c_{clm} bis $c(N_{clm})$). Die in Bild 44

festgestellte Korrelation von S_{pk}^* ist dieser Gruppe zuzuordnen. Für die hier untersuchten Bleche besteht damit ein klarer Zusammenhang zwischen der aus 2D-Messungen berechnbaren Kenngröße S_{pk}^* und den 3D-Kenngrößen zur Beschreibung der Abgeschlossenheit. Da dieser Zusammenhang wie in Kapitel 2.5.3 dargestellt nicht allgemeingültig sein kann, ist hier davon auszugehen, daß mit den zur Zeit zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren Spitzenhöhe und Abgeschlossenheit nicht unabhängig voneinander variierbar sind.

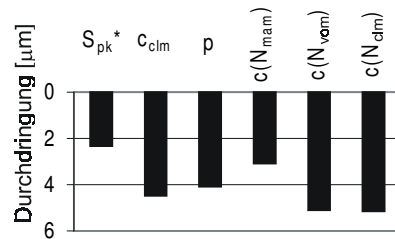


Bild 48: Vergleich der Werte von Kenngrößen zur Beschreibung charakteristischer Durchdringungen

In Bild 49 sind Perkolationsstiefe und c_{clm} über S_{pk}^* aufgetragen. Die Werte von c_{clm} liegen um etwa $0,5 \mu m$ versetzt zur Perkolationsstiefe.

Sollten diese Zusammenhänge für Blechoberflächen generell gültig sein, dann wäre es möglich, über die 2D-Kenngrößen R_{pk}^* und R_a die 3D-Kenngrößen V_{cl} , die Perkolationsstiefe und c_{clm} näherungsweise zu ermitteln. Damit ließe sich die Abgeschlossenheit auch anhand von 2D-Messungen beurteilen. Dazu muß überprüft werden, ob die hier beschriebenen Zusammenhänge deutlich genug sind, um 3D-Messungen ersetzen zu können.

Ausgehend von diesen Ergebnissen werden zusätzlich zu den in Kapitel 7.1 beschriebenen Kenngrößen die Werte von $\alpha_{vo}(c1=0,9 S_{pk}^*+2,4 \mu m)$ und $\alpha_{vo}(c2=S_{pk}^*+1,9$

In Bild 48 sind die über alle Filter gemittelten Werte dieser Kenngrößen gegenübergestellt. Die Schnitttiefe c_{clm} , in der die größten abgeschlossenen Leerflächenanteile auftreten, liegt deutlich tiefer als S_{pk}^* . Die Perkolationsstiefe liegt knapp über c_{clm} . Die Durchdringungen, bei denen die höchsten Anzahlen von Materialflächen vorkommen, liegen etwas höher und die, bei denen die höchsten Anzahlen von Leerflächen vorliegen, etwas tiefer als c_{clm} und p .

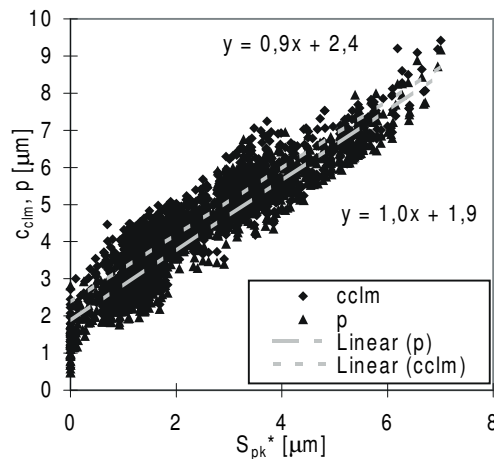


Bild 49: Zusammenhänge zwischen Spitzenhöhe und den Kenngrößen c_{clm} und p

μm) entsprechend den obigen Korrelationsgleichungen berechnet. Beim Vergleich der Oberflächenkenngrößen und der Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen in Kapitel 8 sind diese Kenngrößen zusätzlich berücksichtigt.

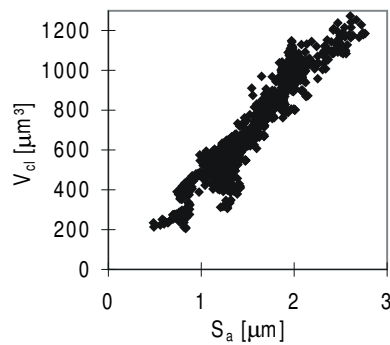


Bild 50: Zusammenhang zwischen Mittenrauhwert und geschlossenem Leervolumen

Ein weiterer relativ hoher Korrelationskoeffizient besteht in Bild 47 zwischen S_a und V_{cl} . In Bild 50 ist V_{cl} über S_a aufgetragen. Bei beliebigen Topografien können diese Kenngrößen nicht korrelieren. Es bestehen aber, wie diese Ergebnisse zeigen, herstellungsbedingte Zusammenhänge zwischen Leere und Abgeschlossenheit der Topografien, die auch eine Beurteilung der Abgeschlossenheit anhand der Kenngrößen der Leere zu ermöglichen scheinen.

Die Kenngrößen zur Beurteilung der Feinheit sind in Bild 51 dargestellt.

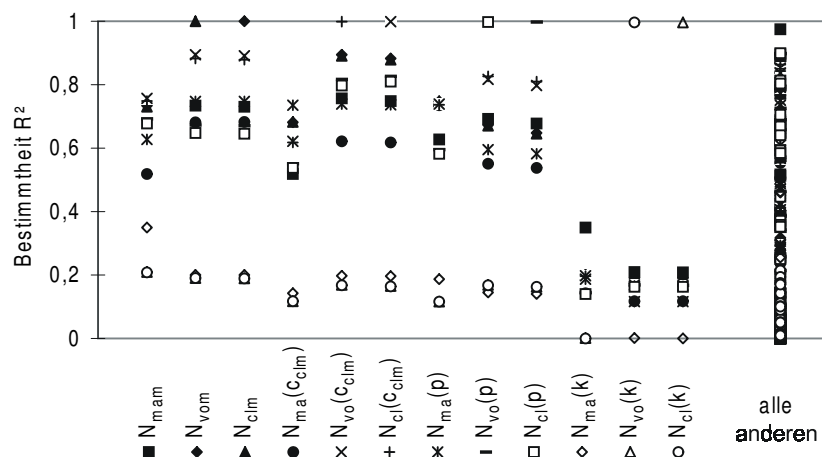


Bild 51: Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der Feinheit

Die Anzahlen von offenen und geschlossenen Leerflächen (N_{vo} und N_{cl}) korrelieren deutlich. Zur Beschreibung der Feinheit reicht deshalb eine dieser Kenngrößen aus. Die Anzahlen von Material und Leerflächen stimmen nicht so deutlich überein. Zur Beschreibung der Feinheit sollten demnach die Anzahl der Materialflächen und die Anzahl entweder der offenen oder der geschlossenen Leerflächen genutzt werden. Die in Bild 51 rechts dargestellten hohen Korrelationskoeffizienten zu anderen Kenngrößen ergeben sich mit den Anzahlen der Flächen bei festen Schnittiefen von 20

und 30% Materialanteil. Dies deutet darauf hin, daß die Schnittiefe keinen so deutlichen Einfluß auf die Kenngrößen der Feinheit ausübt, wie auf die Kenngrößen der Abgeschlossenheit. Es wird deshalb in Kapitel 8.3 überprüft, inwieweit diese mit geringerem Aufwand berechenbaren Kenngrößen bei vorgegebenen Materialanteilen zur Beurteilung des tribologischen Verhaltens geeignet sind.

Folgerungen

- 3D-Kenngrößen zur Beschreibung der Leere unterscheiden sich nicht von den entsprechenden 2D-Kenngrößen, da die gleichen Berechnungsmethoden verwendet werden. Zur Beschreibung der Leere und der Materialanteile sind keine 3D-Messungen erforderlich
- 3D-Spitzen- und Talzahlen beinhalten Informationen, die aus 2D-Messungen nicht berechnet werden können.
- Für die hier untersuchten Bleche bestehen Zusammenhänge zwischen 3D-Kenngrößen zur Beschreibung der Abgeschlossenheit und 2D-Kenngrößen. Ob die Korrelationen ausreichen, um die tribologischen Mechanismen abgeschlossener Schmieraschen über 2D-Kenngrößen zu quantifizieren, wird in Kap 8.3 überprüft.

8.2 Vergleich der tribologischen Kenngrößen

Die Reibungsuntersuchungen wurden mit der in Kapitel 6 beschriebenen Methode durchgeführt. Die Versuchsbedingungen sind in Tabelle 33 im Anhang angegeben.

Wie in Kapitel 6.4 beschrieben, wurden die Kenngrößen maximale Kontaktnormalspannung, Reibungszahl und Stick-Slip-Beginn bei jeweils 5 Gleitgeschwindigkeiten ermittelt. Die Reibungszahlen sind über alle Kontaktnormalspannungen einer Gleitgeschwindigkeit gemittelt und in **Bild 52** dargestellt.

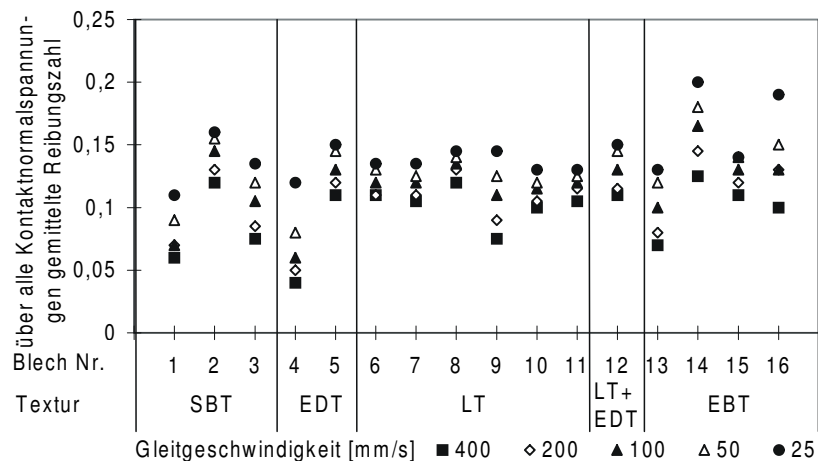


Bild 52: Reibungszahlen der untersuchten Bleche

Erste Folgerungen, die aus diesen Ergebnissen gezogen werden können sind:

- Die Reibungszahl wird deutlich von der Topografie beeinflusst.
- Das Herstellungsverfahren der Topografie läßt keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Reibungszahl erkennen.
- Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit nimmt die Reibungszahl erwartungsgemäß für alle Topografien ab. Sowohl mikro- als auch makrohydrodynamische Effekte können die Reduzierung der Reibungszahl erklären.

Bild 53 enthält die maximal erreichten Kontaktnormalspannungen der Bleche.

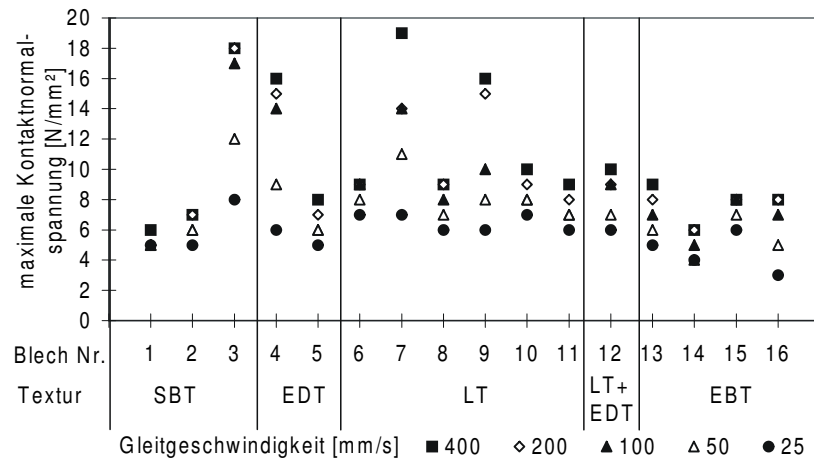


Bild 53: Maximale Kontaktnormalspannungen der untersuchten Bleche

Wie in der Reibungszahl unterscheiden sich die Bleche auch deutlich in der maximal erreichten Kontaktnormalspannung. Bleche eines Herstellungsverfahrens können sowohl niedrige als auch hohe Kontaktnormalspannungen erreichen.

Der Vergleich des Stick-Slip-Beginns in Bild 54 zeigt, daß auch die Belastung, ab der der Schmierfilm nicht mehr stabil ist, von der Topografie beeinflusst wird.

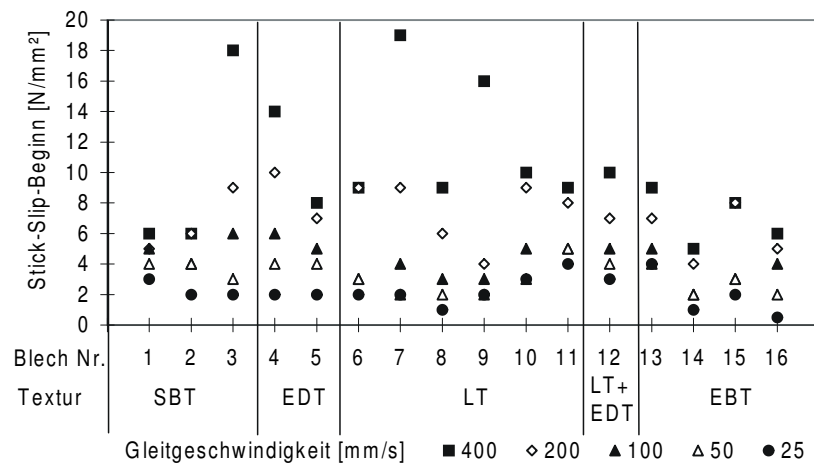


Bild 54: Stick-Slip-Beginn der untersuchten Bleche

In Bild 55 sind die Mittelwerte von Reibungszahl und Stick-Slip-Beginn jeweils über der maximalen Kontaktnormalspannung aufgetragen.

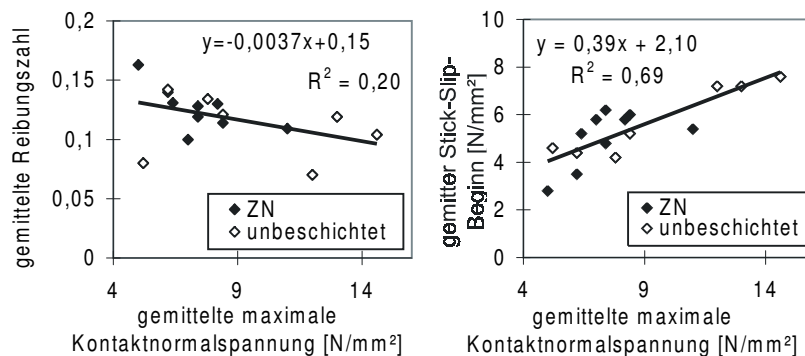


Bild 55: Zusammenhänge zwischen der Reibungszahl, Stick-Slip-Beginn und der maximalen Kontaktnormalspannung

Es ist ein leichter Trend zu erkennen, daß Bleche mit höheren Kontaktnormalspannungen niedrigere Reibungszahlen aufweisen. Die Bestimmtheit ist aber so gering, daß von keinem eindeutigen Zusammenhang gesprochen werden kann. Zur Beurteilung der Topografie werden deshalb beide Kenngrößen benötigt.

Kontaktnormalspannung und Stick-Slip-Beginn korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,69. Diese beiden Kenngrößen liefern deshalb eher eine ähnliche Information als maximale Kontaktnormalspannung und Reibungszahl. Um die Anzahl der zu untersuchenden Korrelationen im anschließenden Kapitel zu begrenzen, wird der Stick-Slip-Beginn dort nicht weiter berücksichtigt.

Um Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen bei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten aufzuzeigen, sind in Bild 56 die Korrelationskoeffizienten zwischen den maximalen Kontaktnormalspannungen bei den 5 untersuchten Gleitgeschwindigkeiten aufgetragen.

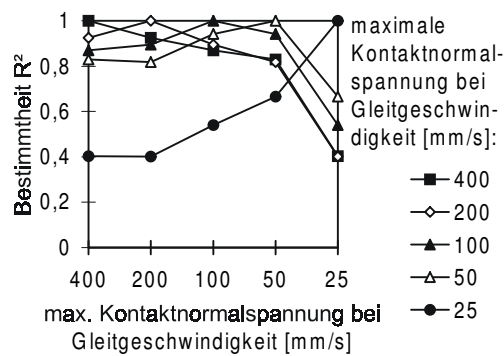


Bild 56: Zusammenhänge zwischen den Werten der maximalen Kontaktnormalspannung bei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten

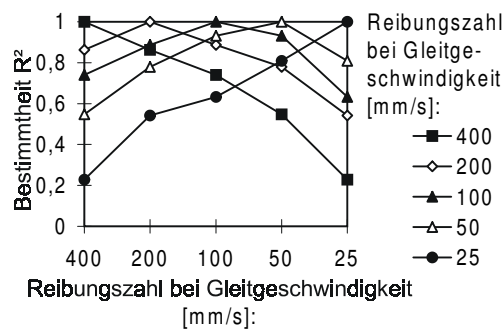


Bild 57: Vergleich der Reibungszahlen bei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten

Bei Gleitgeschwindigkeiten von 400 bis 50 mm/s korrelieren die maximalen Kontaktnormalspannungen deutlich. Bei 25 mm/s werden niedrigere Korrelationskoeffizienten zu den maximalen Kontaktnormalspannungen höherer Gleitgeschwindigkeit berechnet. Es ist demnach nicht erforderlich, zur Ermittlung der maximalen Kontaktnormalspannung alle Geschwindigkeiten zu untersuchen, eine höhere (50 mm/s und höher) und eine niedrige Gleitgeschwindigkeit (25 mm/s) sind ausreichend.

Die Zusammenhänge der Reibungszahlen in Bild 57 sind nicht so deutlich ausgeprägt wie die der maximalen Kontaktnormalspannungen. Zur Untersuchung der Reibungszahl ist die Variation der Geschwindigkeit in mehreren Schritten daher eher zweckmäßig als zur Ermittlung der maximalen Kontaktnormalspannung.

Um die Datenmenge zu reduzieren und die Ergebnisse übersichtlicher darzustellen, werden im folgenden die Mittelwerte über alle Gleitgeschwindigkeiten und die Standardabweichungen berechnet. Je größer die Standardabweichung, desto größer ist der Einfluß der Gleitgeschwindigkeit.

Tabelle 36 im Anhang enthält alle im Rahmen dieser Versuche ermittelten tribologischen Kenngrößen.

Ergebnis:

- Als wichtigste tribologische Kenngrößen werden die über die Gleitgeschwindigkeit gemittelten Werte der maximalen Kontaktnormalspannung und der Reibungszahl, sowie deren Standardabweichungen ausgewählt.

8.3 Vergleich der tribologischen und geometrischen Eigenschaften

In diesem Kapitel wird anhand der Versuchsergebnisse aus den Kapiteln 8.1 und 8.2 untersucht, welche Zusammenhänge zwischen Oberflächenkenngößen und tribologischen Kenngrößen bestehen.

Dazu sind drei Fragen zu klären:

1. Welche Oberflächenkenngößen ermöglichen die Beurteilung tribologischer Eigenschaften?
2. Welche tribologischen Kenngrößen können mit Oberflächenkenngößen in Verbindung gebracht werden?
3. Welche Filter sind geeignet?

Um Zusammenhänge aufzuzeigen, werden die Oberflächenkenngößen über den tribologischen Kenngrößen aufgetragen.

Bei der Auswertung wurden für die 16 Bleche alle 21 tribologischen Kenngrößen und 78 Oberflächenkenngößen bei 104 Filtern ausgewertet. Um die Anzahl der im folgenden darzustellenden Korrelationen einzuschränken, werden nur die 4 wichtigsten im vorigen Kapitel beschriebenen tribologischen Kenngrößen und 48 Oberflächenkenngößen berücksichtigt. Die ausgeschlossenen Kenngrößen haben nur in wenigen Fällen zu höheren Korrelationskoeffizienten geführt und werden im folgenden in diesen Einzelfällen gesondert aufgeführt. Damit verbleiben 19.968 näher zu untersuchende Korrelationen.

8.3.1 Untersuchung linearer Korrelationen

Um die darzustellenden Diagramme möglichst vollständig auszuwählen, wird für jede Kombination von Oberflächenkenngöße und tribologischer Kenngröße das Pearsonsche Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet.

Bild 58 enthält die Korrelationskoeffizienten für die Oberflächenkenngößen der Leere. Über jeder Kenngröße sind die Korrelationskoeffizienten zu den 4 wichtigsten tribologischen Kenngrößen für alle 104 Filter aufgetragen. Die Korrelation kann man als gut beurteilen, wenn mit mehreren Filtern hohe Werte erreicht werden. Werden nur von einzelnen Filtern hohe Korrelationskoeffizienten erreicht, dann ist zu überprüfen, ob es sich um zufällige Korrelationen handelt. Die Beurteilung der Filterung und die Auswahl der Filterparameter erfolgt in Kapitel 8.4. Für die im folgenden dargestellten Diagramme wird der Kugelfilter mit einem Radius von 2 mm und 50 eindringenden Punkten gewählt. Wie in Kapitel 8.4 beschrieben wird, sind für die meisten Kenngrößen mit diesen Filterparametern die Zusammenhänge am deutlichsten.

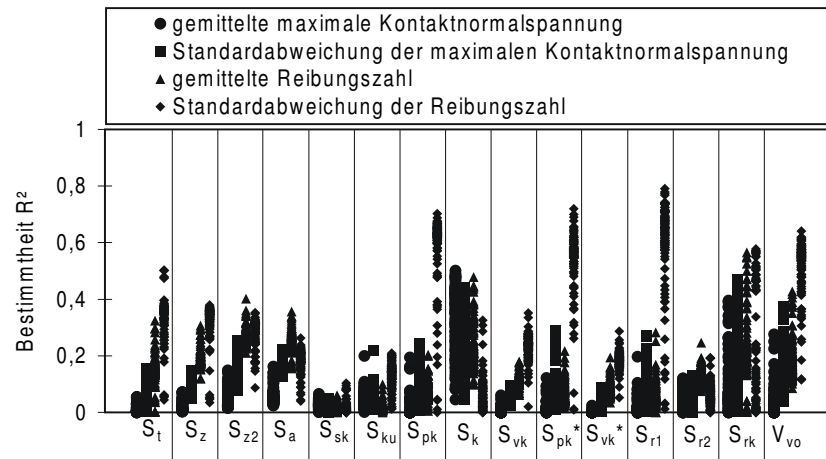


Bild 58: Zusammenhänge zwischen tribologischen Kenngrößen und den Oberflächenkenngrößen der Leere

Die höchsten Bestimmtheitsmaße mit den Kenngrößen der Leere werden von S_{pk} , S_{pk}^* , S_{r1} , S_{rk} und V_{vo} zur Standardabweichung der Reibungszahl erreicht. Bild 59 zeigt, daß ein deutlicheres Absinken der Reibungszahl bei höheren Geschwindigkeiten zu beobachten ist, wenn schmale (niedrige S_{r1}) und gleichzeitig niedrige Spitzen (niedrige S_{pk}) vorliegen.

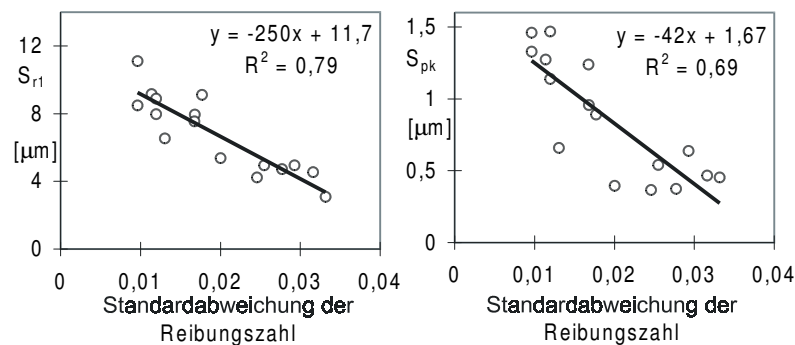


Bild 59: Materialanteil an der Basis der Spitzen und reduzierte Spitzenhöhe über der Standardabweichung der Reibungszahl

Geringe Leervolumina (Kenngröße V_{vo}) führen ebenfalls zu einem deutlichen Absinken der Reibungszahl bei zunehmender Geschwindigkeit. Dieser Zusammenhang ist auf die in Kapitel 8.1 beschriebene Korrelation zwischen der Höhe der Spitzen und dem Leervolumen zurückzuführen.

Zu den übrigen tribologischen Kenngrößen bestehen in Bild 58 nur relativ geringe Korrelationskoeffizienten. Zum Niveau der Reibungszahl ist die Bestimmtheit mit S_{rk} noch am höchsten.

Eine Topografie, für die der Kugelfilter einen hohen Traganteil berechnet, weist nach Bild 60 niedrigere Reibungszahlen auf. Der Kugelfilter berechnet einen höheren Traganteil, wenn die Topografie aus vielen flachen und fein verteilten Spitzen besteht. Niedrige Reibung wird demnach eher mit einer feinen und vollen Topografie erzielt. Die Bestimmtheit ist aber nur schwach. Hinzu kommt, daß die Zusammenhänge mit den Filterparametern $R=2$ mm und $n=50$ nicht deutlich werden. In den Meßdaten ist kein klarer linearer Zusammenhang zwischen den Kenngrößen der Leere und der Reibungszahl vorhanden.

Zur gemittelten maximalen Kontaktnormalspannung wird in Bild 58 mit S_k die deutlichste Korrelation berechnet.

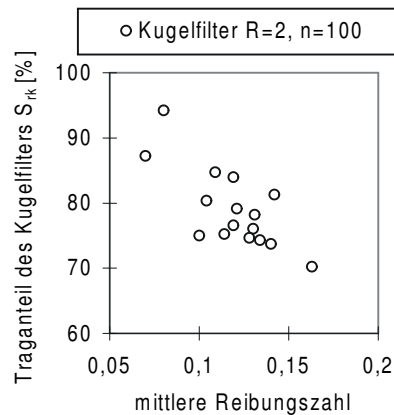


Bild 60: Zusammenhang zwischen dem Traganteil des Kugelfilters und der Reibungszahl

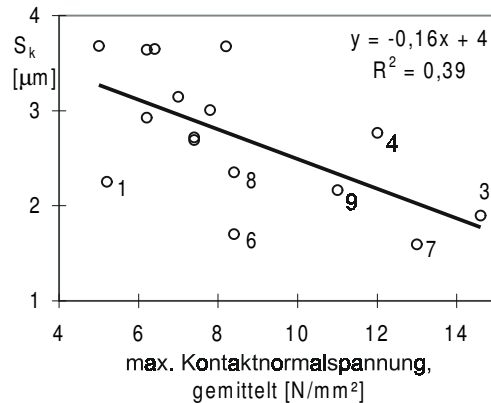


Bild 61: Zusammenhang zwischen der Kernrauhtiefe und der maximalen Kontaktnormalspannung

mit niedrigen S_k -Werten hohe Kontaktnormalspannungen erreichen ist der Einfluß überlagert, daß hohe Spitzen zu niedrigeren und flachere Spitzen zu höheren Kontaktnormalspannungen führen.

Es ist ein leichter Trend festzustellen, daß mit niedrigeren S_k -Werten höhere Kontaktnormalspannungen vorliegen (Bild 61). Die stochastischen Bleche mit niedrigen Spitzen (3 und 4) liegen über der Trendlinie, die Lasertex-Bleche mit hohen Spitzen (6, 7 und 8) darunter. Blech 9 ist ein Lasertex-Blech mit niedrigen Spitzen. Das ist ein Hinweis darauf, daß Bleche mit niedrigen S_k -Werten eher hohe Kontaktnormalspannungen erreichen, wenn gleichzeitig niedrige Spitzen (S_{pk}) vorliegen. Dem Trend, daß Bleche

Die Bleche 6, 7 und 8 sind etwas dicker (Tabelle 19). Bei gleicher Topografie müßte dies aufgrund der Überlegungen in Kapitel 6.1 eher zu höheren Kontaktnormalspannungen führen. Daß diese Bleche trotzdem niedrigere Kontaktnormalspannungen erreichen läßt erwarten, daß hohe Spitzen die maximale Kontaktnormalspannung eher noch deutlicher senken.

Blech 1 zeigt trotz niedriger S_k -Werte keine hohen Kontaktnormalspannungen. Es weist ähnliche S_k - und S_{pk} -Werte wie die Bleche 3 und 4 auf, hat aber das geringste Leervolumen aller Bleche. Im Reibversuch führte es zu Aufschweißungen auf dem Werkzeug und damit zu vorzeitigem Versagen, was durch die nicht erreichte Mindestrauheit erklärt werden kann.

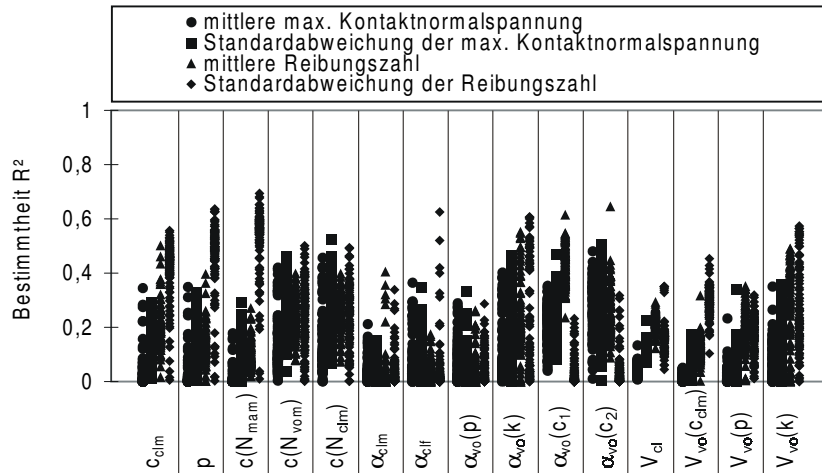


Bild 62: Zusammenhänge zwischen den tribologischen Kenngrößen und den Oberflächenkenngrößen der Abgeschlossenheit

Die Kenngrößen der Abgeschlossenheit in Bild 62 korrelieren ebenfalls am besten mit der Standardabweichung der Reibungszahl, es sind aber keine deutlicheren Korrelationen als mit den Kenngrößen der Leere vorhanden. Dieses Ergebnis zeigt, daß die Beurteilung der Abgeschlossenheit alleine nicht zur Beurteilung der tribologischen Eigenschaften der Topografie ausreicht. Im anschließenden Kapitel (Bild 67) wird gezeigt, daß die von der Abgeschlossenheit beeinflussten tribologischen Mechanismen von anderen Effekten überlagert sind, so daß die Zusammenhänge durch die Berechnung des Korrelationskoeffizienten nicht erkennbar werden.

Aus den Kenngrößen der Feinheit (Bild 63) korrelieren N_{mam} und $N_{ma(k)}$ mit der Standardabweichung der Reibungszahl.

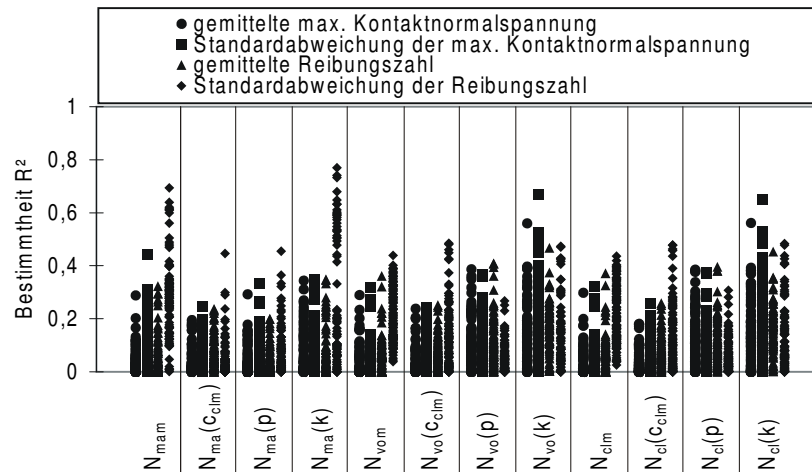


Bild 63: Zusammenhänge zwischen den tribologischen Kenngrößen und den Oberflächenkenngrößen der Feinheit

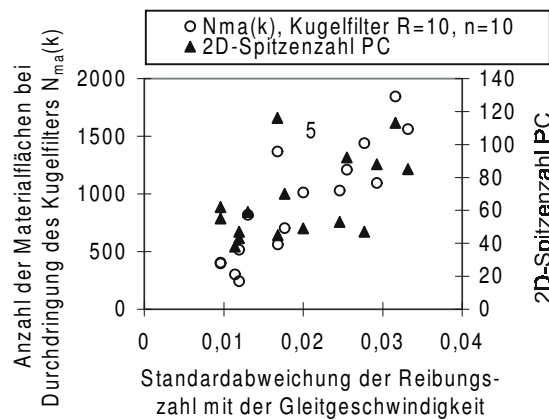


Bild 64: 2D- und 3D-Spitzenzahlen über der Standardabweichung der Reibungszahl

Höhere Spitzenzahlen führen zu einer höheren Standardabweichung der Reibungszahl (Bild 64). Das bedeutet, daß der Einfluß der Gleitgeschwindigkeit größer ist, wenn das Blech viele fein verteilte Spitzen aufweist. Die Betrachtung der Reibungszahldiagramme ergab, daß die Reibungszahl bei den feinen Topografien mit höheren Geschwindigkeiten deutlicher absinkt als bei groben. Mit den Filterparametern $R=2$

mm und $n=50$ wird dieser Zusammenhang nicht deutlich.

In Bild 64 wurde zusätzlich zur 3D-Kenngröße $N_{ma}(k)$ die 2D-Spitzenzahl PC aufgetragen. Die 3D-Kenngröße korreliert deutlich besser.

Mit der maximalen Kontaktnormalspannung und deren Standardabweichung korrelieren in Bild 63 $N_{vo}(k)$ und $N_{cl}(k)$ noch am besten. Höhere Anzahlen von Leerflächen

führen zu günstigeren tribologischen Bedingungen, aber die Korrelation ist nur schwach.

Ergebnis:

- In Kapitel 6 wurde die maximale Kontaktnormalspannung als wichtigste tribologische Kenngröße beurteilt. Die deutlichste Korrelation dieser Kenngröße zur Topografie wird von S_k und dem Kugelfilter mit einer Bestimmtheit $R^2=0,55$ erreicht. Die höchste Korrelation mit einem konventionellen Filter besteht ebenfalls mit S_k . Bei Gauß-Filterung mit einer Grenzwellenlänge von 0,9 beträgt R^2 0,48.

Diese Werte der Korrelationskoeffizienten sind ausreichend, um Trends aufzuzeigen, zur eindeutigen Beurteilung der tribologischen Eigenschaften genügen sie aber nicht.

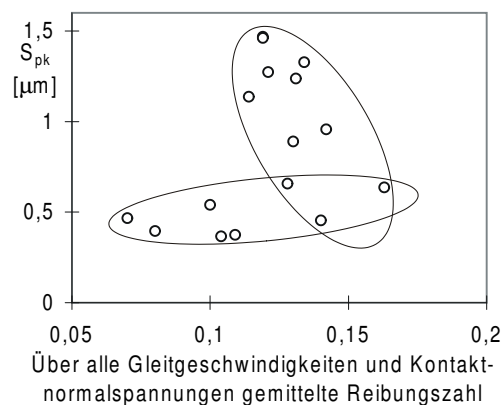
Im folgenden Kapitel wird deshalb untersucht, ob komplexere Zusammenhänge zwischen den Oberflächenkenngrößen und dem tribologischen Verhalten vorliegen, die vom linearen Bestimmtheitsmaß R^2 nicht erfaßt werden.

8.3.2 Ausgewählte Diagramme

Zwei Ursachen können für die niedrigen in Kapitel 8.3.1 ermittelten Korrelationskoeffizienten vorliegen.

1. Der Pearsonsche Korrelationskoeffizient R^2 berücksichtigt nur lineare Zusammenhänge.
2. Sind aufgrund unterschiedlicher tribologischer Mechanismen in einem Diagramm mehrere Trends vorhanden, dann werden diese von R^2 nicht erfaßt.

Um komplexere Zusammenhänge aufzuzeigen, werden im folgenden ausgewählte Diagramme näher diskutiert. Die Auswahl der Diagramme erfolgt zum einen auf der Basis früherer Ergebnisse und zum anderen aufgrund der in Kapitel 5 vorgestellten Ergebnisse.



Ein interessantes Ergebnis bietet die Darstellung der Spitzenhöhe S_{pk} über der gemittelten Reibungszahl (Bild 65).

Zwei Gruppen bilden sich aus. Bei S_{pk} -Werten von 1 und größer treten mit steigenden S_{pk} -Werten niedrigere Reibungszahlen auf. Bei S_{pk} -Werten unter 1 werden deutlich unterschiedliche Reibungszahlen gemessen, die nicht mit S_{pk} in Zusammenhang stehen.

Bild 65: Einfluß der reduzierten Spitzenhöhe auf die Reibungszahl

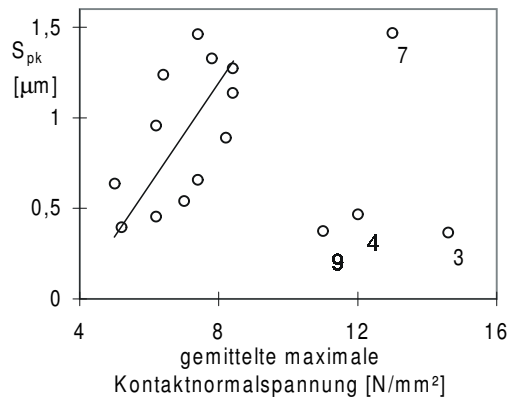


Bild 66: Zusammenhang zwischen der reduzierten Spitzenhöhe und der maximalen Kontaktnormalspannung

Die Darstellung von S_{pk} über der maximalen Kontaktnormalspannung ergibt einen ähnlichen Zusammenhang (Bild 66). Hohe S_{pk} -Werte führen mit steigenden S_{pk} -Werten zu höheren Kontaktnormalspannungen. Bei niedrigen Werten ist das tribologische Verhalten unabhängig von S_{pk} . Daraus kann man schließen, daß bei niedrigen S_{pk} -Werten ein anderer tribologischer Mechanismus wirken muß. Dieser Mechanismus kann der in Bild 61 beschriebene Einfluß niedriger S_k -Werte sein.

Eine weitere Erklärung für die deutlich unterschiedlichen tribologischen Eigenschaften von Blechen niedriger S_{pk} -Werte in Bild 65 und 66 kann die Ausbildung hydrostatisch wirkender Schmieraschen sein. Um dies zu überprüfen, ist in Bild 67 das Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils über der gemittelten maximalen Kontaktnormalspannung aufgetragen.

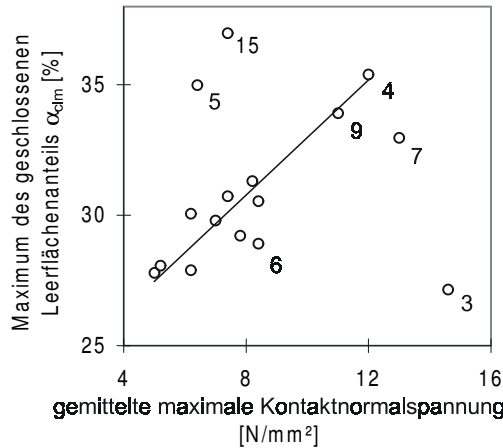


Bild 67: Einfluß des maximalen geschlossenen Leerflächenanteils auf die maximale Kontaktnormalspannung

Mit Ausnahme der Bleche 3, 5 und 15 zeigen Bleche mit größeren Anteilen geschlossener Leerflächen höhere Kontaktnormalspannungen. Blech 3 erreicht trotz eines geringen Anteils abgeschlossener Leerflächen hohe Kontaktnormalspannungen. Bei diesem Blech scheinen sich die abgeschlossenen Schmieraschen nicht auszuwirken, da die niedrigen S_k -Werte bereits die hohen Kontaktnormalspannungen ermöglichen. Bei den Blechen 6 und 7, die ebenfalls niedrige S_k -Werte aufweisen, werden gegenüber dem Trend der übrigen Bleche leicht erhöhte maximale

KontaktNormalspannungen gemessen. Hier könnte sich die Wirkung der geschlossenen Leerflächen mit der Wirkung niedriger S_k -Werte überlagern.

Die Bleche 5 und 15 erreichen nicht die dem Trend entsprechenden hohen KontaktNormalspannungen. Für Blech 15 wurden deutliche Unterschiede zwischen der Topografie auf Ober- und der Unterseite des Bleches festgestellt. Blech 5 liegt wie bereits in Bild 64 nicht im Trend der übrigen Bleche.

Zur Überprüfung, ob der in Bild 67 festgestellte Zusammenhang zu α_{clm} auch durch einfacher oder sicherer zu berechnende Oberflächenkenngößen vorhanden ist, wurden in Kapitel 8.1 weitere Kenngrößen definiert. In Bild 68 sind deren Korrelationen zur maximalen KontaktNormalspannung dargestellt.

Um nur Bleche zu berücksichtigen, für die der in Bild 67 festgestellte Zusammenhang sicher gilt, wurden die Bleche 1, 3, 5, 6, 7 und 15 nicht mit aufgenommen.

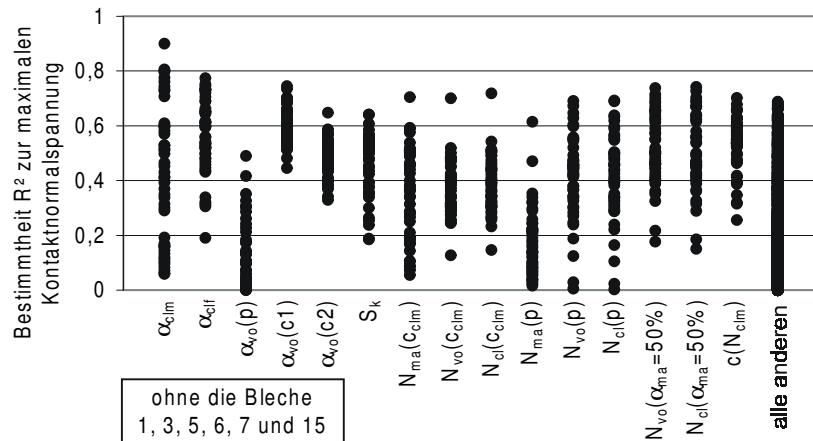


Bild 68: Vergleich weiterer Kenngrößen mit dem Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils α_{clm}

Obwohl die Berechnungsmethode von α_{clm} die in Kapitel 7.1 beschriebenen Nachteile und Unsicherheiten aufweist, werden mit keiner anderen Kenngröße entsprechend hohe Korrelationskoeffizienten erreicht, so daß bei geeigneter Filterung die Auswertung der geschlossenen Leerfläche α_{clm} vorzuziehen ist.

Mit der Kenngröße α_{clf} hängt das Ergebnis nicht so deutlich von der Filterung ab wie bei α_{clm} . Bei einigen Filtern werden mit α_{clm} Korrelationskoeffizienten unter 0,2 berechnet, während mit α_{clf} nur wenige Filter zu Werten unter 0,4 führen. Noch unabhängiger von der Filterung ist die Korrelation mit der Oberflächenkenngöße $\alpha_{vo}(c1)$. Die höchsten mit $\alpha_{vo}(c1)$ berechneten Korrelationskoeffizienten liegen aber unter denen von α_{clf} und α_{clm} .

Relativ hohe Korrelationskoeffizienten bestehen noch mit den Anzahlen der Leerflächen. Bei der Tiefe des maximalen geschlossenen Leerflächenanteils c_{clm} führt nur jeweils ein Filter zu höheren Korrelationskoeffizienten, weshalb diese Kenngrößen nicht weiter berücksichtigt werden. Bei Perkolationstiefe und bei einem Materialanteil von 50% wird mit mehreren Filtern ein Zusammenhang zur Feinheit der Topografie deutlich. Bild 69 zeigt den Trend, daß mit höheren Leerflächenzahlen höhere Kontaktnormalspannungen erreicht werden.

Die Anzahl der Leerflächen ist, wenn man von fertigungsbedingten Einschränkungen absieht, vom Anteil der geschlossenen Leerflächen unabhängig. Hohe Kontaktnormalspannungen werden erreicht, wenn sowohl hohe Anteile als auch hohe Anzahlen geschlossener Leerflächen vorliegen.

Ergebnisse:

1. Bei hohen S_{pk} -Werten (hohen Spitzen) werden mit zunehmender Spitzenhöhe niedrigere Reibungszahlen und höhere Kontaktnormalspannungen erreicht. Bei niedrigen Spitzen ist das tribologische Verhalten unabhängig von S_{pk} . (Bilder 65 u. 66)
2. Bei Blechen mit niedrigen S_{r1} -Werten (Materialanteil an der Basis der Spitzen beim Übergang zum Kernprofil) sinkt die Reibungszahl mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit stärker ab als bei Spitzen mit hohem Materialanteil. (Bild 59)
3. Topografien mit niedrigen S_k -Werten (geringe Kernrauheit) führen zu höheren maximalen Kontaktnormalspannungen als Topografien mit hohen S_k -Werten. (Bild 61)
4. Zu geringe Werte von R_a oder V_{cl} (Mittenrauhwert oder geschlossenes Leervolumen) können zu vorzeitigem Versagen des tribologischen Systems durch Aufschweißung des Blechwerkstoffs auf das Werkzeug führen. (Blech 1, Bild 61)
5. Mit höheren Werten von α_{clm} (Anteilen abgeschlossener Leerflächen) werden höhere maximale Kontaktnormalspannungen erreicht. Weder die in Kapitel 8.1 aus den 2D-Messungen abgeleiteten Kenngrößen, noch die Kenngrößen α_{clf} , oder der Leerflächenanteil bei Perkolationstiefe $\alpha_{vo}(p)$ können den Zusammenhang besser wiedergeben als α_{clm} . (Bild 67)
6. Das Absinken der Reibungszahl bei höheren Gleitgeschwindigkeiten wird durch hohe $N_{ma}(k)$ (Anzahlen von Materialflächen) begünstigt. (Bild 64)
7. Höhere Werte von $N_{vo}(p)$ (Anzahl der Leerflächen bei Perkolationstiefe) führen zu höheren maximalen Kontaktnormalspannungen. (Bild 69)

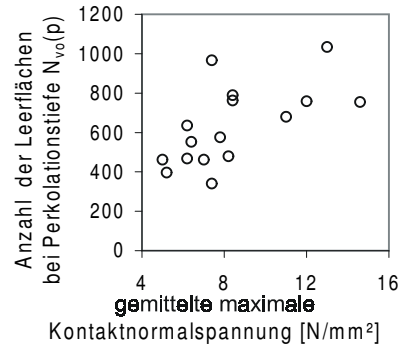


Bild 69: Zusammenhang zwischen der Anzahl der Leerflächen und der maximalen Kontaktnormalspannung

8.4 Vergleich der Filter

8.4.1 Filterparameter des Kugelfilters

Die Bilder 58, 62 und 63 zeigen, daß die Höhe der Korrelationskoeffizienten deutlich von der Filterung der Meßdaten abhängt. Im folgenden wird untersucht, welche Filter und welche Filterparameter auszuwählen sind, um deutliche Korrelationen zu erreichen.

Zum Kugelfilter liegen bisher noch keine Erkenntnisse über geeignete Filterparameter vor. In einem ersten Schritt wird deshalb beurteilt, bei welchen Radien und Anzahlen eindringender Punkte mit dem Kugelfilter hohe Korrelationskoeffizienten berechnet werden. Zusätzlich ist zu untersuchen, ob die Ergebnisse stabil sind, oder ob bereits kleine Änderungen der Filterparameter die Korrelation stark herabsetzen.

Bild 70 zeigt ein Kennfeld des Kugelfilters, in dem der über alle Bleche gemittelte Traganteil des Kugelfilters als Funktion von Radius und Anzahl der eindringenden Punkte dargestellt ist.

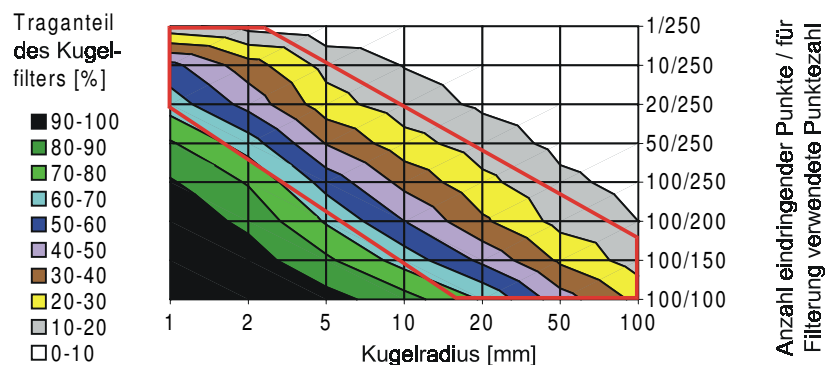


Bild 70: Mit dem Kugelfilter berechnete Traganteile am Beispiel von Blech 10

Kleine Radien und viele eindringende Punkte simulieren eine starke Einglättung der Topografie. Je nach Beanspruchung liegen für die Blechumformung typische Einglättungen bei 0 bis maximal etwa 70% Materialanteil. Filterparameter, die eine stärkere Einglättung simulieren, sollten nicht verwendet werden. Nach diesem Kriterium geeignete Filterparameter sind in Bild 70 rot eingerahmt.

In Tabelle 21 ist die Bestimmtheit R^2 für die sieben zuvor beschriebenen Kenngrößen dargestellt.

Bestimmtheit R^2		Kugelradius [mm]							Anzahl eindringender Punkte / Punktezahl Filterung
		1	2	5	10	20	50	100	
1	Oberflächenkenngröße: S_{pk} reduzierte Spitzenhöhe tribologische Kenngröße: Standardabweichung der Reibungszahl								1/250 10/250 20/250 50/250 100/250 100/200 100/150 100/100
2	Oberflächenkenngröße: S_{r1} Materialanteil an der Basis der Spitzen tribologische Kenngröße: Standardabweichung der Reibungszahl								1/250 10/250 20/250 50/250 100/250 100/200 100/150 100/100
3	Oberflächenkenngröße: S_{rk} Materialanteil bei Kugelfiltertiefe tribologische Kenngröße: gemittelte Reibungszahl								1/250 10/250 20/250 50/250 100/250 100/200 100/150 100/100
4	Oberflächenkenngröße: S_k Kernrautiefe tribologische Kenngröße: maximale Kontaktnormalspannung								1/250 10/250 20/250 50/250 100/250 100/200 100/150 100/100
5	Oberflächenkenngröße: α_{clm} Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils tribologische Kenngröße: maximale Kontaktnormalspannung (10 Bleche)								1/250 10/250 20/250 50/250 100/250 100/200 100/150 100/100
6	Oberflächenkenngröße: $N_{ma}(k)$ Anzahl der Materialflächen bei Kugelfiltertiefe tribologische Kenngröße: Standardabweichung der Reibungszahl								1/250 10/250 20/250 50/250 100/250 100/200 100/150 100/100
7	Oberflächenkenngröße: $N_{vo}(p)$ Anzahl der Leerflächen bei Perkolationsstiefe tribologische Kenngröße: maximale Kontaktnormalspannung (10 Bleche)								1/250 10/250 20/250 50/250 100/250 100/200 100/150 100/100

Tabelle 21: Einfluß der Filterparameter auf die Höhe der Korrelationskoeffizienten

Für den Zusammenhang von S_{pk} mit der Standardabweichung der Reibungszahl (Zeile 1) werden über einen großen Bereich hohe Korrelationskoeffizienten berechnet. Bei Radien ab 10 mm oder ab 50 eindringenden Punkten ist die Korrelation deutlich. Bei kleineren Radien und gleichzeitig weniger eindringenden Punkten rollt die Kugel über einzelne Spitzen der Topografie hinweg und sinkt zwischen den Spitzen in die Topografie ein, was zu Verzerrungen der berechneten Welligkeit und damit zu niedrigen Korrelationskoeffizienten führt.

Ein ähnliches Ergebnis wird in der Zeile 2 von Tabelle 21 für die Korrelation von S_{r1} zur Standardabweichung der Reibungszahl deutlich.

Die Korrelation von S_{rk} zur mittleren Reibungszahl (Zeile 3) ist nur in einem schmalen Band erhöht. Die in diesem Bereich vom Kugelfilter simulierte Einglättung liegt bei einem Materialanteil von ca. 90%. Dieser Wert ist so hoch, und das Band der geeigneten Filterparameter so schmal, daß vor der Verwendung dieser Kenngröße die Zusammenhänge näher untersucht werden sollten.

S_k korreliert mit der maximalen Kontaktnormalspannung in einem relativ weiten Bereich der Filterparameter, aber mit relativ niedrigen Werten von R^2 (Zeile 4).

Die deutlichste Korrelation des Maximums des geschlossenen Leerflächenanteils α_{clm} mit der maximalen Kontaktnormalspannung (Zeile 5), zeigt sich für einen Radius von 2 mm und bei 50 eindringenden Punkten. Bei Abweichung von diesen Werten nehmen die Korrelationskoeffizienten relativ langsam ab.

Für die Berechnung der Kennzahlen der Feinheit (Zeilen 6 und 7) ergeben sich die höchsten Korrelationskoeffizienten für andere Filterparameter als bei den vorhergehenden Kenngrößen. Bei kleineren Radien und mehr eindringenden Punkten sinken die Korrelationskoeffizienten besonders für $N_{ma}(k)$ relativ schnell ab.

Folgerungen

- Die hohen mit dem Kugelfilter berechneten Korrelationskoeffizienten sind nicht zufällig über dem Kennfeld verteilt. Je nach Kenngröße bestehen mehr oder weniger große Bereiche mit deutlichen Korrelationen.
- Die höchsten Bestimmtheitsmaße R^2 liegen in allen Fällen in einem Feld von $R=2$ bis 10 mm und $n=10$ bis 100 eindringenden Punkten.
- Die Ergebnisse weisen darauf hin, daß die Meßdaten zur Berechnung unterschiedlicher Kenngrößen unterschiedlich gefiltert werden sollten. Für die Kenngrößen der Feinheit sollten dann die Filterparameter $R=10$ mm und $n=10$, für alle anderen Kenngrößen $R=2$ mm, $n=50$ verwendet werden.

8.4.2 Vergleich des Kugelfilters mit konventionellen Filtern

Zum Vergleich des Kugelfilters mit konventionellen Filtern wurden jeweils die höchsten Korrelationskoeffizienten eines konventionellen Filters (Rechteck-, Doppel-Rechteck-, Gauß-, oder Doppel-Gauß-Filter) und eines Kugelfilters in Bild 71 gegenübergestellt.

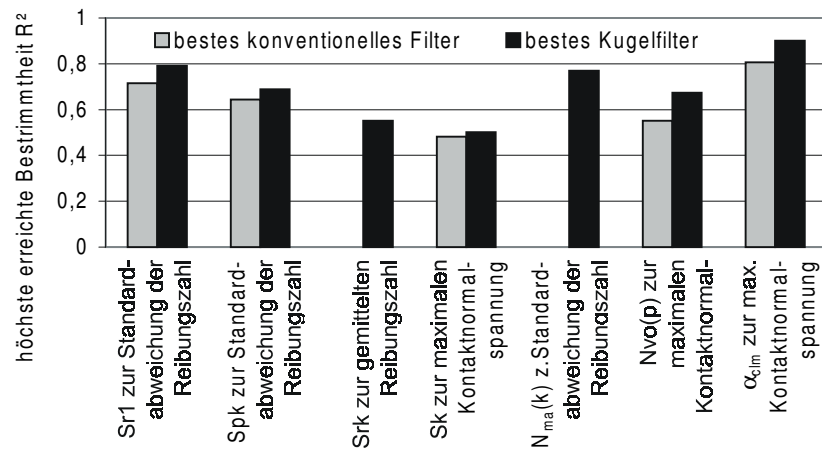


Bild 71: Vergleich der Korrelationskoeffizienten von Kugelfilter und konventionellen Filtern

In allen Fällen führt der Kugelfilter zu den höchsten Korrelationskoeffizienten. Die Kenngrößen S_{rk} und $N_{ma}(k)$ sind nur mit dem Kugelfilter bestimmbar.

In Tabelle 22 sind die Filter und Filterparameter zu den jeweils höchsten Korrelationskoeffizienten angegeben.

		Abbildung	bestes konventionelles Filter		bestes Kugelfilter	
			Filter	cut-off [mm]	Radius [mm]	eindr. Punkte
1	S_{pk} und Standardabweichung der Reibungszahl	59	Gauß	0,3	2	50
2	S_{r1} und Standardabweichung der Reibungszahl	59	Doppel-Rechteck	0,3	2	50
3	S_{rk} und mittlere Reibungszahl	60	-	-	2	100
4	S_k und maximale Kontaktnormalspannung	61	Gauß	0,9	10	100
5	α_{clm} und maximale Kontaktnormalspannung	67	Doppel-Gauß	0,3	2	50
6	$N_{ma}(k)$ und Standardabweichung der Reibungszahl	64	-	-	10	10
7	$N_{vo}(p)$ und maximale Kontaktnormalspannung	69	Rechteck	0,6	2	20

Tabelle 22: Filterparameter, die zu den höchsten Korrelationskoeffizienten zwischen tribologischen Kenngrößen und Oberflächenkenngrößen führen

Mit den konventionellen Filtern ergibt sich das beste Ergebnis jeweils mit einem anderen Filter oder einer anderen Grenzwellenlänge. Beim Kugelfilter führen in drei Fällen ein Radius von 2 mm und 50 eindringende Punkte zu den höchsten Korrelationskoeffizienten.

Für die praktische Anwendung sollte möglichst nur ein Filter verwendet werden, der für alle Kenngrößen gleichermaßen geeignet ist. Der Filter, der für die beschriebenen Korrelationen den höchsten Durchschnittswert berechnet, ist der Kugelfilter mit einem Radius von 2 mm bei 50 eindringenden Punkten. Unter den konventionellen Filtern erreicht der Doppel-Gauß-Filter mit einer Grenzwellenlänge von 0,3 mm den höchsten Durchschnittswert.

Reduzierung von Punktezahl und Rechenzeit

Die Kugelfilterung ist deutlich rechenintensiver als die konventionelle Filterung. In Tabelle 23 sind die Rechenzeiten gegenübergestellt. Die Berechnungen wurden auf einem PC mit Pentium 133 - Prozessor und der Software TopoGraf durchgeführt. Die Filteralgorithmen dieser Software sind hinsichtlich der Rechenzeit nicht optimiert, so daß auch kürzere Rechenzeiten möglich sein können.

Rechenzeit zur Filterung [s]	Kugelfilter			Gauß-Filter	
	R=100 mm n = 50	R = 2 mm n = 50	R = 2 mm n = 1	$\lambda_c =$ 0,3 mm	$\lambda_c =$ 0,6 mm
250 x 250 Punkte	14400	5248	1080	72	249
200 x 200 Punkte	6240	2220	447	30	107
150 x 150 Punkte	1907	649	138	11	34
100 x 100 Punkte	372	128	30	3	7

Tabelle 23: Zur Filterung benötigte Rechenzeit

Beim Kugelfilter führt bereits eine geringe Reduzierung der Punktezahl zu deutlich niedrigeren Rechenzeiten. Deshalb wurde untersucht, wie sich die Reduzierung der Punktezahl auf die Korrelation der Oberflächenkenngrößen zum tribologischen Verhalten auswirkt. In Bild 72 sind die höchsten Korrelationskoeffizienten aller Filter und aller Kenngrößen über der verwendeten Punktezahl aufgetragen.

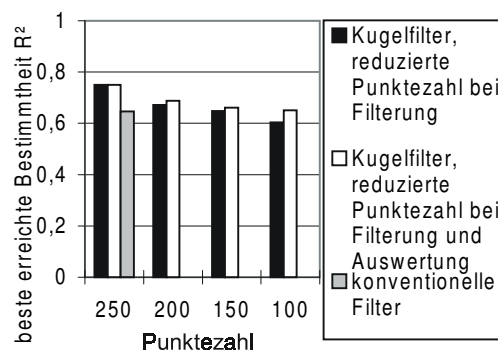


Bild 72: Einfluß der Reduzierung der Punktezahl

Ohne Reduzierung der Punktezah wird mit dem Kugelfilter ein maximaler Korrelationskoeffizient von $R^2=0,75$, mit den konventionellen Filtern von $R^2=0,65$ erreicht. Für 200 Punkte liegen die Werte des Kugelfilters noch über denen der konventionellen Filter. Bei 150 Punkten ergeben beide Filter etwa die gleichen Korrelationskoeffizienten.

Auch in den Diagrammen in Tabelle 21 treten die höchsten Korrelationskoeffizienten in keinem Fall bei reduzierter Punktezah auf.

Bei den konventionellen Filtern ist aufgrund der auch bei voller Punktezah geringen Rechenzeit keine Reduzierung erforderlich. Da die konventionelle Filterung mit 250 x 250 Punkten schneller durchzuführen ist als die Kugelfilterung mit 150 x 150 Punkten, bietet die Reduzierung der Punktezah bei Kugelfilterung keine Vorteile.

Folgerungen

- Wenn genaue Ergebnisse benötigt werden, dann sollte die Kugelfilterung mit der vollen Punktezah durchgeführt werden.
- Bei geringeren Anforderungen an die Genauigkeit bieten die konventionellen Filter eine kürzere Rechenzeit als der Kugelfilter mit reduzierter Punktezah
- Der deutliche Anstieg der Korrelationskoeffizienten des Kugelfilters zwischen 200 x 200 und 250 x 250 Punkten läßt erwarten, daß Punktezahlen über 250 x 250 zu noch deutlicheren Korrelationen führen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten höhere Punktezahlen nicht untersucht werden, da das verwendete Meßgerät maximal 250 Schnitte ermöglicht.

9 Überprüfung des Reibmodells anhand der Versuchsergebnisse

Die aus den Wirkmechanismen der Topografie in Kapitel 5 abgeleiteten Anforderungen an Topografien werden durch die Versuchsergebnisse bestätigt und ergänzt.

1. Hohe Spitzen

In Kapitel 5 wurden hohe Spitzen günstig beurteilt, da sie durch hohe zu verdrängende Schmierstoffvolumina hohe hydrodynamische Anteile durch Quetschströmungen ermöglichen. Mit der Kenngröße S_{pk} (R_{pk} nach DIN ISO 13565-2) ist in den Bildern 65 und 66 ein Trend zu erkennen, daß höhere Spitzen sowohl zu höheren maximalen Kontaktnormalspannungen als auch zu niedrigeren Reibungszahlen führen. Bei niedrigen Spitzen werden deutlich unterschiedliche tribologische Eigenschaften gemessen, die nicht durch die Höhe der Spitzen erklärt werden können. Nach den Überlegungen in Kapitel 5 begünstigen niedrige Spitzen hydrostatisch wirkende Schmiertaschen sowie hydrodynamisch wirkende Flanken und Stufen. Bei hohen Spitzen dominiert demnach der Einfluß der Quetschströmungen, bei niedrigen Spitzen dominieren die Einflüsse von Schmiertaschen, Stufen und Flanken. Die höchsten Kontaktnormalspannungen und niedrigsten Reibungszahlen wurden an den Blechen mit niedrigen Spitzen gemessen. Der Vergleich der Oberflächenkenngößen in Kap 8.1 hat eine deutliche Korrelation zwischen der Spitzenhöhe und dem Leervolumen der Topografie sowie der 2D-Kenngröße R_{pm} ergeben. Daß hohe Spitzen zu günstigem tribologischen Verhalten führen können, entspricht demnach den Ergebnissen in der Literatur, in denen hohe R_{pm} -Werte als reibungssenkend ermittelt wurden.

2. Schmale Spitzen

Um sowohl die Drücke durch Quetschströmungen als auch durch Flanken, Stufen und abgeschlossene Schmiertaschen nutzen zu können, wurden hohe, aber leicht einglättende Spitzen als günstig angesehen. Dazu sollten die Materialanteile der Spitzen an der Basis gering sein. Der Materialanteil der Spitzen am Übergang zum Kernprofil wird nach DIN ISO 13565-2 mit der Oberflächenkenngöße M_{r1} ($=S_{r1}$) beschrieben. In den Versuchen wurden mit S_{r1} die höchsten Korrelationskoeffizienten zum tribologischen Verhalten ermittelt. Niedrige S_{r1} führen nach Bild 59 zu stärkerem Absinken der Reibungszahl mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit, was nur durch hydrodynamische Effekte erklärbar ist. Niedrige S_{r1} begünstigen demnach die Ausbildung hydrodynamischer Effekte. Nach dem Reibmodell ermöglichen es dünne Spitzen, daß die Topografie weiter einglättet als bei großen Spitzen mit hohem Materialanteil. Dadurch entstehen schmalere Schmierpalte, in denen nach den Bildern 17 und 19 höhere hydrodynamische Drücke entstehen können.

3. Flacher Kernbereich

Zusätzlich zu leicht einglättenden Spitzen wurde ein flacher Kernbereich als reibungssenkend beurteilt, da um über einen großen Flächenanteil mit flachen Winkeln und Stufen für hydrodynamische Effekte zu verfügen. Die Höhe des Kernprofils wird nach DIN 13565-2 mit der Kenngröße R_k (S_k) beschrieben. Die höchsten Korrelationskoeffizienten zur maximalen Kontaktnormalspannung ließen sich in den Versu-

chen mit dieser Kenngröße feststellen. Niedrige S_k führen nach Bild 61 und dem Reibmodell entsprechend zu höheren maximalen Kontaktnormalspannungen. Der unter Punkt 2 beschriebene Einfluß niedriger Materialflächenanteile S_{r1} verstärkt die Wirkung des flachen Kernbereichs, da er durch die hohe Einglättung dünne Schmierspalt ermöglicht.

4. Mindestleervolumen

Im tieferliegenden Bereich der Topografie wurde ein großes Leervolumen, das bei starker Einglättung als Schmierstoffreserve dienen kann, positiv beurteilt. Bei den Versuchen versagte das Blech mit dem niedrigsten geschlossenen Leervolumen V_{cl} und dem niedrigsten Mittenrauhwert R_a durch Aufschweißungen auf dem Werkzeug. Trotz der niedrigen Reibungszahlen dieses Bleches, der leicht einglättenden Spitzen und der niedrigen S_k -Werte wurden keine hohen Kontaktnormalspannungen erreicht, was durch die fehlende Schmierstoffreserve erklärbar ist.

5. Hoher geschlossener Leerflächenanteil

Bei hohen Werten der Oberflächenkenngröße α_{clm} stehen große Flächenanteile zur Verfügung, in denen hydrostatischer Druck aufgebaut werden kann. Bleche mit höheren Werten von α_{clm} führen nach den Überlegungen in Kap 5 zu günstigerem tribologischem Verhalten. Für die Bleche, die nicht bereits durch niedrige S_k und S_{r1} -Werte günstigere tribologische Ergebnisse erzielen oder durch zu geringes Leervolumen und Unterschiede von Blech-Ober- und Unterseite ausscheiden, kann die Wirkung der hydrostatischen Schmieraschen bestätigt werden (Bild 67).

6. Hohe Abgeschlossenheit

Um bereits bei geringer Einglättung abgeschlossene Schmieraschen auszubilden, soll die Oberfläche möglichst weit oben abgeschlossen sein. Mit den Oberflächenkenngrößen zur Beschreibung der Tiefe, ab der die Oberfläche abgeschlossen ist (c_{clm} , p) wurden keine deutlichen Korrelationen zum tribologischen Verhalten festgestellt. Hohe Korrelationskoeffizienten sind mit diesen Kenngrößen zu den Spitzenhöhen S_{pk} und S_{pk}^* vorhanden (Bild 47). Für beliebige Oberflächen kann dieser Zusammenhang, wie in Kapitel 2.5.3 dargestellt, nicht allgemeingültig sein. Die zur Zeit zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren ermöglichen es demnach nicht, die Spitzenhöhe und die Tiefe, ab der die Oberfläche abgeschlossen ist, unabhängig zu variieren. Der Einfluß von c_{clm} und p kann in den Versuchsergebnissen nicht nachgewiesen werden, da er nicht vom Einfluß der Spitzenhöhe zu unterscheiden ist. Stünden Herstellungsverfahren zur Verfügung, mit denen Spitzenhöhe und Abgeschlossenheit unabhängig voneinander eingestellt werden können, dann wäre zu erwarten, daß bei hohen Spitzen und hoher Abgeschlossenheit dieser Effekt nutzbar wäre.

7. Feine Topografie

Um das Herausfließen des Schmierstoffs aus dem Schmierspalt zu bremsen, wurden feine Topografien als günstig angesehen. Eine deutliche Korrelation wurde zwischen der Anzahl der Materialflächen bei Durchdringung des Kugelfilters $N_{ma}(k)$ und der

Standardabweichung der Reibungszahl berechnet. Bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten kann der Schmierstoff langsam aus der Kontaktzone entweichen, ohne reibungssenkende Drücke aufzubauen (Grenzreibung). Bei höheren Gleitgeschwindigkeiten (Mischreibung) steht dem Schmierstoff weniger Zeit zur Verfügung und es entstehen höhere Drücke infolge von Quetschströmungen. Viele fein verteilte Spitzen bremsen den Schmierstoff dabei stärker als wenige große. Hohe Anzahlen von Materialflächen führen damit zu höheren Drücken und deutlicherem Absinken der Reibungszahl mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit.

8. Feine Topografie mit vielen Tälern

Eine Topografie mit vielen Tälern stellt nach den Überlegungen zum Reibmodell viele Stufen und Flanken zur Verfügung, an denen hydrodynamische Effekte wirken können. In den Versuchen wurde festgestellt, daß eine Topografie mit einer hohen Anzahl Leerflächen bei Perkolationstiefe eher hohe Kontaktnormalspannungen erreicht, als eine Topografie mit wenigen Leerflächen.

Folgerungen

- Der Einfluß der Abgeschlossenheit kann mit den Kenngrößen c_{clm} und p in den Versuchsergebnissen nicht nachgewiesen werden, da bei den zur Verfügung stehenden Blechen ein enger Zusammenhang zwischen der Spitzenhöhe S_{pk} und der Abgeschlossenheit besteht. Um den Einfluß der Abgeschlossenheit zu überprüfen, müßten Bleche mit von der Spitzenhöhe unabhängiger Abgeschlossenheit untersucht werden.
- Die übrigen aus dem Reibmodell in Kapitel 5 abgeleiteten Anforderungen an Topografien werden durch die in den Versuchen beobachteten Zusammenhänge zwischen Oberflächenkenngrößen und tribologischen Kenngrößen bestätigt.

10 Auswahl der Kriterien und Kenngrößen

10.1 Tribologische Kriterien und Kenngrößen

Zur Beurteilung von Topografien in Modellversuchen wurde aufgrund der in Kapitel 6 dargestellten Ergebnisse der Streifenziehversuch in der Flachbahn ausgewählt und nachgewiesen, daß die Ergebnisse auf komplexere Bauteile übertragbar sind. Besonders die gemittelte maximale Kontaktnormalspannung hat sich als geeignet erwiesen, die für reale Ziehteile wichtige Reibung kurz vor Versagen eines Bauteils zu beurteilen. Zwischen den Kontaktnormalspannungen bei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten bestehen hohe Korrelationskoeffizienten, so daß die gemittelte maximale Kontaktnormalspannung verwendet werden darf. Bei der niedrigen und in der Praxis selten auftretenden Gleitgeschwindigkeit von 25 mm/s wurden von den höheren Gleitgeschwindigkeiten abweichende Ergebnisse ermittelt. Wenn die Eignung von Topografien für Ziehprozesse mit entsprechend niedrigen Gleitgeschwindigkeiten beurteilt werden soll, dann ist die maximale Kontaktnormalspannung bei diesen niedrigen Gleitgeschwindigkeiten zu bestimmen.

Voraussetzung zur Messung der maximalen Kontaktnormalspannung ist eine Anlage, bei der das Blech plastisch gedehnt wird, um die erhöhte Einglättung der Topografie abzubilden. Modellversuche, bei denen das Blech fest auf einer Unterlage aufliegt, sind dazu nicht geeignet (Tabelle 24).

Anforderungen an die Versuchsanlage	
1	Streifenziehversuch in der Flachbahn
2	plastische Dehnung des Bleches durch Zugspannungen in Blechebene
3	große Werkzeug-Kontaktfläche
4	Gleitgeschwindigkeit variierbar
5	Kontaktnormalspannung variierbar

Tabelle 24: Anforderungen an die Versuchsanlage zur Beurteilung der Topografie von Blechen

Die Gleitreibungszahl hat sich beim Vergleich der Ergebnisse von Streifenziehversuchen, Napf und Pedaltopf als weniger geeignet erwiesen als die maximale Kontaktnormalspannung. Bei den Streifenziehversuchen wurden zur Standardabweichung der Reibungszahl deutlich höhere Korrelationskoeffizienten berechnet als zur Reibungszahl selbst. Die Reibungszahl im Gebiet der Grenzreibung wird nur wenig von der Topografie beeinflusst, die Ausbildung hydrodynamischer Effekte bei höheren Gleitgeschwindigkeiten dagegen deutlich. Topografien sollten deshalb weniger über die Reibungszahl, als vielmehr danach beurteilt werden, wie deutlich die Reibungszahl mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit absinkt. Dazu sind Modellversuche mit Variation der Gleitgeschwindigkeit und relativ große Werkzeuge erforderlich (Tabelle 25).

	Kriterien	Kenngrößen
1	niedrige Reibung bei hoher Beanspruchung des Bleches	hohe gemittelte maximale Kontaktnormalspannung
2	Topografie, die hydrodynamische Effekte unterstützt	hohe Standardabweichung der Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit
3	Topografie mit niedriger Gleitreibung	niedrige gemittelte Reibungszahl
4	niedrige Reibung bei hoher Beanspruchung und niedriger Gleitgeschwindigkeit	hohe max. Kontaktnormalspannung bei Gleitgeschwindigkeit 25 mm/s

Tabelle 25: Ausgewählte Kriterien und Kenngrößen zur Beurteilung der tribologischen Systemeigenschaften von Topografien

10.2 Oberflächenkenngrößen

Zur Beurteilung der Topografie im Hinblick auf die Reibung sind Oberflächenkenngrößen auszuwählen, mit denen die für tribologische Mechanismen relevanten geometrischen Merkmale quantifiziert werden können.

In Tabelle 26 sind die Oberflächenkenngrößen angegeben, mit denen diese geometrischen Eigenschaften quantifiziert werden können und die in Kapitel 8.3 die deutlichsten Korrelationen zum tribologischen Verhalten ergaben.

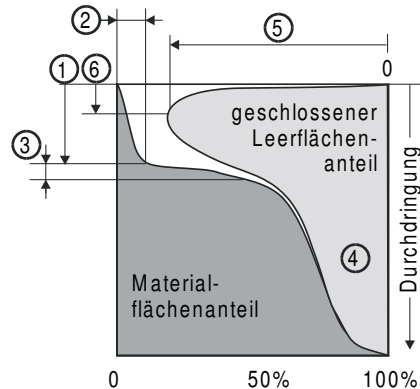
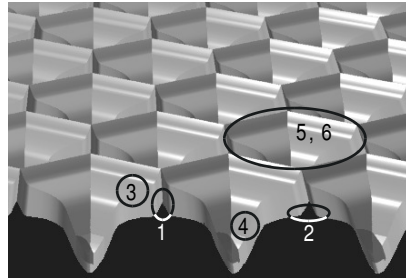
	Mechanismus	Anforderung an geometrische Eigenschaften der Topografie	ausgewählte Oberflächenkenngröße	weitere Kenngrößen mit deutlicher Korrelation
1	Makro-Quetschströmungen	hohe Spitzen	S_{pk}	S_{pk}^* , V_{vo} , R_{pm}
2		viele Spitzen	$N_{ma(k)}$	N_{mam}
3	Hydrodynamik an Mikro-Flanken und	niedriger Materialanteil der Spitzen	S_{r1}	
4	Mikro-Stufen	flacher Kernbereich	S_k	
5	Schmierstoffreserve / Mindestrauheit	hohes Leervolumen in den Tälern	V_{cl}	R_a
6	Hydrostatik in Mikro-Schmierföhlen	hoher geschlossener Leerflächenanteil	α_{clm}	
7		viele kleine Täler	$N_{vo(p)}$	$N_{vo}(\alpha_{ma}=50\%)$

Tabelle 26: Ausgewählte Oberflächenkenngrößen zur Beurteilung der geometrischen Eigenschaften von Blechoberflächen

Drei der sieben Kenngrößen lassen sich anhand von 2D-Messungen bestimmen, für die anderen vier sind 3D-Messungen erforderlich.

In Bild 73 ist eine Modelloberfläche dargestellt, die nach den Überlegungen zum Reibmodell in Kapitel 5 für die Reibung günstige geometrische Eigenschaften aufweist.

- ① hohe, schlanke Spitzen
- ② geringer Materialflächenanteil an der Basis der Spitzen
- ③ flacher Kernbereich
- ④ hohes geschlossenes Leervolumen
- ⑤ hohes Maximum der geschlossenen Leerflächenanteile
- ⑥ hoch abgeschlossen, geringe Perkolationsstiefe



Zusätzliche Anforderungen:

- ⑦ hohe Feinheit: viele Spitzen und
- ⑧ viele Täler
- ⑨ möglichst ungerichtete (isotrope) und stochastische Anordnung der Krater

Bild 73: Modelloberfläche mit für das tribologische Verhalten günstig zu beurteilenden geometrischen Eigenschaften

Der obere Bereich der Topografie besteht nicht wie üblich aus einzelnen Spitzen, sondern aus schmalen Graten oder Stegen, die bereits bei geringer Einglättung die Topografie weit oben abschließen. Zwischen den Stegen und den Kratern ist ein flacher Kernbereich vorhanden, um hydrodynamische Effekte zu unterstützen.

Die in Bild 73 dargestellte Topografie kann alle Anforderungen an die geometrischen Eigenschaften in hohem Maße erfüllen. Mit den zur Zeit zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren lassen sich die hohen schmalen Grate aber nicht herstellen. Zur Beurteilung existierender Topografien müssen die Kenngrößen gewichtet werden. So stellt sich die Frage, ob im Zweifelsfall eher hohe Spitzen für Quetschströmungen oder ein niedriger Materialanteil der Spitzen für Flanken, Stufen und abgeschlossene Schmiertaschen höher zu gewichten ist. Die Wirkung der Mechanismen und damit die Gewichtung der Kenngrößen hängen je nach Bauteil auch von den Beanspruchungsbedingungen ab. Bei Bauteilen mit großen homogen beanspruchten Kontaktflächen und kurzen Werkzeug-Kontaktzeiten können Quetschströmungen besser genutzt werden als bei langsam umgeformten kleinen Bauteilen. Bei Bauteilen mit hoher Beanspruchung durch Kontaktnormalspannung und Dehnung des Bleches in

Blechebene kann die Topografie auch mit größeren S_{r1} noch so weit einglätten, daß Flanken, Stufen und abgeschlossene Schmiertaschen wirken. Tabelle 29 im Anhang enthält für die verschiedenen Mechanismen günstige Bedingungen, die bei der Gewichtung der Kenngrößen zu berücksichtigen sind.

Die höchsten Kontaktnormalspannungen und niedrigsten Reibungszahlen wurden in dieser Arbeit von Blechen mit niedrigen Spitzen und flacher Kernrauheit erreicht. Die hydrodynamischen Effekte an Flanken und Stufen und die hydrostatischen Effekte in abgeschlossenen Schmiertaschen sind demnach bei der Beanspruchung des Streifenziehversuchs stärker zu gewichten als der Anteil der Quetschströmungen. Unter den Beanspruchungsbedingungen des Streifenziehversuchs sind deshalb nach dem Mindestvolumen vor allem niedrige S_{r1} , hohe S_k und hohe α_{clm} reibungssenkend. Zusätzlich wirkt sich eine hohe Feinheit der Topografie günstig aus. Bei den Blechen 6 und 7 sind die Spitzen trotz niedriger S_{r1} relativ hoch, so daß zusätzlich Quetschströmungen genutzt werden können.

In Tabelle 27 sind günstige und ungünstige Werte für diese Kenngrößen unter den Beanspruchungsbedingungen des Streifenziehversuchs angegeben. Die Werte sind den Meßdaten aus Kapitel 8 entnommen. Beim Vergleich der Oberflächenkenngrößen mit den Ergebnissen anderer Meßgeräte sind die Meßprinzipien, Filter und Meßbedingungen zu berücksichtigen (Kapitel 2.5).

	Kenngröße		Priorität im Streifenziehversuch	günstiger Wert	ungünstiger Wert
1	reduzierte Spitzenhöhe	S_{pk}	2	$> 1 \mu m$	$< 0,7 \mu m$
2	Anzahl der Materialflächen bei Durchdringung des Kugelfilters	$N_{ma}(k)$	3	> 1200	< 800
3	Materialanteil der Spitzen	S_{r1}	2	$< 4 \%$	$> 6 \%$
4	Kernrauhtiefe	S_k	2	$< 2,5 \mu m$	$> 3 \mu m$
5	geschlossenes Leervolumen	V_{cl}	1	$> 600 \mu m^3/m^2$	$< 400 \mu m^3/m^2$
6	maximaler geschlossener Leerflächenanteil	α_{clm}	2	$> 32\%$	$< 31\%$
7	Anzahl der Leerflächen bei Perkolationstiefe	$N_{vo}(p)$	3	> 500	< 400

Tabelle 27: Im Streifenziehversuch ermittelte Grenzwerte für die Oberflächenkenngrößen

Auf die Kenngrößen p und c_{clm} kann noch verzichtet werden, da bei den zur Zeit herstellbaren Topografien ein starker Zusammenhang zwischen diesen Kenngrößen und der Spitzenhöhe S_{pk}^* festgestellt wurde. Erst wenn die Herstellung von Oberflächen mit Graten anstelle von Spitzen möglich ist, werden diese Kenngrößen zur Differenzierung der Eigenschaften Spitzenhöhe und Abgeschlossenheit erforderlich.

11 Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit wurden Kriterien und Kenngrößen zur Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung definiert. Kenngrößen aus Modellversuchen sind erforderlich, weil diese zur Zeit die einzige Möglichkeit bieten, die komplexen Wechselwirkungen zwischen Blechoberfläche, Schmierstoff und Werkzeugoberfläche systematisch zu untersuchen. Oberflächenkenngrößen werden benötigt, um Topografien mit geringem meßtechnischem Aufwand im Vorfeld der Fertigung beurteilen zu können.

Die Auswahl eines geeigneten Modellversuchs wird durch den einzugehenden Kompromiß zwischen Übertragbarkeit auf den Realprozeß und meßtechnischer Zugänglichkeit erschwert. Der in dieser Arbeit vorgenommene Vergleich von Streifenziehversuchen (Flachbahn, Umlenkung und Ziehsecke) mit dem Ziehen eines rotations-symmetrischen Napfes und eines Realteils hat ergeben, daß der Streifenziehversuch in der Flachbahn sowohl die Untersuchung der durch die Topografie beeinflussten tribologischen Mechanismen ermöglicht als auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf komplexere Bauteile sicherstellt. Voraussetzung dafür ist die Einhaltung realistischer Beanspruchungsbedingungen wie Kontaktnormalspannung, Gleitgeschwindigkeit und Größe der Kontaktfläche.

Unter den tribologischen Kenngrößen hat sich besonders die maximale Kontaktnormalspannung im Flachbahnversuch als geeignet erwiesen. Sie ist ein Maß für die Reibung des Bleches unter einer hohen Beanspruchung, die weitgehend den Bedingungen in komplexen Werkzeugen kurz vor dem Bauteilversagen entspricht.

Auf die Höhe der Grenzreibung hat die Topografie keinen so großen Einfluß wie auf die Ausbildung hydrodynamischer Effekte bei Mischreibung. Die Eigenschaften der Topografie sind entscheidend dafür, wie deutlich die Reibung mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit absinkt. Zusätzlich zum absoluten Niveau der Reibungszahl ist deshalb die Änderung der Reibungszahl mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit ein wichtiges Maß zur Beschreibung des tribologischen Verhaltens von Topografien.

Zur Beurteilung und Auswahl der Oberflächenkenngrößen wurden die von der Topografie beeinflussten tribologischen Mechanismen in einem Reibmodell zusammengefaßt und beschrieben. Aus diesem Reibmodell läßt sich ableiten, unter welchen Bedingungen die tribologischen Mechanismen wirken und welche Eigenschaften die Topografie aufweisen sollte, um diese Mechanismen möglichst optimal zu unterstützen.

In der Diskussion mit Kollegen anderer Hochschulen und mit Partnern aus der Industrie hat sich gezeigt, daß für gleiche Eigenschaften unterschiedliche Begriffe und gleiche Begriffe für unterschiedliche Eigenschaften verwendet werden. Um Mißverständnisse zu vermeiden, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Vorschlag zur einheitlichen Bezeichnung von Blechtopografien erarbeitet und mit verschiedenen Partnern abgestimmt. Diese Begriffe dienen zur verbalen Beschreibung der aus dem Reibmodell abgeleiteten Anforderungen an die Eigenschaften von Topografien.

Als die wichtigsten Kriterien haben sich Leere, Abgeschlossenheit und Feinheit der Topografie erwiesen. Diese bestimmen, zu welchen Anteilen in der Topografie hydrostatische Effekte in abgeschlossenen Schmiertaschen oder hydrodynamische Effekte an Flanken und Stufen der Oberfläche zur Senkung der Reibung beitragen können.

Zusätzlich zu den Begriffen werden Oberflächenkenngrößen benötigt, mit denen die geometrischen Eigenschaften quantitativ anzugeben sind. Für die Beschreibung der Leere (Materialanteil) reicht eine einzelne Kenngröße nicht aus. Es werden mehrere Werte für die Größe der Spitzen, Flächenanteile und Lage von Plateaus sowie das Volumen der Täler benötigt. Zur Berechnung dieser Kenngrößen sind keine 3D-Messungen erforderlich, da sie zu den gleichen Werten führen, wie die an vertikalen Schnitten berechneten 2D-Kenngrößen.

Die Kenngrößen der Leere beinhalten keine Information darüber, ob in der Oberfläche abgeschlossene Leervolumina vorhanden sind, in denen hydrostatischer Druck aufgebaut werden kann. Abgeschlossenheit und Feinheit lassen sich nur mit 3D-Messungen eindeutig beurteilen. Dazu stehen bisher wenige echte 3D-Kenngrößen zur Verfügung. In dieser Arbeit wurden deshalb weitere 3D-Kenngrößen definiert und hinsichtlich ihrer Zusammenhänge zum tribologischen Verhalten überprüft.

Unter den Beanspruchungsbedingungen des Streifenziehversuchs haben sich die Kenngrößen

- reduzierte Spitzenhöhe S_{pk} ,
- Materialanteil der Spitzen S_{r1} ,
- Kernrautiefe S_k
- Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils α_{clm} ,
- geschlossenes Leervolumen V_{cl} oder Mittenrauhwert R_a ,
- Anzahl der Materialflächen bei Kugelfiltertiefe und
- Anzahl der Leerflächen bei Perkolationstiefe

als besonders geeignet erwiesen, das tribologische Verhalten zu beurteilen.

Mit diesen Kenngrößen läßt sich beschreiben, inwieweit die Topografie mikrohydrodynamische und mikrohydrostatische Effekte unterstützt.

Man kann eine Modelloberfläche generieren, die alle Anforderungen des Reibmodells weitgehend erfüllt. Mit den zur Zeit verfügbaren Fertigungsverfahren sind aber die als günstig beurteilten schmalen Grate, die leicht einglättende abgeschlossene Krater bilden, nicht herstellbar.

Zur Beurteilung derzeit produzierbarer Topografien müssen die Beanspruchungsbedingungen bekannt sein. Anhand der Beanspruchungsbedingungen kann beurteilt werden, welche tribologischen Mechanismen nutzbar und welche Kenngrößen einzusetzen sind.

Liegen in einem Ziehwerkzeug größere homogen beanspruchte Bereiche, höhere Gleitgeschwindigkeiten und kurze Werkzeug-Kontaktzeiten vor, dann können hohe

Spitzen (Kenngröße S_{pk}) Makro-Quetschströmungen unterstützen. Die hohen Spitzen sollten aber nicht gleichzeitig zu hohen Materialanteilen an der Basis der Spitzen führen (Kenngröße S_{rt}), da diese die Einglättung und damit die Ausbildung mikro-hydrodynamischer und mikro-hydrostatischer Effekte behindern.

Mikro-hydrodynamische Effekte werden begünstigt, wenn ein großer Anteil von Platteauflächen der Topografie mit der Werkzeugoberfläche schmale Schmierpalte bilden kann. Dazu sollte die Topografie eine geringe Kernrauhtiefe (Kenngröße S_k) aufweisen.

Bei deutlicher Einglättung der Topografie können mikro-hydrostatische Effekte wirken, wenn eine abgeschlossene und leere Topografie vorliegt, die sich durch einen hohen abgeschlossenen Leerflächenanteil (Kenngröße α_{clm}) auszeichnet.

Um auch bei starker Einglättung und hoher tribologischer Beanspruchung eine ausreichende Schmierstoffreserve zur Verfügung zu stellen, muß die Topografie ein Mindestvolumen aufweisen. Das geschlossene Leervolumen (Kenngröße V_{cl}) und der Mittenrauhwert (Kenngröße R_a) haben sich dafür als geeignete Maße herausgestellt.

Feine Topografien mit hohen 3D-Spitzenzahlen (Kenngröße $N_{ma}(k)$) und hohen Talzahlen (Kenngröße $N_{vo}(p)$) zeigen sowohl bei stochastischen als auch bei deterministischen Blechoberflächen eher günstigeres tribologisches Verhalten, als grobe Blechoberflächen.

Die Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen bestätigen die aus dem Reibmodell abgeleiteten Anforderungen an die Topografien.

Die in der Oberflächenmeßtechnik üblichen Filtermethoden können zu deutlichen Verzerrungen der Meßdaten führen und berücksichtigen die spezifischen Anforderungen tribologisch beanspruchter Blechoberflächen nicht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb das modifizierte Kugelfilter entwickelt, mit dem die Einglättung des Bleches durch den tribologischen Kontakt simuliert werden kann. Dieses Filter bietet die Möglichkeit, die Aussagekraft der Kenngrößen zu erhöhen.

Damit steht eine Auswahl von Kenngrößen und Filtern zur Verfügung, die eine differenziertere Beurteilung der Topografie von Blechen und ihres Einflusses auf die Reibung während der Umformung ermöglicht.

12 Literaturverzeichnis

- 1 Vöhringer, K. D.: Entwicklung und Produktion - Schnittstelle oder Nahtstelle?, Tagungsband 6. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, 1997, ISBN 3-87525-085-0, 1-10
- 2 Steffens, K.: Umformtechnik 2000 - Erwartungen voll erfüllt, Tagungsband 6. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, 1997, ISBN 3-87525-085-0, 11-22
- 3 N. N.: Mit leichten Karosserien in die automobiler Zukunft ULSAB-Projekt: Phase II, Bänder Bleche Rohre 9/1997, 46-48
- 4 N. N.: Leicht in die automobiler Zukunft, Blech Rohre Profile 9/1997, 72-74
- 5 Nakagawa, T.: Recent Development in Auto-Body Panel Forming Technology, Annals of the CIRP, STC-F Keynote paper, 1994
- 6 Schmidt, H., Lenze, F.-J.: Karosserie-Leichtbau mit höherfestem Stahl, Bänder Bleche Rohre 9/1997, 38-45
- 7 Wilson, W.R.D.: Tribology in Sheet Metal Forming, Proc. 1st ICTMP, 1997, 1-8
- 8 Geistlinger, L., Grendel, T., Illgner, T., Knabe, E., Schwethelm, K. J., Stauder, T.: Moderne Blechteilefertigung - Neue Entwicklungen für das Karosserieziehen, Tagungsband 6. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, 1997, ISBN 3-87525-085-0, 49-74
- 9 SIBETEX-Seminare 1-3, OCAS, Zelzate, Belgien, 1992-1996
- 10 Weber, F.: Aktuelle Entwicklung in der Kaltwalzherzeugung, Stahl u. Eisen, 3/1990, 45-51
- 11 Ritterbach, B.: Pretex - Ein neues Verfahren zur Erzeugung texturierter Feinbleche für höchste Ansprüche, Vortrag auf Kongreß Stahl'97, Düsseldorf, 1997
- 12 Deutscher, O.: Verschiedene Verfahren zur Einstellung einer gezielten Rauheit von Kaltband, Stahl u. Eisen 7/1995, 39-45
- 13 Pankert, R.: Aufrauen von Arbeitswalzen in Kaltwalzwerken, Stahl u. Eisen 3/1990, 55-61
- 14 Horowitz, J.: Mattieren von Skin-pass-Walzen in Kaltwalzwerken, Bänder Bleche Rohre 5/1982, 121-125
- 15 Godwin, M.J.: Application of a New Type of Electrodischarge Texturing for Surface Preparation of Cold Mill Work Rolls, Proc. of Conference on Advances in Cold Rolling Technology, London, 1985, 102-107
- 16 Kuwamoto, H., Kawano, M., Koga, Y., Kachi, Y., Hiasa, M.: Development of a New Roll Texturing System: Electric Discharge Method, Proc. of Conference on Advances in Cold Rolling Technology, London, 1985, 108-114
- 17 Monfort, G., Defourny, J., Bragard, A.: Progress in the Roughness Texture of the Cold Rolled Steel Sheet Related to Deep Drawing and Forming, 15th Biennial Congress-IDDRG, Dearborn, 1988, 91-98
- 18 Crahay, J., Renauld, Y., Monfort, G., Bragard, A.: Present State of Development of the Lasertex Process, Fachberichte Hüttenpraxis Metallweiterverarbeitung 10/1985, 968-975
- 19 N.N.: Funkenerosive Bearbeitung von Dressierwalzen, Stahl und Eisen 11/1982, 1128
- 20 Aspinwall, D.K., Wise, M.L.H., Stout, K.J., Goh, T.H.A., Zhao, F.L., El-Menshaway, M.F.: Electrical Discharge Texturing, Int. J. Mach. Tools Manufact., 1992, 183-193

- 21 Dolves, J.: Electron Beam Texturing of Rolls, Iron and Steel Engineer 8/1991, 33-38
- 22 Pawelski, O., Rasp, W., Nettelbeck, H.-J., Steinhoff, K.: Einfluß unterschiedlicher Arbeitswalzen-Aufrauverfahren auf die Oberflächenfeinstruktur beim Nachwalzen von Karosserieblechen, Stahl und Eisen 6/1994, 183-188
- 23 Tönshoff, H.K., Stürmer, M., Overmeyer, L., Alvensleben von, F.: Strukturierung technischer Oberflächen mittels Laserstrahlung, Laser und Optoelektronik 2/1993, 56-61
- 24 Roberts, W.L.: Cold Rolling of Steel: Macel Dekker Inc., New York Basel, 1978, ISBN 0-8247-6780-2
- 25 Bastawros, A. F., Ortiz, H., Deistler, L. J., Donkle, L. B., Fierst, L. L., Mauck, M. O.: Evolution of Surface Texture During Temper Rolling, Proc. 34th MWSP Conf., ISS-AIME, 1993, 485-489
- 26 Löffler, L.: Untersuchungen zum Aufrauen von Bandstahl, Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1988
- 27 Steinhoff, K.: Untersuchung des Nachwalzens von metallisch beschichtetem Feinblech, Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1994
- 28 Pawelski, O., Rasp, W., Draese, S.: Auswirkungen hydrodynamischer Schmierungseffekte beim Kaltwalzen auf den Prozeßablauf und das Walzprodukt, Bericht vor dem Arbeitskreis Grundlagen der Umformtechnik im VDEh, 1996
- 29 Stout, K.J., Sullivan, P.J.: The Use of 3-D Topographic Analysis to Determine the Microgeometric Transfer Characteristics of Textured Sheet Surfaces Through Rolling, Annals of the CIRP 1992, 621-624
- 30 Fleischer, G.: Systembetrachtungen zur Tribologie, Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Otto von Guericke Magdeburg 5/6/1970, 415-420
- 31 Czichos, H., Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch: Reibung und Verschleiß; Systemanalyse, Prüftechnik, Werkstoffe und Konstruktionselemente, Vieweg, 1992, ISBN 3-528-06354-8
- 32 Keller, D. A., Hora, P., Groth, H.P., Reissner, J.: Umweltgerechtes Tiefziehen unter erschwerten Bedingungen, Bleche Rohre Profile 9/1991, 672-679
- 33 Keller, D. A., Meyer, E., Hauert, R., Maillat, M., Patschneider, J., Koch, F., Güntherodt, H.-J., Hintermann, H.E., Reissner, J.: TiN- und TiC-Hartstoffschichten mit besonderen tribologischen Eigenschaften, Tribologie und Schmierungstechnik 5/1993, 305-312
- 34 Keller, K., Koch, F.: Beschichtete Umformwerkzeuge für die Blechverarbeitung, Bänder Bleche Rohre 7/1991, 37-49
- 35 Staeves, J.: Konturengetreue Werkzeugbeschichtung, Abschlußbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Schm 463-53 im Schwerpunktprogramm Plasma- und Ionenoberflächen, 1995
- 36 Schmoeckel, D., Rupp, M., Staeves, J.: Trends in der Beschichtungstechnologie, Tagungsband Zürcher Umformtage, ETH Zürich, 1997
- 37 Berg, G., Friedrich, C., Broszeit, E., Berger, C., Kloos, K.-H., Staeves, J., Schmoeckel, D., Weber, F.-R., Oechsner, H., Schulz, A., Stock, H.-R., Mayr, P.: Reibverhalten von PVD-Werkzeugbeschichtungen in der Blechumformung, Bänder Bleche Rohre 5/1997, ISSN 005-3848, 46-51

- 38 Schulz, A., Stock, H.-R., Mayr, P., Staeves, J., Schmoeckel, D.: Deposition and Investigation of TiN PVD Coatings on Cast Steel Forming Tools, Surface and Coatings Technology, 1997, 446-450
- 39 Bartz, W.J.: Tribologie und Schmierung in der Umformtechnik, Expert Verlag, Sindelfingen, 1987
- 40 Meyer, K.: Schichtbildungsprozesse und Wirkungsmechanismus schichtbildender Additive für Schmierstoffe, Tribologie und Schmierungstechnik 5/1985, 254-262
- 41 Mang, T., Becker, H., Schmoeckel, D., Schubert, K-H: Schmierung und Schmierstoffe beim Normalschneiden von Blechen, Blech Rohre Profile 7/1981, 277-281
- 42 Kloos, K.H.: Werkstoffauswahl und Oberflächenbehandlung unter tribotechnischen Gesichtspunkten, Z. Werkstofftech. 1979, 456-466
- 43 Gröber, M., Gruber, K., Thoms, V.: FE-Blechumformsimulation - notwendiges Werkzeug zum Schließen der CAD-Prozeßkette, Blech Rohre Profile 5/1992, 375-378
- 44 Spur, G., Schmoeckel, D.: Handbuch der Fertigungstechnik, Umformen und Zerteilen, Band 2, Carl Hanser Verlag München Wien
- 45 Prier, M., Staeves, J.: Rapid Prototyping für Klein- und Vorserienwerkzeuge, Werkstatt und Betrieb 10/1995, 856-862
- 46 Hielscher, C., Sitzmann, B.: Erfahrungen mit dem Innenhochdruck-Umformen, Lagebericht, Werkstatt und Betrieb 10/1996, 840-850
- 47 Andreasen, J.L., Eriksen, M., Bay, N.: Major Process Parameters Affecting Limits of Lubrication in Deep Drawing of Stainless Steel, Proc. 1st ICTMP, 1997, 122-127
- 48 Schumacher, B., Göklü, S., Masarczyk, P., Wolfhard, D., Lewandowski, J.: Schmelztauchveredelte Feinbleche mit In-line-Versiegelung - Produkte, Herstellung, Eigenschaften und Anwendung, Bänder Bleche Rohre 9/1997, 24-28
- 49 Emmens, W.C.: Some Aspects of the Friction of Zinc-Coated Steel, IDDRG Work Group Meeting 1989
- 50 Masarczyk, P., Müller, R.: Comparison of Frictional and Abrasion Behaviour of Different Electro-Galvanized, Hot Dip Galvanized and Galvannealed Steel Sheets, IDDRG Work Group Meeting 1993
- 51 Arai, T.: Remaining Problems in Surface Coating Application to Material Forming Tools Related to Tribological Behavior, Proc. 1st ICTMP, 1997, 316-321
- 52 Kruska, J-U.: Qualitätsmerkmale von Stahlfeinblech, Bänder Bleche Rohre 9/1997, 30-37
- 53 Engl, B., Drewes, E-J.: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Fein- und Feinstblechwerkstoffe, Blech Rohre Profile 3/4/1989, 166-169 u. 241-245
- 54 Selenz, H.-J., Brühl, M., Kruska, J.-U.: Höherfeste, isotrope Stahlsorten und neue Oberflächenveredelungen für die Blechumformung, Umformtechnisches Kolloquium Hannover 1996, 70-85
- 55 Staeves, J., Emmens, W. C.: Eigenschaften und Beurteilung von Blechen, Tagungsband 6. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, 1997, ISBN 3-87525-085-0, 33-48

- 56 Doege, E., Hesberg, U.: Eigenschaften und Umformverhalten metallisch oberflächenveredelter Feinbleche beim Tiefziehen, Bericht zum Forschungsvorhaben AIF/DFB 7316, IFUM, Univ. Hannover, 1988
- 57 Luo, S.: Entwicklung eines anisotropen plastischen Materialgesetzes für die Blechumformung, Dr.-Ing. Dissertation, TU-Darmstadt, 1996
- 58 Müller, A.: Als Karosseriewerkstoff hat Aluminium gute Chancen, Aluminium 5/1993, 402-405
- 59 Neumann, W.-D.: Grenzflächenprobleme bei der Verarbeitung von Aluminium, Bänder Bleche Rohre 5/1976, 184-187
- 60 Reitzle, W., Drecker, H., Fischer, F.: Über den Einfluß von Mikrooberfläche und Schmiermitteln auf die Ziehbarkeit von unlegierten, kohlenstoffarmen Blechen, Bänder Bleche Rohre 1/1980, 8-13
- 61 Timm, J., Armbruster, K.: Charakterisieren der Qualität lackierter Al-Oberflächen, Bänder Bleche Rohre 9/1994, 110-114
- 62 Courval, G., Allin, J.: Effects of Surface Texture on the Appearance and Corrosion of Painted Aluminium Body Sheet, International Congress and Exposition Detroit, SAE Technical Paper 930702, 1993
- 63 Vollertsen, F.: Blechverarbeitung in der Automobilindustrie, Blech Rohre Profile 6/1993, 486-489
- 64 Kienzle, O., Mietzner, K.: Atlas umgeformter metallischer Oberflächen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1967
- 65 Fuller, K.N.G., Tabor, D.: The Effect of Surface Roughness on the Adhesion of Elastic Solids, Proc. R. Soc. Lond. A.345, 1975, 327-342
- 66 Woska, R.: Einfluß ausgewählter Oberflächenschichten auf das Reib- und Verschleißverhalten beim Tiefziehen, Dr.-Ing. Dissertation, TU Darmstadt, 1982
- 67 Peterson, M. B., Winer, W. O.: Wear Control Handbook, United Engineering Center, New York, 1980
- 68 Eversberg, K.-R.: CVD und PVD-Beschichtung von Werkzeugen und Bauteilen, Blech Rohre Profile 39, 1992, 544-549
- 69 Eriksen, M., Wanheim, T.: Wear Optimisation in Deep Drawing, Proc. 1st ICTMP, 1997, 128-133
- 70 Heiden van der, A., Burghardt, A.J.C., Koesveld van, W., Perstein van, E.B., Spanjers, M.G.J.: Galvannealed Microstructure and Anti-Powdering Process Windows, The Minerals, Metals & Materials Society, 1993, 251-263
- 71 Bauer, D., Gücker, G.: Umformung metallisch oberflächenbeschichteter Karosseriebleche, wt Werkstattstechnik, 1989, 205-209
- 72 Mulki, H., Mizuno, T.: Tribo-Characteristics of Zinc Coated Steel Sheets, Proc. 1st ICTMP, 1997, 140-145
- 73 Vöhringer K. D.: Skriptum zur Vorlesung Blechverarbeitung in der Automobilindustrie, PtU, TU-Darmstadt, 1994
- 74 Rault, D., Entringer, M.: Anti-Galling Roughness Profile Permitting Reduction of the Blankholder Pressure and the Required Amount of Lubricant During the Forming of Sheets, Proc. IDDRG, Ann Arbor, 1976, 97-114
- 75 Staeves, J., Schmoeckel, D.: Determination of the Minimum Quantity of Lubricant for Sheet Metal Forming, World Tribology Congress, London, 1997, ISBN 1-86058-109-9, 330

- 76 Netsch, T., Nürnberger, G.: Tribologieforschung als Beitrag zur Verbesserung der Prozeßsicherheit, 4. Umformtechnisches Kolloquium in Darmstadt, 1991, 13.11-13.13
- 77 Staeves, J.: Minimierung der Schmierstoffmenge bei der Umformung von Tiefziehblechen unterschiedlicher Oberflächenfeingestalt, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben EFB/AIF 10451 N, 1998
- 78 Staeves, J., Schmoeckel, D.: Determination of the Minimum Quantity of Lubricant for Sheet Metal Forming, Proc. 1st ICTMP, 1997, 340-345
- 79 Kunz, A., Broszeit, E., Schröder, H-J: Abschätzung der Beölung von Tiefziehblechen mit unterschiedlicher Oberflächenfeingestalt zu Beurteilung des Tiefziehverhaltens, Blech Rohre Profile, 11/1992, 948-954
- 80 Staeves, J., Filzek, J., Schmoeckel, D.: Surface Qualification in the Sheet Metal Domain, 6th International Conference on Sheet Metal, University of Twente, 1998, ISBN 90-365-111-35, 277-294
- 81 Schey, J.A.: Metal Deformation Processes: Friction and Lubrication, Marcel Dekker Inc., New York, 1970
- 82 Lange, K.: Umformtechnik, Band 1-3, Springer Berlin Heidelberg New York, 1984-1990
- 83 Schey, J.A.: The Applicability of Tribotesters to Sheet Metal Working, IDDRG Work Group Meeting, Colmar, 1995
- 84 Müschenborn, W., Sonne, H-M., Hartmann, G.: Neuzeitliche Methoden einer anwendungsbezogenen Feinblechprüfung, Thyssen Technische Berichte, 1/1993, 121-135
- 85 Witthüser, K.-P.: Untersuchung von Prüfverfahren zur Beurteilung der Reibungsverhältnisse beim Tiefziehen, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1980
- 86 Netsch, T.: Methode zur Ermittlung von Reibmodellen für die Blechumformung, Dr.-Ing. Dissertation, TU Darmstadt, 1995
- 87 Pfestorf, M., Schmidt, M., Faller, S., Geiger, M.: Anwendung dreidimensionaler Oberflächenkenngrößen im Preßwerk, Stahl und Eisen 1/1998, 51-58
- 88 Pfestorf, M.: Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Erlangen, 1997, ISBN 3-87525-097-4
- 89 Dinkel, F., Hoffmann, H., Kopietz, J.: Einfluß der Oberflächenrauheit auf die Umformung von Aluminiumblechen, Blech Rohre Profile 7/8/1997, 36-40
- 90 Balbach, R.: Optimierung der Oberflächenmikrogeometrie von Aluminiumfeinblech für das Karosserieziehen, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Stuttgart, 1988
- 91 Doege, E., Grahner, R.: Der Einfluß der Werkzeugwerkstoffe und Schmierstoffe auf den Kraftbedarf beim Tiefziehen, Blechumformung - Grundlagen, Technologie, Werkstoffe, DGM, Oberursel, 1983, 179-207
- 92 Siegert, K.: Beeinflussung der Reibung beim Ziehen von Karosserieteilen, Tribologie und Schmierungstechnik 2/1985, 78-84
- 93 Meier, B. T., Reissner, J., Kopietz, J., Wollrab, P.-M.: Die Übertragbarkeit von Streifenreibzahlen auf reale Ziehteile, Tribologie und Schmierungstechnik, 6/1988, 300-303
- 94 Wagner, S.: 3D-Beschreibung der Oberflächenstrukturen von Feinblechen, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Stuttgart, 1996

- 95 Heide van der, E., Huis in 't Veld, A. J.: A New Test Method for Ranking Sheet Metal Forging Lubricants, Proc. 1st ICTMP, 1997, 104-107
- 96 Emmens, W. C.: Tribology of Flat Contacts and its Application in Deep Drawing, PhD-thesis, University of Twente, The Netherlands, 1997
- 97 Frontzek, H.: Beitrag zur Bestimmung der Reibungsverhältnisse in der Blechumformung, Dr.-Ing. Dissertation, TU Darmstadt, 1990
- 98 Bay, N., Wanheim, T.: Real Area of Contact and Friction Stress at High pressure Sliding Contact, Wear, 1976, 201-209
- 99 Bay, N., Wanheim, T.: Contact Phenomena Under Bulk Plastic Deformation Conditions, Advanced Technology of Plasticity, 1990, 1677-1690
- 100 Bay, N.: Aspects of Lubrication in Cold Forging of Aluminium and Steel, Proc. 9th Int. Cold Forging Congress, Solihull, 1995, 135-146
- 101 Dane, C. M.: Multi Pass Friction Tests on Zinc Coated Sheet to Simulate Galling Behavior, Congress IDDRG, Lisbon, 1994
- 102 Schedin, E., Gunnarsson, L.: Friction in Sheet Metal Forming, Proc. 1st ICTMP, 1997, 91-96
- 103 Duncan, J.L., Shabel, B.S., Gerbase Filho, J.: A Tensile Strip Test for Evaluating Friction in Sheet Metal Forming, Aluminium 9/1978, 585-588
- 104 Yu, Y.: Entwicklung eines Reibgesetzes für die Blechumformung, Dr.-Ing. Dissertation, TU Darmstadt, 1994
- 105 Czichos, H.: Experimentelle Methoden zur Untersuchung tribologischer Effekte im Mischreibungsgebiet, VDI-Berichte Nr. 156, 1970, 5-18
- 106 Jünemann, H.: Systematische Betrachtungen tribologischer Prüfverfahren, Tribologie und Schmierungstechnik, 4/1995, 199-205
- 107 Kasik, N., Reissner, J.: Reibungsverhältnisse im Flansch beim Tiefziehen rotationssymmetrischer Teile, Blech Rohre Profile 5/1980, 303-308
- 108 Wiegand, H., Kloos, K.H.: Der Reibungs- und Schmierungsvorgang in der Kaltformgebung und Möglichkeiten seiner Messung, Werkstatt und Betrieb 4/1960, 181-187
- 109 Sengupta, A. K., Fogg, B., Ghosh, S. K.: On the Mechanism Behind the Punch-Blank Surface Conformation in Stretch-Forming and Deep Drawing, Journal of Mechanical Working Technology, 1981, 181-210
- 110 Schwethelm, K.J.: Tiefziehen von Stahlblechen ohne Zusatzbeölung, Bänder Bleche Rohre 7/8, 1994, 26-33
- 111 Piwowarsky, E.: Längsgleitführungen im Maschinenbau, Tribologie und Schmierungstechnik, 2/1997, 65-69
- 112 Emmens, W.C.: A Novel Design Friction Tester, IDDRG Work Group Meeting 1991
- 113 Zibulla, G. G.: Ölfilm als Gleitbahn - Auftragen des Schmierstoffes beim Tiefziehen von Blechen, Bänder Bleche Rohre 10/1982, 286-288
- 114 Zibulla, G. G.: Kostengünstiges und umweltgerechtes Schmierstoffaufbringen in der Blechumformung, Stahl, 1995, 27-31
- 115 Gundrum, J.: Viskositäten bei hohen Drücken und Temperaturen, Tribologie und Schmierungstechnik 5/1997, 208-210
- 116 Knappwost, A., Arnason, V., Sohn, J.: Theorie und Experiment zur Lokaltemperatur bei Reibungsvorgängen, Schmiertechnik und Tribologie 2/1978, 53-55

- 117 Azushima, A.: Direct Observation of Contact Behavior to Interpret the Pressure Dependence of the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming, *Annals of the CIRP* 1995, 209-213
- 118 Azushima, A., Yoneyama, S., Yamaguchi, T., Kudo, H.: Direct Observation of Microcontact Behavior at the Interface Between Tool and Workpiece in Lubricated Upsetting, *Annals of the CIRP* 1996, 205-210
- 119 Geiger, M., Engel, U., Vollertsen, F.: In-situ-Ultraschallmessung der wahren Kontaktfläche bei Massivumformverfahren, *Umformtechnik* 1/1993, 19-25
- 120 Geiger, M., Engel, U., Niederkorn, S., Pfestorf, M.: Meßtechnische Erfassung der Wirkflächenvorgänge in der Umformtechnik, *Tribologie und Schmierungs-technik* 3/1996, 113-119
- 121 Terzyk, T., Haenel, W.: Prozeßintegrierte Überwachung und adaptive Regelung beim Tiefziehen, *Forschungsvorhaben AiF Nr. Q 40*, 1995
- 122 Ghabrial, S. G., Zaghlool, S. A.: The Effect of Surface Roughness on Static Friction, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 1974, 299-309
- 123 Netsch, T.: Methode zur Ermittlung von Reibmodellen für die Blechumformung, *Dr.-Ing. Dissertation*, TU Darmstadt, 1995
- 124 Ziegler, H., Fischer, F., Schmitt-Thomas, K.-H.: Über den Einfluß der Mikrooberfläche auf das Verhalten von Feinblechen im Tiefzug, *Neue Fachberichte*, 1976, 207-210
- 125 Wohnig, W., Breun, F.: Umformeignung von Feinblech über Eindringweg bestimmen, *Bänder Bleche Rohre* 8/1986, 159-164
- 126 Reissner, J.: Einfluß der Reibung auf den Blechumformvorgang, *Blech Rohre Profile* 3/1983, 93-97
- 127 Bochmann, E.: Reibung als kritisches Phänomen in der Blechumformung, *Dr.-Ing. Dissertation*, Universität Hannover 1992
- 128 Dowson, D.: *History of tribology*, Longman, New York, 1979
- 129 Bartz, W. J.: Reibung - Maß aller Dinge ?, *Tribologie und Schmierungstechnik* 4/1991, 192-201
- 130 Fischer, F., Schmitt-Thomas, K.-H., Seul, V.: Über den Einfluß der Mikrooberfläche auf das Verhalten von Feinblechen im Tiefzug, *Stahl u. Eisen* 10/1960, 1524-1531
- 131 Fukui, S., Yoshida, K., Abe, K., Ozaki, K.: The Effect of Surface Roughness of Sheet and Tools on Deep-Drawability, *Sheet Metal Industries*, 1963, 739-738
- 132 Littlewood, M., Wallace, J. F.: The Effect of Surface Finish and Lubrication on the Frictional Variations Involved in the Sheet-Metal-Forming Process, *Sheet Metal Industries*, 1964, 925-930
- 133 Emmens, W.C.: The Influence of Surface Roughness on Friction, *IDDRG Work Group Meeting* 1988
- 134 Emmens, W.C.: Some Frictional Aspects of Aluminium in Deep Drawing, *Proc. 1st ICTMP*, 1997, 114-121
- 135 Wang, Z., Dohda, K., Yokoi, N., Haruyama, Y.: Outflow Behavior of Lubricant in Micro Pits in Metal Forming, *Proc. 1st ICTMP*, 1997, 77-82
- 136 Wanheim, T.: Friction at High Normal Pressures, *Wear*, 1973, 225-244
- 137 Schmoeckel, D., Prier, M., Staeves, J.: Topography Deformation of Sheet Metal During the Forming Process and its Influence on Friction, *Annals of the CIRP* 1997, 175-178

- 138 Steinhoff, K., Rasp, W., Pawelski, O.: Development of Deterministic-Stochastic Surface Structures to Improve the Tribological Conditions of Sheet Forming Processes, *J. of Materials Processing Technology*, 1996, 355-361
- 139 Kragelski, I. W.: *Reibung und Verschleiß*, VEB-Verlag Technik, Berlin, 1986
- 140 Greenwood, J. A., Tripp, J. H.: The elastic contact of rough spheres, *Transactions of the ASME*, 1967, 153-159
- 141 Archard, J. F.: *Wear Theory and Mechanisms*, Wear Control Handbook, United Engineering Center, New York, 1980, 35-79
- 142 Greenwood, J.A., Williamson, J.B.P.: Contact of Nominally Flat Surfaces, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 1966, 300-319
- 143 Klimczak, T., Dauzenberg, J.H., Kals, J.A.G.: On the Roughening of a Free Surface During Sheet Metal Forming, *Annals of the CIRP* 1988, 267-270
- 144 Kienzle, O., Mietzner, K.: *Grundlagen einer Typologie umgeformter metallischer Oberflächen mittels Verfahrensanalyse*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1965
- 145 Greenwood, J.A., Rowe, G.W.: Deformation of Surface Asperities During Bulk Plastic Flow, *J. Appl. Phys.*, 1965, 667-668
- 146 Fogg, B.: The Relationship Between the Blank and Product Surface Finish and Lubrication in Deep-Drawing and Stretching Operations, *Sheet Metal Industries*, 2/1967, 95-110
- 147 Wanheim, T., Bay, N., Petersen, A. S.: A Theoretically Determined Model for Friction in Metal Working Processes, *Wear*, 1974, 251-258
- 148 Wanheim, N., Bay, N.: A Model for Friction in Metal Forming Processes, *Annals of the CIRP* 1978, 189-194
- 149 Avitzur, B., Nakamura, Y.: Analytical Determination of Friction Resistance as a Function of Normal Load and Geometry of Surface Irregularities, *Wear*, 1986, 367-383
- 150 Kawai, N., Kondo, K., Nakamura, T.: The Trictional Mechanism on Surface of Metals Plastically Deformed, *Bulletin of the JMSE*, 1974, 803-809
- 151 Mössle, E.: *Einfluß der Blechoberfläche beim Ziehen von Blechteilen aus Aluminiumlegierungen*, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Stuttgart, 1983, ISBN 3-540-12837-9
- 152 Schedin, E., Thuvander, A.: Surface Asperity Deformation During Sheet Forming, *Advanced Technology of Plasticity*, 1990, 1269-1275
- 153 Staeves, J., Prier, M.: *Bedeutung der Oberflächenfeingestalt in der Blechumformung*, 20 Jahre Umformtechnik in Darmstadt, Verlag Meisenbach Bamberg, 1996, ISBN3-87525-073-7, 223-230
- 154 Sutcliffe, M. P. F.: Deformation of Rough Surfaces in Metal Forming Processes, *Proc. 1st ICTMP*, 1997, 65-70
- 155 Sutcliffe, M. P. F.: Flatening of Random Rough Surfaces in Metal Forming Processes, Submitted to *ASME Journal of Tribology*, 1996
- 156 Nürnberger, G., Schmoekel, D.: *Untersuchung der Oberflächenwandlung von Stahlblechen durch Wirkflächenreibung beim Tiefziehen*, Abschlußbericht DFG-Forschungsvorhaben Schm 463/49
- 157 Meier, B. T., Reissner, J., Bloeck, M.: Effect of the Surface Quality of the Workpiece Material on the Frictional Behaviour During Sheet Forming, *Proc. Sheet Metals in Forming Processes*, Borlänge, 1990, 43-52

- 158 Stebut von, J.: Modification of a Surface Profile's Height Parameters During Strip Drawing, *Wear*, 1986, 145-155
- 159 Schmidt, U., Bodschinna, H., Schneider, U.: Mikro-EHD: Funktionsgerechte Rauheitskennwerte durch Auswertung der Abbott-Kurve, *Antriebstechnik* 9/10/1987, 55-59 u. 65-69
- 160 Lange, K., Horlacher, J.: Oberflächenanalysen in der Umformtechnik, *Umformtechnik*, 1992, 252-255
- 161 Brown, A.J.C.: Rapid Optical Measurement of Surface, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 2/1995, 135-139
- 162 Hege, G. E., Tiziani, H. J.: Speckleverfahren zur absoluten Abstandsmessung, *Technisches Messen*, 6/1987, 237-242
- 163 Ruprecht, M., Koch, W.: Einsatz von Speckle-Verfahren zur Rauheitsmessung, IX. Internationales Oberflächenkolloquium Chemnitz, 1996, 297-308
- 164 Anbari, N., Beck, C., Trumpold, H.: The Influence of Surface Roughness in Dependence of the Probe Ball Radius with Measuring the Actual Size, *Annals of the CIRP* 1990, 577-580
- 165 Hillmann, W., Kunzmann, H.: Surface Profiles Obtained by Means of Optical Methods - Are They True Representations of the Real Surface?, *Annals of the CIRP* 1990, 581-583
- 166 N. N.: Messung des arithmetischen Mittenrauhwertes Ra und der Spitzenzahl PC an kaltgewalzten Flacherzeugnissen aus Stahl, *STAHL-EISEN-Prüfblätter (SEP)* des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, 1992
- 167 N. N.: Messung des arithmetischen Mittenrauhwertes Ra und der Spitzenzahl R_{Pc} an kaltgewalzten Flacherzeugnissen aus Stahl, *STAHL-EISEN-Prüfblätter (SEP)* des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, 2. Ausgabe, 1996
- 168 Stout, K. J., Sullivan, P. J., Dong, W. P., Mainsah, E., Luo, N., Mathia, T., Zahouani, H.: The Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions, Publication no. EUR 15178 EN of the Commission of the European Communities, ISBN 0 7044 1313 2
- 169 Weingräber, v. FL., Abou-Aly, M.: *Handbuch Technische Oberflächen*, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1989
- 170 Fritzsche, F., Hartmann, T., Heldt, E.: Erfahrungen bei der Anwendung der MOTIF-Methode zur Beschreibung technischer Oberflächen, Tagungsband IX. Int. Oberflächenkolloquium, Chemnitz, 1996, 91-102
- 171 Krystek, M.: Formfilterung durch Splines, Tagungsband IX. Int. Oberflächenkolloquium, Chemnitz, 1996, 67-78
- 172 Lonardo, P. M., Trumpold, H., De Chiffre, L.: Progress in 3D Surface Microtopography Characterisation, *Annals of the CIRP* 1996, 589-598
- 173 Chiffre De, L., Christiansen, S., Skade, S.: Advantages and Industrial Applications of the Three-Dimensional Surface Roughness Analysis, *Annals of the CIRP* 1994, 473-478
- 174 Bodschinna, H., Hilimann, W.: Oberflächenmeßtechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis, Deutsches Institut für Normung e.V., 1. Auflage 1992
- 175 Pfestorf M., Staeves, J., Wagner, S.: Definition von 3D-Oberflächenkenngrößen, *Stahl u. Eisen* 7/1997, 89-94

- 176 Staeves, J.: New 3D Roughness Parameters and Their Relationship to the Tribological Behaviour of Sibetex Sheet, Proc. 3rd Seminar on Surface Texture in Application of Steel Sheet, Zelzate, 1996
- 177 Schmoeckel, D., Staeves, J., Prier, M.: 3D-Oberflächenkenngrößen zur Beurteilung von Blech-Topografien, Metallumformtechnik 5/1998, 6-10
- 178 Geiger, M., Engel, U., Pfestorf, M.: New Developments for the Qualification of Technical Surfaces in Forming Processes, Annals of CIRP 1997, 171-174
- 179 Doege, E., Bochmann, E.: A New Comprehension of Tribology, Production Engineering, 1993, 45-48
- 180 Sobis, T., Engel, U., Geiger, M.: Numerische Simulation der Verschleißvorgänge in der Umformtechnik, Berichtsband der DGM zum Symposium "Reibung und Verschleiß", DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel, 1993, 323-330
- 181 Sobis, T.: Geometrische Oberflächeneigenschaften bei Mischreibung, Tribologie und Schmierungstechnik 4/1996, 191-197
- 182 Bowden, F.P., Tabor, D.: Reibung und Schmierung fester Körper, Springer-Verlag, 1959
- 183 Schmoeckel, D., Prier, M.: Optimierung der Oberflächenmikrostruktur von Tiefzieheblechen durch Einsatz der Methode der Finiten Elemente, Abschlußbericht DFG-Forschungsvorhaben Schm 463/56-3
- 184 Lo, S. W., Wilson, W. R. D.: A Theoretical Model of Micro-Pool Lubrication in Metal Forming, Proc. 1st ICTMP, 1997, 83-90
- 185 Neudecker, T., Pfestorf, M., Engel, U.: Einglättung strukturierter Oberflächen unter Druckbelastung mit und ohne Schmierstoffeinsatz, Tribologie und Schmierungstechnik 6/1997, 261-263
- 186 Scheers, J., Vermeulen, M., De Maré, C.: The Influence of Surface Texturing on the Tribological Behaviour of Sheet Steel, Proc. 3rd Seminar on Surface Texture in Application of Steel Sheet, Zelzate, 1996
- 187 Spurk, J. H.: Strömungslehre, Springer Verlag, 4. Auflage, 1996, ISBN 3-540-61308-0
- 188 Spurk, J. H.: Aufgaben zur Strömungslehre, Springer Verlag, 2. Auflage, 1996, ISBN 3-540-60333-6
- 189 Buckley, D. H.: Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication, Elsevier Amsterdam Oxford New York, 1981
- 190 Wagener, H.-W.: Der Auftreffimpuls beim Tiefziehen auf einfachwirkenden Pressen, Bänder Bleche Rohre 10/1997, 14-21
- 191 Panknin, W., Eychemüller, W.: Untersuchungen über die Übertragbarkeit von Ergebnissen des Näpfchenversuchs auf Großwerkzeuge beim Tiefziehen zylindrischer Teile, Mitteilung Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung, 1955, 205-209
- 192 Doege, E., Grahner, R., Schneider, R.: Stand und Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet der Umformtechnik, Tribologie und Schmierungstechnik 1/1985, 34-41
- 193 Tumfart, S.: Die Beschreibung der Rauigkeit technischer Oberflächen mittels Wahrscheinlichkeitsdichte- und Korrelationsfunktion, Feinwerktechnik & Messtechnik 7/1977, 308-312

- 194 Stauffer, D., Amnon, A.: Perkolationsstheorie: Eine Einführung, VCH Verlagsgesellschaft Weinheim New York Basel Cambridge Tokyo, 1995, ISBN 3-527-29334-5
- 195 Schmoekkel, D., Staevs, J.: Function-Orientated Filtering for Tribological Assessment of Sheet Metal Surfaces in Deep Drawing, Proc. 7th Int. Conf. on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1997, 438-444
- 196 Jonasson, M., Wihlborg, A., Gunnarsson, L.: Analysis of Surface Topography Changes in Bending under Tension Friction Test, Proc. 7th Int. Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Göteborg, 1997, 38-46
- 197 Chen, C.-C. A., Liu, W.-C., Duffie, N. A.: A Surface Topography Model for Automated Surface Finishing, Proc. 7th Int. Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Göteborg, 1997, 139-146
- 198 Untersuchungsauftrag der Adam Opel AG an das PtU der TU Darmstadt: Untersuchung verschiedener Oberflächen im Streifenziehversuch ohne Umlenkung an Zn/Ni-beschichtetem Feinblech, April 1995
- 199 Untersuchungsauftrag der Adam Opel AG an das PtU der TU Darmstadt: Untersuchung verschiedener Blechoberflächenstrukturen zum optimalen Einsatz im Preßwerk im Streifenziehversuch ohne Umlenkung, Februar 1996

13 Anhang

13.1 Kenngrößen

						Kenngröße beschreibt:	
						Leere	Abgeschlossenheit
						Feinheit	Quelle
		2 D	3 D				
R_a	arithmetischer Mittenrauhwert	x	x				SEP 1940 [166, 167], DIN 4768
R_q	quadratischer Mittenrauhwert	x	x				angelehnt an DIN 4768
R_p	Glättungstiefe	x	x				DIN 4762/1 Entwurf
R_{pm}	mittlere Glättungstiefe	x	x				angelehnt an DIN 4768
R_t	Profiltiefe	x	x				
R_y	maximale Profilhöhe	x	x				DIN 4762
R_z	gemittelte Rauhtiefe	x	x				DIN 4768
R_k	Kernrauheit	x	x				DIN 4776, ISO 13565-2
R_{pk}^*	Spitzenhöhe	x	x				
R_{vk}^*	Riefentiefe	x	x				
R_{pk}	reduzierte Spitzenhöhe	x	x				
R_{vk}	reduzierte Riefentiefe	x	x				
M_{r1}	Materialanteil Spitzen	x	x				
M_{r2}	Materialanteil Täler	x	x				
PC	Spitzenzahl	x	x		x		SEP 1940 [166, 167]
S_m	mittlerer Abstand der Profilunregelmäßigkeiten	x			x		DIN 4762
S_a	arithmetischer 3D-Mittenrauhwert		x	x			BU-Report [168]
S_q	quadratischer 3D-Mittenrauhwert		x	x			
S_{sk}	3D-Schiefe		x	x			
S_{ku}	3D-Kurtosis		x	x			
St	3D Rauhtiefe		x	x			A3D [175]
Sz	gemittelte 3D-Rauhtiefe		x	x			angelehnt an BU-Report [168] und DIN 4768, Kap. 8.1
Sz2			x	x			
S_k	3D-Kernrauheit		x	x			BU-Report [168], angelehnt an ISO 13565-2
S_{pk}^*	3D-Spitzenhöhe		x	x			
S_{vk}^*	3D-Riefentiefe		x	x			
S_{pk}	reduzierte 3D-Spitzenhöhe		x	x			
S_{vk}	reduzierte 3D-Riefentiefe		x	x			
S_{r1}	3D-Materialanteil Spitzen		x	x			
S_{r2}	3D-Materialanteil Täler		x	x			
S_{rk}	Materialanteil bei Kugelfiltertiefe		x	x		x	Kapitel 7.4
V_{vo}	Leervolumen		x	x			Arbeitskreis 3D-Oberflächenkenngrößen [175]
$V_{vo(c)}$	Leervolumen unterhalb der Durchdringung c		x	x			
V_{cl}	geschlossenes Leervolumen		x	x	x		
$V_{cl(c)}$	geschlossenes Leervolumen unterhalb der Durchdringung c		x	x	x		

				Kenngroße beschreibt:			
				Leere			
				Abgeschlossenheit			
				Feinheit			
		2	3	Quelle			
		D	D				
α_{clm}	Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils		x	x			Arbeitskreis 3D-Oberflächenkenngroßen [175]
$\alpha_{ma}(c)$	Materialflächenanteil bei vorgegebener Durchdringung c		x	x			
$\alpha_{vo}(c)$	Leerflächenanteil bei vorgegebener Durchdringung c		x	x			
$\alpha_{ci}(c)$	geschlossener Leerflächenanteil bei vorgegebener Durchdringung c		x		x		
c_{clm}	Durchdringung beim maximalem gesch. Leerflächenanteil α_{clm}		x	x	x		
$c(N_{mam})$	Durchdringung bei der maximalen Anzahl von Materialflächen		x	x			
$c(N_{vom})$	Durchdringung bei der maximalen Anzahl von Leerflächen		x	x			
$c(N_{clm})$	Durchdringung bei der max. Anzahl geschlossener Leerflächen		x	x	x		
N_{mam}	max. Anzahl Materialflächen		x			x	
N_{vom}	max. Anzahl Leerflächen		x			x	
N_{clm}	max. Anzahl geschl. Leerflächen		x		x	x	
$N_{ma}(c)$	Anzahl der Materialflächen bei vorgegebener Durchdringung c		x			x	
$N_{vo}(c)$	Anzahl der Leerflächen bei vorgegebener Durchdringung c		x			x	
$N_{ci}(c)$	Anzahl der geschl. Leerflächen bei vorgegebener Durchdringung c		x		x	x	
α_{clf}	maximaler Anteil eingeglätteter und geschlossener Leerflächen		x		x		Kapitel 13.2.1
p	Perkolationstiefe		x	x	x		[194], Kapitel 13.2.2
k	Durchdringung des Kugelfilters		x	x		x	Kapitel 13.2.3

Tabelle 28: Oberflächenkenngroßen

13.2 Algorithmen

13.2.1 Algorithmus zur Berechnung von α_{clf}

Bei der Berechnung des maximalen geschlossenen Leerflächenanteils α_{clm} wird der Anteil geschlossener Leerflächen für verschiedene Schnittiefe ermittelt. In größeren Schnittiefen werden die höher liegenden Taschen nicht mehr geschnitten, so daß deren geschlossener Leerflächenanteil in α_{clm} nicht enthalten ist.

Um auch den Anteil der höherliegenden nach unten gedrückten Taschen zu berücksichtigen kann die folgende Berechnungsmethode in den Algorithmus zur Berechnung von α_{clm} integriert werden.

Es wird ein Feld B von boolschen Variablen definiert. Die Größe von B entspricht der Anzahl der Meßpunkte. Vor Beginn der Berechnung werden alle Werte dieses Feldes auf 0 gesetzt. Danach wird mit der Berechnung von α_{clm} begonnen. Nach jedem Schnitt S werden die Punkte, die in S zu einer abgeschlossenen Schmiertasche gehören in B auf 1 gesetzt. Nach Berechnung jedes Schnittes sind in B die Punkte markiert, die bis zu dieser Schnittiefe mindestens bei einer Schnittiefe ein mal zu einer abgeschlossenen Schmiertasche gezählt wurden. Der eingeglättete geschlossene Leerflächenanteil $\alpha_{clf}(c)$ bei der Schnittiefe c entspricht dem Verhältnis der Anzahl aller Punkte zu der Anzahl der in B markierten Punkte. Je tiefer geschnitten wird, desto mehr Punkte werden in B markiert und desto größer wird α_{clf} .

α_{clf} entspricht dem Maximalwert von $\alpha_{clf}(c)$ bei einer Durchdringung von 100%. In Bild 74 ist ein typischer Verlauf von $\alpha_{clf}(c)$ zusätzlich zur Materialanteilkurve und zum geschlossenen Leerflächenanteil aufgetragen.

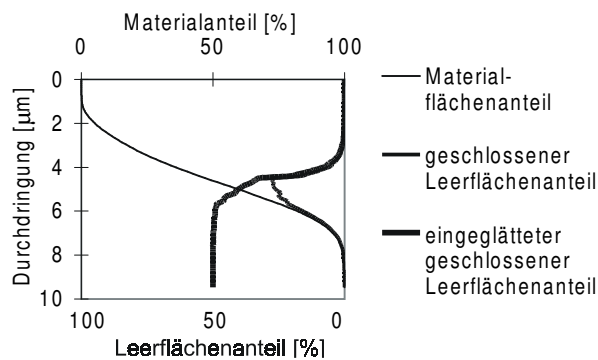


Bild 74: Materialanteilkurve mit Verlauf der Oberflächenkenngröße α_{clf}

Bei niedriger Durchdringung verläuft α_{clf} nur knapp über α_{cl} . Ab der Durchdringung c_{clm} steigt α_{clf} weiter an, während α_{cl} wieder abnimmt. Daß die Unterschiede von α_{cl} und α_{clf} erst bei deutlicher Einglättung größer werden läßt erwarten, daß sich die Kenngröße α_{clf} besonders für die Masivumformung eignen könnte.

13.2.2 Algorithmus für die Perkolationstiefe

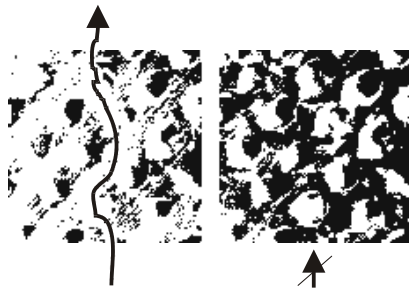


Bild 75: Horizontale Schnitte durch eine Oberfläche oberhalb (links) und unterhalb (rechts) der Perkolationstiefe

Bild 75 zeigt zwei horizontale Schnitte durch ein Lasertex-Blech. Geschnittenes Material ist schwarz, Leerflächen sind weiß dargestellt. Bei der Schnitttiefe der linken Topografie ist eine zusammenhängende Leerfläche vorhanden, die es Schmierstoff ermöglicht, von einer Seite zur anderen hindurchzufließen (zu perkolieren). Die Perkolation ist damit gegeben. In der Rechten Fläche sind zusammenhängende Materialflächen vorhanden, die dem Schmierstoff den Weg versperren, so daß die Perkolation nicht gegeben ist. Die Schnitttiefe bei der der Übergang erfolgt wird Perkolationstiefe genannt.

Der Algorithmus zur Berechnung der Perkolationstiefe basiert auf einem flood-fill-Algorithmus und erfordert rekursive Programmaufrufe.

Mit einer ersten Programmschleife werden die Schnitte für zunehmende Schnitttiefe berechnet. Für jeden Schnitt wird überprüft, ob die Perkolation gegeben ist. Je mehr Schnitte berechnet werden, desto genauer läßt sich die Perkolationstiefe bestimmen.

Zur Überprüfung der Perkolation verläuft eine zweite Schleife bei jedem Schnitt über alle Punkte einer der Kanten der Fläche (in Bild 75 beispielsweise der unteren Kante). Für jeden dieser Punkte wird zunächst geprüft, ob er ober- oder unterhalb der Schnitttiefe liegt. Für alle Punkte, die unterhalb der Schnitttiefe liegen (weiß dargestellt) wird ein Programmteil, der hier "Nachbarpunkte_prüfen" genannt werden soll aufgerufen. Dieser Programmteil überprüft, ob die vier rechts, links, vor oder gegebenenfalls hinter diesem Punkt liegenden benachbarten Punkte ebenfalls unter der Schnittfläche liegen. Liegt einer der benachbarten Punkt unter der Schnitttiefe, dann wird für diesen Punkt ein zweites mal der Programmteil "Nachbarpunkte_prüfen" aufgerufen. Die zweite Instanz von "Nachbarpunkte_prüfen" überprüft die benachbarten Punkte des zweiten Punktes. Sind alle benachbarten Punkte geprüft, dann wird diese zweite Instanz von "Nachbarpunkte prüfen" beendet und die erste Instanz überprüft die restlichen benachbarten Punkte des ersten Punktes. Dieser rekursive Aufruf von "Nachbarpunkte_prüfen" führt dazu, daß sich der Programmteil "Nachbarpunkte_prüfen" so lange immer wieder selbst aufruft, bis jeder Punkt einer zusammenhängenden Leerfläche ein mal geprüft worden ist. In "Nachbarpunkte_prüfen" wird eine zusätzliche Abfrage vorgenommen, die überprüft, ob einer der benachbarten Punkte am gegenüberliegenden Rand der Meßfläche liegt. Ist dies der Fall, dann ist eine zusammenhängende Leerfläche vorhanden und die Perkolation gegeben. Die

tatsächliche Perkolationstiefe liegt zwischen der Schnittiefe dieses Schnittes und der Schnittiefe des darüberliegenden Schnittes.

Bei anisotropen Topografien kann es hilfreich sein, die Perkolationstiefe für zwei benachbarte Kanten zu bestimmen. (In Bild 75 von unten nach oben und von rechts nach links) Bei einer geschliffenen Struktur ist die Perkolationstiefe quer zur Schleifrichtung geringer als parallel dazu. Die Differenz beider Perkolationstiefen kann als Maß für die Richtung der Oberfläche genutzt werden.

13.2.3 Algorithmus für die Kugelfilterung

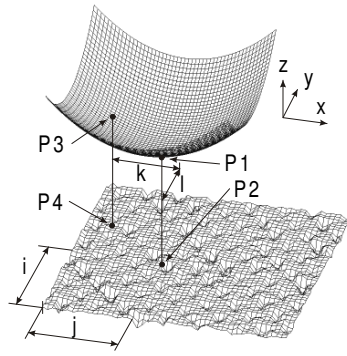


Bild 76: Variablen für die Programmierung des Kugelfilters

Der Algorithmus des Kugelfilters dient zur Berechnung der Tiefe k in der eine Kugel über eine Fläche rollt, während eine feste Anzahl von Punkten in die Kugel eindringt. Der tiefste Punkt der Kugel beschreibt die zur Filterung verwendete Welligkeit der Fläche.

Es wäre möglich mit einem iterativen Algorithmus die Kugel über jeden Punkt der Meßfläche zu setzen, und so lange abzusenken, bis die geforderte Zahl von Punkten eingedrungen ist. Ein solcher Algorithmus erfordert aber eine unnötig hohe Rechenzeit, da für jeden Punkt der Meßfläche eine Iteration durchzuführen wäre. Hinzu kommt, daß iterative Methoden das Ergebnis nur näherungsweise berechnen. Eine schnellere und nicht iterative Methode wird im folgenden beschrieben.

In einem ersten Schritt wird eine neue Fläche in der x - y -Ebene generiert. Die z -Werte werden so berechnet, daß sich die Form eines Ausschnitts einer Kugel mit dem Radius R ergibt. Der tiefste Punkt der Kugel $P1$ liegt in der Mitte der Fläche. Die Größe der Kugeloberfläche hängt von Radius der Kugel, der Anzahl der eindringenden Punkte und der Rauheit der Topografie ab. Zu große Kugeloberflächen führen zu unnötig hohen Rechenzeiten. Wird eine zu kleine Fläche gewählt, dann ist es möglich, daß neben den Ausschnitt der eingesunkenen Kugel Spitzen überstehen, die bei größerem Kugelausschnitt noch in die Kugel eindringen würden. Um sicherzugehen sollte die Größe des Kugelausschnittes so gewählt werden, daß der minimale Abstand in z -Richtung von $P1$ zu jedem Punkt des Randes des Kugelausschnittes mindestens der Höhe S_t der Topografie entspricht. Damit wird sichergestellt, daß selbst bei voll in die Topografie eingesunkener Kugel, keine Spitzen über den Kugelrand ragen.

Der tiefste Punkt der Kugel $P1$ wird in einer ersten Programmschleife in konstanter Höhe $z_k(P1)$ über jedem Punkt $P2$ der Meßfläche positioniert (Schleifenvariablen $0 < i < i_{max}$, $0 < j < j_{max}$). In einer darin verschachtelten zweiten Schleife (Schleifenvariablen $0 < k < k_{max}$, $0 < l < l_{max}$) wird für jeden Punkt der Kugeloberfläche $P3$ der Abstand zu dem darunterliegenden Punkt der Meßfläche $P4$ berechnet. Bei n eindringenden Punkten wird ein Vektor V der Dimension $n+1$ definiert, in den die berechneten Werte der Abstände der Größe nach einsortiert werden. Ist die zweite Schleife abgearbeitet, dann enthält der Vektor V die $n+1$ geringsten Abstände. Der $n+1$ -te Wert dieses Vektors entspricht den $n+1$ -geringsten Abstand, um den die Kugel abgesenkt werden muß, damit n Punkte in die Kugel eindringen. Der tiefste Punkt der abgesenkten Kugel, der dem z -Wert der Welligkeit z_w am Punkt i, j der Meßfläche entspricht, berech-

net sich dann aus der Differenz der Höhe der nicht abgesenkten Kugel $z_K(P1)$ und dem $n+1$ -ten Wert des Vektors V .

$$z_W(i,j) = z_K(P1) - \min_n \{P3(k,l) - P4(i,j,k,l)\}$$

Gleichung 7

$z_W(i,j)$: Die Höhe des Punktes des Welligkeitsprofils

$z_K(P1)$: Der tiefste Punkt der Kugel

$\min_n\{\}$: Der n -kleinste Wert der Menge $\{\}$

$P3(k,l)$: Die Höhe des Punktes der Kugel mit den Koordinaten $x=k$ und $y=l$ über der von x und y aufgespannten Ebene durch den tiefsten Punkt der Kugel

$P4(i,j,k,l)$: Die Höhe des Punktes der Meßfläche unter dem Punkt $P3$ der Kugel

13.3 Mechanismen des Reibmodells

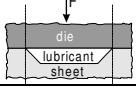
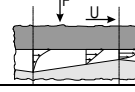
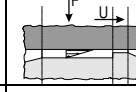
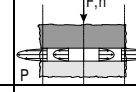
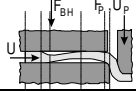
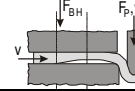
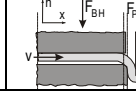
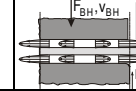
Mechanismus	hydrostatisch wirkende Schmieraschen	hydrodynamisch wirkende Flanke	elasto-plasto-hydrodynamisch wirkende Stufe	Quetschströmung
Mikro-Mechanismen				
	F_{Ns}	F_{Ndf}	F_{Nds}	F_{Nq}
Prinzip				
Voraussetzungen / günstige Bedingungen	• deutliche Einglättung • hohe Kontaktspannungen • Dehnung des Bleches	• niedrige Kontaktspannung • Hohe Viskosität • hohe Gleitgeschwindigkeit	• Einglättung der Spitzen • hohe Kontaktspannungen • hohe Gleitgeschwindigkeit	• Impulsartige Belastung • Hohe Viskosität des Schmierstoffs
Anforderungen an Topografie	• geschlossen • leer • kleine Spitzen	• voll • schwach geneigte Plateaus	• voll • flache Plateaus	• voll • flache Plateaus
Makro-Mechanismen				
	F_{Nsm}	F_{Ndfm}	F_{Ndsm}	F_{Nqm}
Prinzip				
Voraussetzungen / günstige Bedingungen	• entsprechende Werkzeuggeometrie	• entsprechende Werkzeuggeometrie • Hohe Viskosität • hohe Gleitgeschwindigkeit	• entsprechende Werkzeuggeometrie • Hohe Viskosität • hohe Gleitgeschwindigkeit	• schnelle Umformung • große homogen beanspruchte Flächen • hohe Viskosität
Anforderungen an die Topografie	• geschlossen • fein (Dichtwirkung)	• geschlossen • fein (Dichtwirkung)	• geschlossen • fein (Dichtwirkung)	• leer • geschlossen • fein

Tabelle 29: Mechanismen des Reibmodells

13.4 Versuchsbedingungen

Allgemeine Angaben (wenn in den Gruppen nicht anders angegeben)		
	Prüfstand	Reibversuchsanlage des PtU
	Prinzip	Streifenziehversuch mit ebenen Werkzeugen
	Werkzeugwerkstoff	GGG 60, in Ziehrichtung geschliffen ($R_a < 1 \mu\text{m}$)
	Werkzeug-Kontaktfläche	144 x 74 mm
	Werkzeugtemperatur	40° C, geregelt
	Blech	St 15, EDT, unbeschichtet
	Blecbreite	100 mm
	Gleitgeschwindigkeiten	50, 100, 200 und 400 mm/s
	Schmierstoff	PL 3802
	Schmierstoffmenge	2 g/m ²
	Schmierstoffaufbringung	Gummiwalzen (Kalanderprinzip)
	Reinigung	Waschöl+Rakel+2 Abquetschwalzen
Gruppe Topografie der Bleche		
	10 Topografien	St 14, ZN: SBT, EDT, LT, EBT
Gruppe Werkzeugbeschichtung und Werkzeugrauheit		
	9 Beschichtungen	GS 45 unbeschichtet und PVD TiN: unterschiedliche Beschichtungsparameter
Gruppe Schmierstoffe		
	10 Viskositäten	Prelubes von 16 bis 100 mm ² /s
Gruppe Schmierstoffmengen		
	2 Schmierstoffmengen	2 und 5 g/m ²
	5 Bleche	St 14, ZN: Lasertex, SBT, EBT
Gruppe Zink-Beschichtung der Bleche		
	5 Beschichtungen	St 14: unbeschichtet, Z, ZN, ZE, ZE ph, ZF
Gruppe Blechreinigung		
	Reinigungen	Wie oben/mit Wasser/ohne Hochdruck/ungereinigt
	4 Bleche	St 14, ZN, SBT und EBT

Tabelle 30: Versuchsbedingungen der Streifenziehversuche zur Beurteilung der Bedeutung der Topografie (Kapitel 4)

	Flachbahnversuch	Umlenkversuch	Ziehsickenversuch
Blechbreite	100 mm		
Werkzeugbreite	74 mm	120 mm	120 mm
Werkzeugradius	-	5 mm	5 mm
Umschlingungswinkel	-	45°	90° + 180° + 90°
Werkzeugwerkstoff	GG25		
Blechwerkstoff	St 14		
Blechoberflächen	1 x EDT, 2 x LT unbeschichtet, 1 EBT elektrolyt. leg. verz.		
Schmierstoff	PL 3802 (Fuchs Petrolub AG)		
Schmierstoffmenge	2 g/m ²		
Reinigung	Hochdruckreinigung mit niedrigviskosem Reinigungsöl		
Gleitgeschwindigkeit	100 mm/s		

Tabelle 31: Versuchsbedingungen der Streifenziehversuche zur Auswahl des Prüfprinzips und der Meßgrößen (Kapitel 6.1)

	Flachbahn	Napf	Pedaltopf
Maße des Werkzeugs / Bauteils	74 x 144 mm ²	Ø _{Stempel} 300 mm Ø _{Ronde} 480 mm	230 x 180 mm ²
Ziehtiefe	-	max. 150 mm	75 mm
Radius an Matrize	-	5 mm	3 mm
Werkzeugwerkstoff	Ampco 25	GG 25	Ampco 25
Stempelgeschwindigkeit	25, 50, 100, 200 und 400 mm/s	40 mm/s	
Blech	St 14, SBT		
Blechbeschichtung	ZN		
Blechdicke	0,8 mm		
Schmierstoffmenge	5 g/m ² (±1g/m ²)		

Tabelle 32: Versuchsbedingungen der Voruntersuchungen an komplexeren Bauteilen (Kapitel 6.1.2)

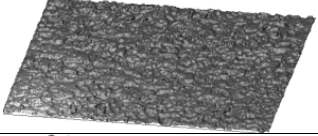
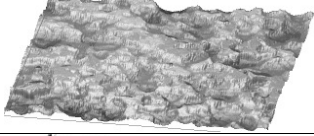
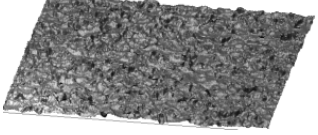
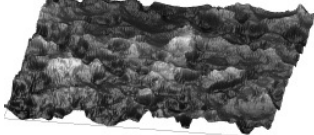
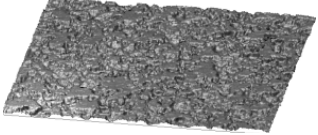
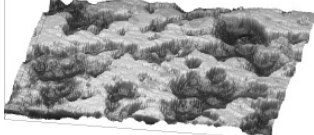
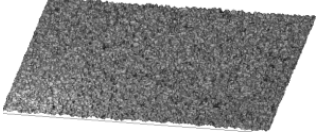
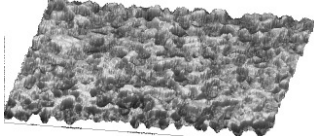
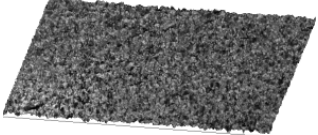
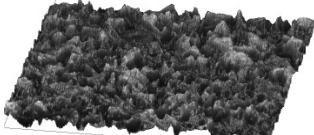
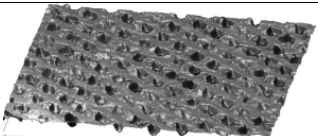
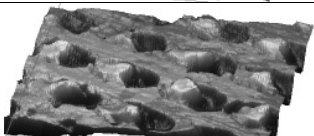
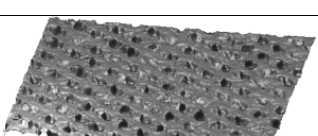
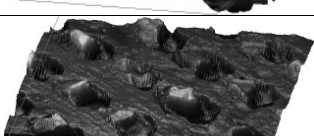
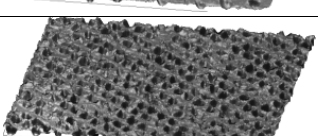
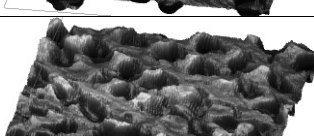
Prüfstand	Reibversuchsanlage des PtU
Prinzip	Streifenziehversuch mit ebenen Werkzeugen
Werkzeugwerkstoff	GGG 60, in Ziehrichtung geschliffen (Ra < 1 µm)
Werkzeug-Kontaktfläche	144 x 74 mm
Werkzeugtemperatur	40 °C, geregelt
Blechbreite	100 mm
Gleitgeschwindigkeiten	25, 50, 100, 200 und 400 mm/s
Schmierstoff	PL 3802 (Fuchs Petrolub AG)
Schmierstoffmenge	2 g/m ² ± 0,5 g/m ²
Schmierstoffaufbringung	Gummiwalzen (Kalandrprinzip)
Reinigung	Waschöl (Hochdruck)+Rakel+2 Abquetschwalzen

Tabelle 33: Versuchsbedingungen für die Beurteilung der tribologischen Eigenschaften der Bleche (Kapitel 8)

		Filter- parameter	nicht aus- gewerteter Rand	Punktezahl bei Filterung	Punktezahl bei Auswertung	An- zahl Filter
1	Ungefiltert, Me- thode der klein- sten Quadrate	-	0	250 x 250	250 x 250	1
2	Rechteckfilter	λ_c : 0,3 / 0,6 / 0,9 mm	0,3 / 0,6 / 0,9 mm	250 x 250	250 x 250	3
3	Gauß-Filter	λ_c : 0,3 / 0,6 / 0,9 mm	0,3 / 0,6 / 0,9 mm	250 x 250	250 x 250	3
4	Doppel- Rechteck-Filter	λ_c : 0,3 / 0,6 / 0,9 mm	0,3 / 0,6 / 0,9 mm	250 x 250	250 x 250	3
5	Doppel-Gauß- Filter	λ_c : 0,3 / 0,6 / 0,9 mm	0,3 / 0,6 / 0,9 mm	250 x 250	250 x 250	3
6	Kugelfilter, bei voller Punktezahl von 250 x 250	R:1/2/5/10/ 20/50/100 mm n: 1/10/20/ 50/100	0,24 mm	250 x 250	250 x 250	35
7	Kugelfilter mit reduzierter Punktezahl bei der Filterung	R: 1 / 2 / 5 / 10 / 20 / 50 / 100 mm n: 100	0,24 mm	200 x 200 / 150 x 150 / 100 x 100 /	250 x 250	21
8	Kugelfilter mit reduzierter Punktezahl bei Filterung und Auswertung	R: 1 / 2 / 5 / 10 / 20 / 50 / 100 mm n: 100	0,24 mm	200 x 200 / 150 x 150 / 100 x 100 / 75 x 75 / 50 x 50		35
	Summe 104					

Tabelle 34: Ausgewählte Filter und Filterparameter (Kapitel 7.4)

13.5 Untersuchte Blechtopografien

Nr	Oberfläche Schicht	Topo- grafie	gerenderte Darstellung 3 x 3 mm	Datamap-Darstellung 1 x 1 mm
1	unbe- schich- tet	SBT		
2				
3				
4	unbe- schich- tet	EDT		
5	elektr. leg. ver- zinkt (Zn/Ni)			
6	unbe- schich- tet	LT		
7				
8				

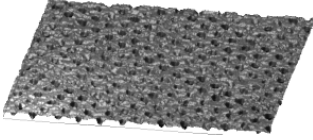
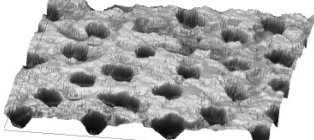
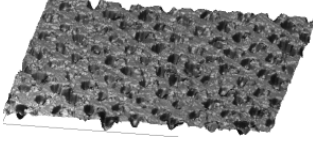
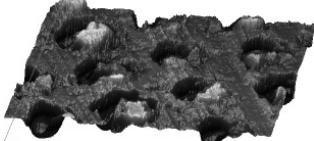
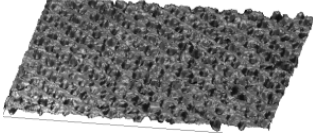
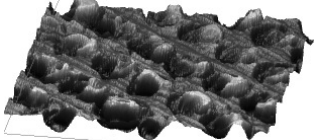
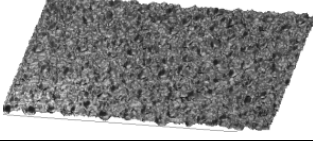
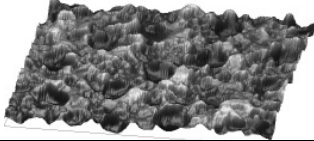
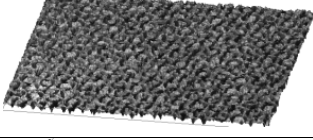
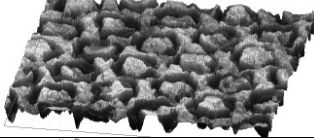
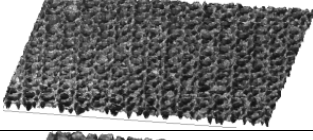
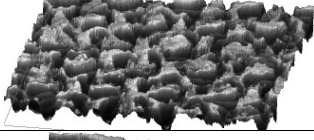
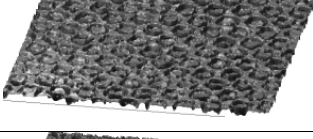
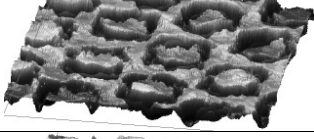
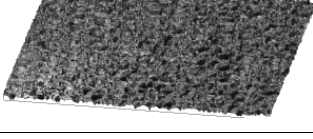
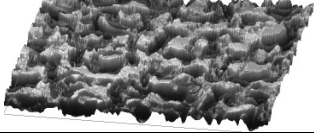
Nr	Oberfläche Schicht	Topo- grafie	gerenderte Darstellung 3 x 3 mm	Datamap-Darstellung 1 x 1 mm
9	elektr. leg. ver- zinkt (Zn/Ni)	LT		
10				
11				
12	unbe- schich- tet	LT / EDT vorge- raut		
13	elektr. leg. ver- zinkt (Zn/Ni)	EBT		
14				
15				
16				

Tabelle 35: Grafische Darstellungen der untersuchten Blechoberflächen

13.6 Tribologische Kenngrößen

Blech Nr.																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Topografie																
	SBT	SBT	SBT	EDT	EDT	LT	LT	LT	LT	LT	LT	LT/EDT	EBT	EBT	EBT	EBT
Ra	0,93	1,54	1,5	1,09	1,51	1,87	1,47	2,12	1,34	2,3	2	1,69	2	2,38	2,18	1,7
PC	49	45	53	113	116	38	43	55	47	47	62	70	92	88	59	85
Beschichtung																
	-	-	-	ZN	-	ZN	-	-	-	ZN	ZN	ZN	ZN	ZN	ZN	ZN
max. Kontaktnormalspannung [N/mm ²] bei Gleitgeschwindigkeit [mm/s]																
400	6	7	18	16	8	9	19	9	16	10	9	10	9	6	8	8
200	5	7	18	15	7	9	14	9	15	9	8	9	8	6	8	8
100	5	6	17	14	6	9	14	8	10	8	7	9	7	5	8	7
50	5	6	12	9	6	8	11	7	8	8	7	7	6	4	7	5
25	5	5	8	6	5	7	7	6	6	7	6	6	5	4	6	3
Mittelwert der max. Kontaktnormalspannung [N/mm ²]																
	5,2	6,2	14,6	12,0	6,4	8,4	13,0	7,8	11,0	8,4	7,4	8,2	7,0	5,0	7,4	6,2
Standardabweichung der max. Kontaktnormalspannung [N/mm ²]																
	0,45	0,84	4,45	4,30	1,14	0,89	4,42	1,30	4,36	1,14	1,14	1,64	1,58	1,00	0,89	2,17
Stick-Slip-Beginn [N/mm ²] bei Gleitgeschwindigkeit [mm/s]																
400	6	6	18	14	8	9	19	9	16	10	9	10	9	5	8	6
200	5	6	9	10	7	9	9	6	4	9	8	7	7	4	8	5
100	5	4	6	6	5	3	4	3	3	5	5	5	5	2	3	4
50	4	4	3	4	4	3	2	2	2	3	5	4	4	2	3	2
25	3	2	2	2	2	2	2	1	2	3	4	3	4	1	2	1
Mittelwert des Stick-Slip-Beginns [N/mm ²]																
	4,60	4,40	7,60	7,20	5,20	5,20	7,20	4,20	5,40	6,00	6,20	5,80	5,80	2,80	4,80	3,50
Standardabweichung des Stick-Slip-Beginns [N/mm ²]																
	1,14	1,67	6,43	4,82	2,39	3,49	7,19	3,27	5,98	3,32	2,17	2,77	2,17	1,64	2,95	2,24
Durchschnittliche Reibungszahl bei Gleitgeschwindigkeit [mm/s]																
400	0,06	0,12	0,08	0,04	0,11	0,11	0,11	0,12	0,08	0,10	0,11	0,11	0,07	0,13	0,11	0,10
200	0,07	0,13	0,09	0,05	0,12	0,11	0,11	0,13	0,09	0,11	0,12	0,12	0,08	0,15	0,12	0,13
100	0,07	0,15	0,11	0,06	0,13	0,12	0,12	0,14	0,11	0,12	0,12	0,13	0,10	0,17	0,13	0,13
50	0,09	0,16	0,12	0,08	0,15	0,13	0,13	0,14	0,13	0,12	0,13	0,15	0,12	0,18	0,14	0,15
25	0,11	0,16	0,14	0,12	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,13	0,13	0,15	0,13	0,20	0,14	0,19
Mittelwert der durchschnittlichen Reibungszahl																
	0,08	0,14	0,10	0,21	0,13	0,12	0,12	0,13	0,11	0,11	0,12	0,13	0,10	0,16	0,13	0,14
Standardabweichung der durchschnittlichen Reibungszahl																
	0,02	0,02	0,02	0,33	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,03

Tabelle 36: Im Streifenziehversuch gemessene tribologische Kenngrößen der untersuchten Bleche (Kapitel 8.2)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Johannes Staeves
Geburtsdatum	28.12.1965
Geburtsort	Bad Orb
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	verheiratet

Schulausbildung

1972 - 1976	Grundschule in Freigericht Somborn
1976 - 1985	Gesamtschule Freigericht, Gymnasium Abschluß: Allgemeine Hochschulreife

Wehrdienst

1985 - 1986	Grundwehrdienst, Marine
-------------	-------------------------

Studium

1986 - 1992	Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der Universität Darmstadt Abschluß: Diplom
-------------	---

Berufstätigkeit

1993 - 1997	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Pro- duktionstechnik und Umformmaschinen der Univer- sität Darmstadt. Ab 1994 Leiter der Abteilung Tribo- logie und Plastomechanik.
Ab 1998	Fertigungsverfahren-Spezialist der BMW AG (München)

Hanau, den 23. September 1998

