

Tribologie, Schmierung und Topografie in der Prozesskette Rohkarosserie

Staeves, J.

1 Einleitung

Die Entwicklung der letzten Jahre hat gezeigt, dass die Reduzierung der Herstellungskosten eines Wirtschaftsgutes zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit zwingend notwendig ist. Dies betrifft insbesondere auch den Automobilbau in allen wesentlichen Fertigungsbereichen wie Presswerk, Rohbau, Lackiererei und Montage.

Dem Presswerk kommt bei der Produktion einer Fahrzeugkarosserie sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht eine besondere Bedeutung zu. Hier wurde und wird weiterhin ein Wandel vorangetrieben, der eine Erhöhung der Mechanisierung und Rationalisierung sowie eine drastische Effizienzsteigerung zum Ziel hat. Dies wird hauptsächlich dadurch erreicht, dass neue Maschinen und Maschinenausrüstungen wie mechanisierte Pressenverkettungen, Stufen- und Großraumtransferpressen eingesetzt werden sowie durch neu konzipierte, im Regelfall aufwendigere Werkzeuge, die eine Reduzierung der Arbeitsfolgen, eine erhöhte Materialausnutzung und Abpressungen von Doppel- und Multifunktionalteilen erlauben. Nur durch die Sicherstellung der problemlosen Umformung der Pressteile ist diese hohe Zielsetzung zu realisieren. Die Qualität eines Ziehteils, und damit auch die Fertigungssicherheit im Presswerk, wird im wesentlichen von der Werkzeuggeometrie, dem Werkstoffverhalten, den Reibungsverhältnissen und dem Zusammenwirken Werkzeug/Umformmaschine bestimmt [1, 2]. Bei den folgenden Ausführungen soll insbesondere auf den Einfluss des Werkstoffes und der Tribologie näher eingegangen werden.

2 Karosseriewerkstoffe

Im Karosseriebau wurden bisher hauptsächlich kaltgewalzte Feinbleche verarbeitet, die der Gruppe der **weichen Stähle** angehören. Hierzu zählen die Qualitäten DC01 bis DC07 für elektrolytisch verzinkte und DX51 bis DX57 für feuerverzinkte Bleche (Alte Bezeichnungen: St 12, St14, Fe P0I, Fe P03 bis Fe P06, ...), die in der europäischen Norm EN 10 130 festgelegt sind.

Mit dem Ziel das Gewicht der Karosserie zu verringern, ist seit längerem eine verstärkte Forderung nach neuen Blechwerkstoffen festzustellen. Eine Möglichkeit, dieses Entwicklungsziel zu realisieren, stellt neben Aluminium und Kunststoff der Einsatz höherfester Stähle dar. Die Stahlindustrie hat aufgrund dieser Anforderungen der Automobilindustrie eine Reihe von Familien an höherfesten kaltgewalzten Feinblechen entwickelt, die es erlauben, überall dort, wo Streckgrenze und Zugfestigkeit dimensionsbestimmend sind, mit geringeren Wanddicken bei zumindest gleicher bis erhöhter Tragfähigkeit eine effiziente Gewichtsreduzierung zu erzielen [3, 4, 5]. Aus der Vielzahl der höherfesten Stähle sind für den praktischen Einsatz im Karosseriebau

hauptsächlich die bake hardening, IF (interstitial free), isotrope und die mikrolegierten Stahlsorten von besonderer Bedeutung.

Die **bake hardening Stähle** werden nach Stahl-Eisen-Werkstoffblatt SEW 094 entsprechend der garantierten Mindeststreckgrenze in folgende Stahlsorten unterteilt:

- H180B (ZStE180 BH)
- H220B (ZStE220 BH)
- H260B (ZStE260 BH)
- H300B (ZStE300 BH)

Damit wird deutlich, dass die Mindeststreckgrenzen im Bereich von 180 N/mm² bis 300 N/mm² liegen können, was annähernd einer Verdoppelung der Dehngrenze entspricht. Der Verfestigungsmechanismus beruht hauptsächlich auf Mischkristallhärtung und Kornfeinung. Durch eine Wärmebehandlung kann die Festigkeit nach dem Umformen durch den bake hardening Effekt um ca. 40 N/mm² weiter gesteigert werden. Der bake hardening Effekt beruht auf einer künstlichen Kohlenstoffalterung, die während der Einbrennphase der KTL-Beschichtung nach der Umformung eintritt.

Im Vergleich zu weichen Güten zeichnen sich die bake hardening Stahlsorten durch erhöhte Festigkeiten und lediglich geringen Einbußen bei der Umformbarkeit aus [6]. Daher werden diese höherfesten Stahlgüten im Karosseriebau auch bei relativ schwierigen Ziehteilen eingesetzt.

Die **mikrolegierten höherfesten Stahlgüten** sind im Stahl-Eisen-Werkstoffblatt SEW 093 genormt. Hiernach werden folgende Sorten unterschieden:

- H260LA (ZStE 260)
- H300LA (ZStE 300)
- H340LA (ZStE 340)
- H380LA (ZStE 380)
- H420LA (ZStE 420)

Die Streckgrenzen reichen demnach von 260 N/mm² bis 420 N/mm² und liegen damit höher als die der bake hardening Güten. Die Verfestigung beruht hier im wesentlichen auf einer Ausscheidungshärtung und einer Kornverfeinerung. Dies wird hauptsächlich durch die Legierungselemente Titan und Niob erreicht, die als Karbonitride ausgeschieden werden. Der Anteil der Legierungselemente soll 0,1% nicht übersteigen [7].

Die mikrolegierten höherfesten Stahlsorten haben eine eingeschränkte Umformbarkeit. Daher werden sie im Regelfall für Teile verwendet, die geringe Umformgrade aufweisen oder durch einfache Umformvorgänge, wie z.B. Biegen, Abkanten und Prägen, hergestellt werden.

Interstitial-free-Stähle (IF, IF-HR oder HS-IN) sind vakuumentkohlte Sondertiefziehgüten die durch Zulegierung von Titan und/oder Niob ein hohes Umformvermögen erreichen. Höhere Festigkeiten (H180Y bis H300Y) können diese Stähle bei Zugabe von mischkristallverfestigenden Elementen wie Phosphor, Mangan oder Silizium aufweisen [8, 9]. Die Kosten dieser Stähle liegen im allgemeinen über denen der weichen Güten.

Isotrope Stähle stellen eine neuere Entwicklung dar, die durch ein gezielt eingestelltes Fließverhalten (r-Werte um 1) ein gleichmäßiges Fließen des Blechwerkstoffs in das Werkzeug unterstützen. Zur Zeit werden die folgenden Güten angeboten:

- H220I (H220G1, ZStE 220 i , HIZ 220, H220I)
- H260I (H260G1, ZStE 260 i , HIZ 260, H260I)
- H300I (H300G1, ZStE 300 i , HIZ 300, H300I)

Mehrphasenstähle (Dualphasen-, TRIP-, CP- und MS-Stähle) werden zur Zeit weiterentwickelt, um noch höhere Festigkeit bei möglichst guter Umformbarkeit zu erreichen

Dual Phasen Stähle (DP) erzielen aufgrund von Martensitinseln im Gefüge hohe Festigkeiten, aufgrund der duktilen ferritischen Matrix sind aber auch relativ hohe Umformgrade möglich. Diese Stähle sind relativ neu und werden in Europa erst in einigen neueren Fahrzeugen eingesetzt.

- H270X (DP 500)
- H300X (DP 600)
- H310X (DP 600)
- H340X (DP 600)

Weitere Güten mit Streckgrenzen über 700 und Zugfestigkeiten über 1400 N/mm² befinden sich zur Zeit in Entwicklung und in einzelnen Serienanwendungen.

TRIP-Stähle (transformation induced plasticity) befinden sich zur Zeit bei mehreren Stahlherstellern im Entwicklungsstadium, einige werden schon für Serienanwendungen angeboten. Ihre hohen Festigkeiten entstehen während des Umformvorgangs durch Phasenumwandlung von Restaustenitanteilen in Martensit [8].

- H400T, (HT700T, TRIP 700)
- H420T, (HT800T, TRIP 800)

Copmplexphasen und Martensitphasenstähle (CP und MS) erreichen Zugfestigkeiten von bis zu 1500 N/mm². Die Umformbarkeit ist jedoch so weit eingeschränkt, dass sich diese Werkstoffe im Automobilbau lediglich für wenige nur gering umzuformende Bauteile eignen.

- CP 800
- CP 900
- CP 1000
- MS 1000
- MS 1200

Warmumformbare Stähle (Borstähle) werden vor der Umformung erwärmt, um die Festigkeit während der Umformung zu senken und die Umformbarkeit zu erhöhen. Im Werkzeug wird das Bauteil abgekühlt und gehärtet. Dabei können Bauteilfestigkeiten von über 1500N/mm² erreicht werden. Die Kombination aus Werkstofffestigkeit und Temperatur stellt besonders hohe Anforderungen an das tribologische System.

3 Beschichtete Feibleche

Die vom Kunden erwartete lange Nutzungsdauer erfordert ein umfassendes Korrosionsschutzsystem, bestehend aus einer Vielzahl aufeinander abgestimmter Maßnahmen. Eine wichtige Komponente ist hierbei der Einsatz beschichteter Stahlbleche. Grundsätzlich lassen sich die für den Karosseriebau verfügbaren oberflächenveredelten Feibleche in drei Hauptgruppen unterteilen:

- metallische
- organische und
- Duplex-Schichten.

Die **metallischen Überzüge**, hauptsächlich Zink und Zinklegierungen, werden in der Regel durch elektrolytische Abscheidung oder Schmelztauchen aufgebracht, in Ausnahmefällen auch durch Bedampfen oder Plattieren [10]. Der Korrosionsschutzmechanismus beruht auf dem kathodischen Verhalten der metallischen Schicht [11]. Zusätzliche Nachbehandlungen wie z.B. Chromatpassivieren oder vorphosphatieren dienen neben der Erhöhung des Korrosionsschutzes bei Transport und Lagerung insbesondere der Verbesserung der Verarbeitbarkeit im Presswerk. Diese Nachbehandlungsverfahren werden bereits beim Stahlhersteller in einer kontinuierlichen Bandbeschichtungsanlage durchgeführt, die im Regelfall in der metallischen Beschichtungslinie als eine Bearbeitungsstation integriert ist. Im Automobilbereich werden überwiegend die folgenden Zink-Überzüge eingesetzt:

- Z Feuerverzinkt (Schmelztauchen)
- ZE Elektrolytisch verzinkt
- ZN Elektrolytisch legierungsverzinkt (Zink-Nickel)
- ZF Galvannealed (Z + Wärmebehandlung)

Die **organischen Beschichtungen** (Bonazinc, Grannocoat, ...), hauptsächlich zinkpigmentierte Harze, werden meist im Coilcoating-Verfahren auf das Stahlblech aufgetragen. Der Korrosionsschutz liegt im wesentlichen in der Barrierewirkung des Überzuges, wobei dem kathodischen Schutz durch die Zinkpigmente lediglich eine untergeordnete Bedeutung zukommt.

Bei **Duplex-Beschichtungen** werden die Vorteile der metallischen mit denen der organischen Überzüge kombiniert. Sie bestehen aus einer metallischen Grundbeschichtung, die mit einer organischen Schicht versiegelt ist. Der Korrosionsschutz setzt sich aus der kathodischen Wirkung der metallischen Schicht sowie der Barrierewirkung des organischen Überzuges zusammen.

Die Beschichtungen beeinflussen in hohem Maße die weitere Verarbeitung, insbesondere den Umformprozess im Presswerk.

4 Prüfverfahren zur Beurteilung der Umformbarkeit

Um neue Werkstoffe hinsichtlich ihrer Eignung zu beurteilen, werden Prüfmethode unterschiedlicher Kategorien benötigt. Eine realitätsnahe Prüfung mit abgesicherten Ergebnissen ist meist nur mit komplexen Bauteilen und deshalb mit hohem Aufwand möglich. Um je nach Aufgabe auch schnelle und kostengünstige Prüfungen vornehmen zu können, sind zahlreiche Modellversuche und Meßmethoden entwickelt worden, die in grundlegende und nachahmende Prüfverfahren unterteilt werden können. Da diese Methoden einen Kompromiss zwischen Aufwand und Übertragbarkeit der Ergebnisse darstellen, muss für die Anwendung dieser Methoden bekannt sein, inwieweit deren Ergebnisse auf den Realprozess übertragbar sind, und es ist erforderlich, die Ergebnisse von Bauteilversuchen, Modellversuchen und Meßmethoden gegenüberzustellen (**Bild 1**). Die Auswahl der für die Umformung geeigneten Werk- und Betriebsstoffe wird zusätzlich durch Anforderungen aus anderen Bereichen der Prozesskette erschwert (**Bild 2**). So müssen Schmierstoffe beispielsweise nicht nur günstige tribologische Verhältnisse sicherstellen, sondern oft auch während Transport und Lagerung für ausreichenden

Korrosionsschutz sorgen und beim Fügen der Blechteile, sowie beim Lackieren dürfen sich Schmierstoffreste nicht negativ auswirken. Neben den Prüfverfahren zur Beurteilung der Umformbarkeit ist deshalb in der Regel eine Reihe weiterer Prüfverfahren anzuwenden.

Zu den wesentlichen grundlegenden Werkstoffprüfungen, die in der Praxis angewandt werden, zählen insbesondere die Bestimmung der mechanischen Kennwerte im Zugversuch und die Messung der Oberflächenrauheit mit dem Tastschnittverfahren.

Der in EN 10002 genormte einachsige Zugversuch dient zur Ermittlung wichtiger, mechanischer Kennwerte wie beispielsweise:

- Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm²]
- Zugfestigkeit R_m [N/mm²]
- Bruchdehnung A_{80} [%]
- Gleichmaßdehnung A_g [%]
- Senkrechte Anisotropie r_m [-]
- Verfestigungsexponent n_m [-]

Mittels dieser Materialkennwerte ist eine allgemeine Beurteilung der Umformeigenschaften möglich. Dieses unterschiedliche Umformverhalten kann qualitativ mit dem in **Bild 3** dargestellten Zusammenhang zwischen der Umformkenngröße Bruchdehnung und der 0,2%-Dehngrenze der derzeit verfügbaren Stahlgüten beschrieben werden [3]. Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Streckgrenze die Dehnungswerte A_{80} stetig abnehmen.

Die Bestimmung der Oberflächenkennwerte wird nach dem Tastschnittverfahren gemäß Stahleisen-Prüfblatt SEP 1940, DIN 4762 und DIN 4768 durchgeführt. Hierbei kann die Abtastung der Oberfläche mechanisch mit einer Diamantnadel oder optisch mit einer Lasereinrichtung erfolgen.

Zu den in der Praxis bedeutenden Oberflächenkennwerten zählen:

- Mittenrauhwert R_a [μm]
- Spitzenzahl (peak count) PC [1/cm]
- Gemittelte Rautiefe R_z [μm]
- Glättungstiefe R_p [μm]
- Gemittelte Glättungstiefe R_{pm} [μm]

Bei der spanlosen Formgebung, insbesondere bei der Herstellung von Karosserieteilen, bestimmen neben den Werkstoffeigenschaften auch die Umformverfahren das Ergebnis in erheblichem Maße. Zu den wesentlichen Verfahren beim Umformen eines Karosserieteils zählen das Streckziehen und das Tiefziehen. In der Praxis tritt beim Karosserieziehen an einem Bauteil im Regelfall eine Kombination beider Umformverfahren auf. Zur Beurteilung der Umformeignung von Blechen sind daher eine Reihe verfahrensbezogener Prüfverfahren entwickelt worden. Von der Vielzahl der vorgeschlagenen nachahmenden Prüfverfahren haben sich in der Praxis insbesondere der Erichsen-Tiefungsversuch und der Näpfchen-Tiefziehversuch als vergleichende Testmethode durchgesetzt.

Der Tiefungsversuch nach Erichsen (DIN 50101 und DIN 50102) liefert als Kennwert den Erichsen-Tiefungswert, mit dem hauptsächlich das Streckziehverhalten von Feinblechen bewertet werden kann.

In **Bild 4** ist zu erkennen, dass neben der Blechdicke die Werkstoffgüte den Erichsen-Tiefungswert entscheidend mitbestimmt. Hierbei liegen mit zunehmender Festigkeit geringere Tiefungswerte vor. Es gilt generell, dass mit höherfesten Stählen eine

geminderte Streckziehbarkeit zu erwarten ist.

Ein weit verbreitetes Verfahren zur Beurteilung der Tiefziehbarkeit von Blechen ist das Nöpfchen-Tiefziehprüfverfahren. Aus Blechronden unterschiedlichen Durchmessers werden bei gleichbleibendem Stempeldurchmesser zylindrische Nöpfchen mit flachem Boden gezogen. Je größer die Ronden sind, die ohne Reißen des Bauteils (Bodenreißer) gezogen werden können, desto günstiger ist die Tiefziehbarkeit zu beurteilen. [12].

Zur Beurteilung der tribologischen Verhältnisse, die im wesentlichen vom Schmierstoff, dem Blech- und Werkzeugwerkstoff sowie der Oberfläche des Werkzeuges und des Bleches abhängen, werden in der Praxis hauptsächlich Nöpfchenziehversuche mit Umformkraftmessung und Streifenziehversuche durchgeführt.

Beim Streifenziehversuch wird ein Blechstreifen über eine Ziehkante (= mit Umlenkung), zwischen zwei parallelen Werkzeugplatten (= Flachbahnversuch) oder über eine Ziehsicke (= Ziehsickerversuch) gezogen, die mit einem definierten Anpressdruck auf die Blechoberfläche einwirken. Hierbei können verschiedene Kräfte (Zug-, Reibungs- und Normalkräfte) gemessen werden, um daraus eine Reibungszahl zu berechnen. Der Test eignet sich besonders dann, wenn eine allgemeine Eignung von z.B. verschiedenen Schmierstoffen beurteilt werden soll.

Abschließend kann festgestellt werden, dass eine Reihe standardisierter Prüfverfahren entwickelt wurde, mit denen eine erste Beurteilung der Umformbarkeit und der Reibungsverhältnisse möglich ist. Diese Ergebnisse können jedoch z.B. auf großflächige Teile mit komplexer Geometrie nur bedingt übertragen werden, so dass in der Praxis häufig weitere Versuche an dem zu untersuchenden Bauteil unumgänglich sind. Letztendlich wird meist nur durch den parallelen Einsatz von Bauteilversuchen, Modellversuchen und Meßmethoden (Bild 1) eine ausreichende Prozesssicherheit beim Einsatz eines komplexen umformtechnischen Systems erreicht.

5 Kennwerte zur Beurteilung der Tiefziehbarkeit und der tribologischen Verhältnisse

5.1 Arbeitsbereich, Grenzziehverhältnis

In der Praxis wird die Herstellbarkeit rotationssymmetrischer Teile häufig anhand des Ziehverhältnisses abgeschätzt. Bei zylindrischen Teilen mit kreisrunden Ausgangszuschnitten kennzeichnet dieser Wert das Verhältnis von Rondendurchmesser d_0 zu Stempeldurchmesser d_{St} [13]. Das Ziehverhältnis bestimmt das umzuformende Blechvolumen und beeinflusst damit maßgeblich die zur Umformung notwendige Ziehkraft, die geringer als die Reißfestigkeit sein muss. Das größtmögliche Ziehverhältnis, bei dem noch kein Bodenreißer auftritt, wird als Grenzziehverhältnis bezeichnet. Diese Größe stellt eine wichtige Verfahrensgrenze bei der Beurteilung des Ziehteils dar. Das Grenzziehverhältnis wird bei einer charakteristischen Blechhalterkraft erreicht. Bei zu hohen Blechhalterkräften treten Reißen, bei zu niedrigen Falten 1. Ordnung (unter dem Blechhalter) auf. Bei abnehmendem Ziehverhältnis (kleinere Ronden) kann die Blechhalterkraft in einem größeren Bereich variiert werden, ohne Reißen oder Falten zu erzeugen. Diese Verfahrensgrenzen können, wie in **Bild 5** angegeben, anhand eines sogenannten Arbeitsbereiches [12] graphisch dargestellt werden. Bei der Bestimmung eines Arbeitsbereiches wird die Reißergrenze experimentell ermittelt. Diese hängt im wesentlichen von den Werkstoffkennwerten, den Reibungsverhältnissen und den

geometrischen Abmessungen ab. Die Faltengrenze kann ebenfalls gemessen oder mit Hilfe der folgenden Formel berechnet werden [14]:

$$p_{Bh} = 0,0025 \cdot \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0,5 \cdot d_{St}}{100 \cdot s_0} \right] \cdot R_m$$

mit p_{Bh} = Blechhalterdruck in N/mm²
 β = Ziehverhältnis
 d_{St} = Stempeldurchmesser in mm
 s_0 = Ausgangsblechdicke in mm
 R_m = Zugfestigkeit in N/mm²

Dabei ist mit

$$F_{Bh} = p_{Bh} \cdot A_{Fl}$$

und

$$A_{Fl} = \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_N^2)$$

und

$$d_N = d_{St} + 2u_z + 2r_z$$

mit F_{Bh} = Blechhalterkraft in N
 A_{Fl} = Flanschfläche in mm²
 d_0 = Rondenausgangsdurchmesser in mm
 d_N = Rondendurchmesser am Einlauf in den Ziehringradius in mm
 u_z = Ziehspalt in mm
 r_z = Ziehringradius in mm

die theoretisch wirkende Blechhalterkraft F_{Bh} zu Ziehbeginn zu berechnen. Der Schnittpunkt beider Grenzgeraden stellt dabei das Grenzziehverhältnis dar.

In **Bild 6** sind die Arbeitsbereiche einiger ausgewählter Werkstoffgüten wiedergegeben. Die wichtigsten geometrischen Parameter, die mechanischen Kennwerte sowie die gemessenen Blechdicken der Versuchswerkstoffe sind in den Abbildungen angegeben. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit dem zur Zeit am häufigsten eingesetzten DC04 (St14) die besten Tiefziehergebnisse zu erzielen sind. Die Umformbarkeit nimmt beim Tiefziehen der Stahlgüten mit größer werdender Festigkeit ab. Die ermittelten maximalen Ziehverhältnisse der untersuchten Stahlqualitäten können wie folgt angegeben werden:

- DC04 (St14) : $\beta_{max} = 2,11$
- H220B (ZStE 220 BH) : $\beta_{max} = 2,09$
- H300LA (ZStE 300) : $\beta_{max} = 1,99$

Die Faltengrenze verschiebt sich mit zunehmender Festigkeit zu höheren Blechhalterkräften. Hiernach ist die minimale Blechhalterkraft beim Tiefziehen der härtesten Güte H220B (ZStE 220 BH) im Durchschnitt um ca. 15% höher als beim DC04 (St14). Bei dem mikrolegierten härtesten Stahl H300LA (ZStE 300) liegt diese sogar um ca. 40% über dem DC04-Wert. Dagegen verlaufen die Reißergrenzen bei den untersuchten Stahlgüten

ähnlich.

Bei Variation des Schmierstoffs bleibt die Faltengrenze wie **Bild 7** zeigt konstant, aber die Reißergrenze verschiebt sich mit zunehmender Viskosität zu höheren Blechhalterkräften. Für den Umformprozess steht damit bei höherer Viskosität ein größerer Arbeitsbereich zur Verfügung.

Werden beim Näpfcchenziehversuch die Umformkräfte erfasst, so kann hieraus die Reibungszahl beim Tiefziehen ermittelt werden. Nach Gücker [15] kann beispielsweise die Reibungszahl mittels der beim Umformprozess verbrauchten Reibarbeit bestimmt werden. Damit kann eine ziehwegabhängige Reibungszahl berechnet werden. Ein bei BMW entwickeltes Verfahren stützt sich auf den Siebelschen Ansatz zur Berechnung der maximalen Ziehkraft beim Tiefziehen. Hier kann durch eine Iteration für den Moment des Auftretens der Maximalkraft eine Reibungszahl ermittelt werden.

In **Bild 8** sind die beim Tiefziehen verschiedener Schmierstoffklassen auftretenden Reibungszahlen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit dem im Walzwerk aufgetragenen Korrosionsschutzöl die höchsten Reibungszahlen erreicht werden. Unverdünnte Emulsionen, die von den Schmierstoffherstellern als Hochleistungsschmierstoffe eingestuft werden, weisen gute Schmiereigenschaften auf. Bei einer Verdünnung dieser Emulsionen mit Wasser (1:10), wie diese häufig in der Praxis zum Einsatz kommen, verringert sich diese Schmierwirkung sehr deutlich. Die besten Ergebnisse werden mit höherviskosem Ziehöl erzielt. Hier liegen die Reibungszahlen am niedrigsten.

Die Reibungsverhältnisse haben besonders bei größeren Ziehteilen einen wesentlichen Einfluss auf das Tiefziehergebnis. Nach Spur [16] vergrößert sich mit zunehmender Ziehteilgröße der relative Anteil der Reibungskraft bezogen auf die Gesamtkraft ganz erheblich. Hiernach nimmt die Reibungskraft, wie in **Bild 9** dargestellt, exponentiell mit dem Stempeldurchmesser zu, während die erforderliche Umformkraft zunächst bis zu einem Maximum ansteigt und anschließend geringfügig abfällt. Aufgrund dieser Zusammenhänge wird das maximale Ziehverhältnis durch den Stempeldurchmesser in hohem Maße beeinflusst. Mit größer werdendem Stempeldurchmesser und damit zunehmender Ziehteilgröße nimmt das Grenzziehverhältnis stetig ab [17], **Bild 10**. Daraus kann abgeleitet werden, dass mit zunehmender Ziehteilgröße die Verbesserung der tribologischen Bedingungen besonders wichtig ist.

6 Werkzeugauslegung

Die Auslegung von Umformwerkzeugen, beginnend mit dem Werkzeugkonzept und dem Werkzeugwerkstoff bis hin zur funktionalen Ausführung, hängt im wesentlichen von den geforderten Stückzahlen ab. Grundsätzlich werden bei höher werdenden Stückzahlen immer aufwendigere Werkzeuge aufgebaut.

6.1 Werkzeugkonzepte für begrenzte Stückzahlen

Bei geringen Stückzahlen, wie sie z.B. im Prototypenbau vorliegen, werden die Werkzeuge in der Regel so einfach wie möglich ausgelegt. Hier liegen die Schwerpunkte auf kurzfristiger Verfügbarkeit, hoher Änderungsflexibilität und kostengünstiger Herstellung. Für Kleinst- und Kleinserien haben sich

- zweiteilige Werkzeuge, sogenannte „Klopfwerkzeuge“,
- einteilige Werkzeuge unter Einsatz von Wirkmedien (z.B. Fluidzell) und

- vereinfachte dreiteilige Werkzeuge

durchgesetzt [18].

Zweiteilige Werkzeuge erlauben eine kostengünstige, flexible Fertigung einzelner Teile, allerdings minderer Qualität. Bei dieser Fertigungsart muss auch mit einem erhöhten Anteil manueller Nacharbeit gerechnet werden.

Werden bei der Fertigung von Blechteilen Umformverfahren mit Wirkmedien angewendet, können hierbei **einteilige Werkzeuge** zum Einsatz kommen. Dadurch ist eine besonders schnelle Teileverfügbarkeit gewährleistet und eine eventuell notwendige Geometrieänderung kurzfristig umsetzbar. Dies ist in besonderem Maße beim Prototypenbau häufig erforderlich.

Mit zunehmenden Stückzahlen wird der Aufbau von **vereinfachten dreiteiligen Ziehwerkzeugen** und von Werkzeugen für Beschneide- und Nachfolgevorgänge wirtschaftlich. Dabei sind jedoch längere Aufbauzeiten in Kauf zu nehmen.

6.2 Werkzeugwerkstoffe bei begrenzten Stückzahlen

In Abhängigkeit vom umzuformenden Blechwerkstoff, von Blechdicke und Bauteilgeometrie, insbesondere aber auch von der geplanten Teilestückzahl, kommen unterschiedliche Werkstoffe zum Einsatz. Für geringe Stückzahlen sind es vor allem Cerrotru, Zamak und Gießharze.

Cerrotru ist eine eutektische Legierung aus etwa 58% Wismut (Bi) und 42% Zinn (Sn). Wegen ihres niedrigen Schmelzpunktes können Werkzeuge mit wenig Aufwand durch Abgießen auf Holz- oder Kunststoffmodelle, auf Wachs oder Musterbleche hergestellt werden. Da Cerrotru nahezu schwindungsfrei erstarrt, sind die daraus gefertigten Werkzeuge nach einem Oberflächenfinish direkt einsetzbar. Nachteilig sind die hohen Materialkosten und die wegen der geringen Festigkeit nur begrenzte Werkzeugstandzeit. Bei größeren Stückzahlen, bei ziehtechnisch schwierigeren Bauteilen oder höherfesten und dickeren Blechwerkstoffen kann das deutlich verschleißfestere **Zamak** verwendet werden, eine Legierung aus rund 93% Zink, 4% Aluminium und 3% Kupfer. Im Vergleich zu Cerrotru erfordert das Vergießen von Zamak einen erheblichen Mehraufwand für den Modellbau, da das Schwindmaß beim Erstarren (1,2%) durch die Gießform oder das Modell zu kompensieren ist, wenn umfangreiche Nacharbeit am Werkzeug vermieden werden soll. Wegen seiner höheren Schmelztemperatur ist Zamak zwar nicht mehr auf Kunststoff oder Wachs verarbeitbar, es kann aber in einfache offene Sandformen abgegossen werden.

Als **Gießharze** werden Gemische aus Epoxidharz und Härter bezeichnet, die einfach in offene Formen vergießbar sind und hier zur Herstellung von Oberflächenschichtguss-Werkzeugen dienen. Das nahezu schwindungsfreie Aushärten ohne Druckanwendung nach dem Abguss, zum Beispiel auf Kerne aus Metall, Holz oder Polymerbeton, ermöglicht nacharbeitsfreie, formgenaue Werkzeuge mit hoher Oberflächenqualität.

6.3 Großserienwerkzeuge

Umformwerkzeuge für hohe Stückzahlen müssen über eine lange Zeit (Serienabdeckung und nach Produktionseinstellung weitere Ersatzteilherstellung) eine prozesssichere Fertigung der Bauteile gewährleisten. Im Regelfall sind es komplexe, dreiteilige Werkzeuge, die so dimensioniert sind, dass diese lange Produktionszeit garantiert werden kann. Als Werkzeugwerkstoff kommen hauptsächlich die Gusswerkstoffe GG 25 Cr Mo V sowie GGG 60 bis 70 zur Anwendung. Bei Teilen, die sehr hohe Umformungen und damit

auch sehr hohe Umformkräfte aufweisen, kommt darüber hinaus auch Werkzeugstahl (z.B. 1.2379), gehärtet und eventuell beschichtet zum Einsatz.

6.4 Reibungsverhalten verschiedener Werkzeugwerkstoffe

Die Festlegung des Werkzeugwerkstoffes hat zwangsläufig auch eine unmittelbare Auswirkung auf die tribologischen Verhältnisse beim Umformen. In **Bild 11** und **Bild 12** sind die Reibungszahlen der o.g. Werkzeugwerkstoffe mit zwei verschiedenen Schmierstoffen, einer werksüblichen Emulsion und einem höherviskosen Ziehöl, vergleichend aufgezeigt. Die Ermittlung der Reibungszahlen erfolgte hierbei nach der in Kap. 5 beschriebenen Methode mit Hilfe des Siebelschen Ansatzes.

Es ist deutlich zu erkennen, dass beim **Oberflächenschichtguss-Werkzeug** die Reibungsverhältnisse am günstigsten sind. Dies gilt sowohl für elektrolytisch verzinkte als auch für blanke Stahlbleche sowie für beide untersuchten Schmierstoffe, Emulsion und Ziehöl. Im Vergleich zum Standardwerkstoff GG 25 liegen beim Kunststoffwerkzeug die ermittelten Reibungszahlen um ca. 50-70% niedriger.

Beim **Zamak-Werkzeug** sind die Reibungszahlen für alle untersuchten Varianten geringer als bei einem GG 25-Werkzeug. Im Vergleich zum Standardwerkstoff GG 25 liegen diese bei Zamak um ca. 25-35% niedriger.

Insbesondere beim Tiefziehen von verzinkten Stahlblechen, die durch eine poröse, kristalline Schicht charakterisiert sind, werden die Reibungsverhältnisse bei einem **GG 25-Werkzeug** deutlicher ungünstiger. Die Reibungszahlen liegen um ca. 25% höher als z.B. beim Tiefziehen blanker Bleche oder beim Ziehen mit deutlich höheren Schmierstoffmengen.

Beim **Cerrotru-Werkzeug** sind die Reibungsverhältnisse für alle untersuchten Varianten am ungünstigsten. Aufgrund der erhöhten Reibung konnten lediglich niedrigere Blechhalterkräfte eingestellt werden. Bei der Variante St14 mit Emulsion konnten bei dem gewählten Ziehverhältnis keine Gutteile gefertigt werden. Im Vergleich zum Standardwerkstoff GG 25 liegen beim Cerrotru-Werkzeug die ermittelten Reibungszahlen um 50-70% höher.

7 Schmierstoffeinsatz in der Serienfertigung

Die in Kapitel 2 beschriebenen Karosseriewerkstoffe werden vom Stahlhersteller grundsätzlich mit einer Grundbeölung an die Automobilindustrie geliefert. Damit soll hauptsächlich ein ausreichender Korrosionsschutz während Transport und Lagerung gewährleistet werden. Die Freigabe der Grundöle erfolgt durch die Automobilhersteller nach umfassenden Untersuchungen hinsichtlich

- Gesundheitsrisiken,
- Umweltverträglichkeit,
- KTL-Verträglichkeit, (Kathodische Tauch-Lackierung)
- Entfernbarkeit in Entfettungsanlagen
- Schweißbarkeit
- Verträglichkeit mit Kleb- und Dichtstoffen
- Fügbarkeit und
- Korrosionsschutz.

Neben dem temporären Korrosionsschutz während des Transportes und der Lagerung

dient die Grundbeölung beim Abpressen von einfachen Ziehtteilen als Ziehhilfsmittel. Zur Minimierung der erforderlichen Ölmengen wird der Beölungsgrad bauteilspezifisch in Abhängigkeit der Umformschwierigkeit festgelegt. Beispielsweise werden für Außenhautteile eine leichte ($1,5 \text{ g/m}^2$ je Seite), für einfache Ziehtteile eine mittlere (2 g/m^2 je Seite) und für schwierige Pressteile eine starke Grundbeölung ($2,5$ bis 3 g/m^2 je Seite) gefordert.

Bei der Abpressung ziehkritischer Teile ist ein partielles Aufbringen von zusätzlichem Schmierstoff unumgänglich (**Bild 13**). Für diese Anwendung haben sich die wasserlöslichen Emulsionen gegenüber herkömmlichen Ziehölen durchgesetzt.

Für Außenhautteile werden die Stahlbleche im Regelfall im Presswerk in der Abcoilanlage oder direkt vor der Pressenstraße mit einem dünnflüssigen Waschöl oder Wasser gereinigt und definiert beölt. Damit wird sichergestellt, dass keine Verschmutzungen und eventuell lose Zinkpartikel in die Presswerkzeuge verschleppt werden, die bei Außenhautteilen zu inakzeptablen Oberflächeneindrücken führen können.

Der Einfluss des Ziehhilfsmittels wurde bereits in Kap. 5, vgl. Bild 8, diskutiert. Hieraus lässt sich grundsätzlich ableiten, dass gegenüber dem walzwerkseitig aufgebracht Korrosionsschutzöl eine mit Wasser vermischte Emulsion nur eine geringfügige Verbesserung des Reibungszustandes zur Folge hat. Eine deutliche Reduzierung der Reibungszahlen ist mit dem Einsatz von nicht verdünnten Emulsionen (nach Herstellerangaben als Hochleistungsschmierstoffe eingestuft) zu erreichen. Die weitaus besten Ergebnisse sind mit höherviskosen Ziehölen zu realisieren.

Eine neuere Entwicklung stellen die sogenannten Prelubes dar. Bei ihnen handelt es sich um Schmierstoffe, die sowohl den Schutz vor Korrosion als auch in eingeschränktem Umfang gute Schmierwirkung bieten. Damit ermöglichen diese Schmierstoffe nicht nur bei einfachen, sondern auch bei zunehmend komplexeren Ziehtteilen die Einsparung von Zusatzbeölung und Waschprozessen [19]. Sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht bieten Prelubes damit interessante Perspektiven.

8 Werkzeugbeschichtungen

Als erste praktikable und besonders umweltverträgliche Maßnahme zur Verbesserung des Reibungsverhaltens hat sich ein regelmäßiges Polieren der kritischen Werkzeugbereiche erwiesen. Mit dem zunehmenden Einsatz höherfester Stähle genügt diese Maßnahme in vielen Fällen nicht mehr den Anforderungen, da hier die Verschleißfestigkeit in besonderem Maße an Bedeutung gewinnt. Auch durch die vermehrte Verwendung verzinkter Stahlbleche sind erheblich höhere Anforderungen an die tribologischen Verhältnisse zu stellen, insbesondere zur Vermeidung von Zinkabrieb in den Presswerkzeugen.

Lösungsansätze stellen hierbei beschichtete Werkzeuge dar, mit verschleißhemmender und reibungsmindernder Wirkung oder beschichtete Einsätze bzw. Einsätze aus einem anderen Grundwerkstoff, der diesen hohen Anforderungen genügt. Bei diesen Überzügen haben sich hauptsächlich das Nitrieren, das Hartverchromen und das TiC/TiN-Beschichten durchgesetzt. Werkstoffe wie z.B. gehärteter Werkzeugstahl oder Aluminiummehrstoffbronzen eignen sich als Material für Einsätze in großen Werkzeugen, um eine gezielte örtliche Verbesserung der Reibungsverhältnisse zu erreichen.

In **Bild 14** sind die ermittelten Reibungszahlen beim Tiefziehen von Stahlblechen mit ausgewählten Werkzeugwerkstoffen bzw. Werkzeugbeschichtungen dargestellt. Die

wesentlichen Umformparameter können der Grafik entnommen werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die typischen Werkzeug-Grundwerkstoffe GG 25 Cr Mo V, GGG 60 und der gehärtete Werkzeugstahl ähnliche Reibungsverhältnisse aufweisen. Hier liegen nahezu gleiche Reibungszahlen vor. Der Einsatz einer Aluminiummehrstoffbronze, z.B. Ampco 26, bewirkt eine Reibungssenkung. Die Reibungszahlen verringern sich um etwa 18%. Die TiC/TiN-Beschichtung begünstigt das Reibungsverhalten ganz erheblich. Hier konnten Reibungszahlen gemessen werden, die nahezu 40% niedrigere Werte aufweisen als ein GG 25 Cr Mo V.

9 Blechtopografien

Zusätzlich zur Auswahl einer geeigneten Werkzeugauslegung, einer Beschichtung und eines Schmierstoffs kann das Reibungs- und Verschleißverhalten durch die Wahl der Blechoberflächenstruktur entscheidend beeinflusst werden.

Eine glatte Blechoberfläche führt bei schwierigen Umformvorgängen zu kritischen tribologischen Bedingungen, da während der Umformung keine ausreichende Schmierstoffmenge zwischen Blech und Werkzeug gehalten werden kann. Die Bleche werden deshalb bei der Herstellung im letzten Walzgerüst mit einer rauen Walze, die ihre Rauheitsstruktur auf das Blech überträgt, dressiert.

Um die Möglichkeiten abzuschätzen, die tribologischen Bedingungen durch die Topografie zu verbessern, wurden die Ergebnisse von Streifenziehversuchen mit ebenen Werkzeugen ausgewertet [20]. In verschiedenen Untersuchungen wurde jeweils entweder nur die

- Topografie der Bleche,
- Werkzeugbeschichtung,
- Werkzeugtopografie,
- Schmierstoffart,
- Schmierstoffmenge,
- Blechbeschichtung oder die
- Reinigungsmethode der Bleche

variiert.

Das Maß für den Einfluss einer Gruppe ist die maximal erreichte Kontaktnormalspannung. Sie gibt an mit welchem maximalen Druck die Werkzeuge aufeinander gepresst werden können, so dass sich das Blech gerade noch ohne zu reißen ziehen lässt. Je höher diese maximale Kontaktnormalspannung ist, desto günstiger ist das tribologische System zu bewerten. Die Bedeutung ist aus der Differenz des besten und des schlechtesten Versuchsergebnisses der jeweiligen Gruppe errechnet. Diese gibt an, wie weit tribologischen Bedingungen durch Variation dieser Einflussgröße beeinflusst werden können.

Der Vergleich der Gruppen in **Bild 15** zeigt die größte Bedeutung für die Topografie. Die Unterschiede zum Schmierstoff und zur Schmierstoffmenge sind aber so gering, dass dieses Ergebnis auch aufgrund der Unsicherheit solcher Untersuchungen nicht überbewertet werden darf. In der Gruppe der Werkzeugwerkstoffe und Werkzeugbeschichtungen wurden ausschließlich für große Stückzahlen geeignete Werkstoffe untersucht. Unter Einbeziehung von Werkstoffen für kleine Stückzahlen ist für diese Gruppe, wie auch die Ergebnisse in Bild 11 bis Bild 14 zeigen, ein größerer Einfluss des Werkzeugwerkstoffs zu erwarten.

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. Es ist deshalb davon auszugehen, dass man allein durch die Wahl der Blechtopografie eine ähnliche Vergrößerung des Prozessfensters wie in Bild 7 erreichen kann. 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.

9.1 Dressierverfahren

Zum Aufräumen der Dressierwalzen stehen zur Zeit 5 Verfahren zur Verfügung. **Bild 16** zeigt eine Gegenüberstellung der Dressierverfahren.

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. 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 Salzgitter Stahl AG (Preussag Stahl AG), der Winterthurer Metallveredelung AG und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung entwickelt. Zur Herstellung der mit Pretex bezeichneten Blechtopografie wird die Walze mit dem Topochrom-Verfahren elektrolytisch hartverchromt. Dazu wird die Walze in einem Reaktor 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. 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.

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 Vergleich von

- theoretischen Überlegungen zur Wirkungsweise der Topografie,
- Modellversuchen und
- Ergebnissen aus der Fertigung

ein verbessertes Verständnis über die Wirkungsweise der Topografie zu erlangen, dann kann daraus abgeleitet werden, welche Eigenschaften eine aus tribologischer Sicht optimierte Topografie aufweisen sollte.

9.2 Tribologische Wirkmechanismen der Topografie

Die Wirkungsweise der Topografie ist zur Zeit noch Gegenstand mehrerer Forschungsarbeiten. [20, 21, 22, 23, 24] Neben einem Mindest-Schmierstoff-Aufnahmevermögen führen hohe Spitzenzahlen, wie sie z.B. mit EDT und Pretex herstellbar sind, im allgemeinen zu günstigem tribologischen Verhalten. Mit Verfahren, die auf dem Blech kraterartige Strukturen erzeugen (Lasertex, EBT und Pretex), bezweckt man abgeschlossene Schmiertaschen, in denen sich während der tribologischen Belastung ein hydrostatischer Druck aufbaut, der reibungssenkend wirkt. Zusätzlich zu den hydrostatischen Mechanismen wirken hydrodynamische Effekte an Flanken der Oberflächenstrukturen.

Mit **Bild 17** wird versucht, die verschiedenen in der Literatur beschriebenen Effekte übersichtlicher zu strukturieren.

Hydrostatisch wirkende Mikro-Schmiertaschen

Abgeschlossene Schmiertaschen 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 [25]. Wie die Simulationsergebnisse von Prier [26] und Neudecker [24] mit der Methode der Finiten Elemente zeigen, kann der Druck in den Schmiertaschen 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 Schmiertaschen 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.

Hydrodynamisch wirkende Mikro-Flanken

Bilden die Topografie von Blech und Werkzeug einen sich stetig verengenden Spalt, dann kann im Schmierstoff hydrodynamischer Druck aufgebaut werden

Elasto- und plasto- hydrodynamisch wirkende Mikro-Stufen

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 plastohydrodynamische Effekte erzeugt werden [27].

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.

Makro- und Mikro-Quetschströmungen

Ein weiterer hydrodynamischer Effekt ist zu beobachten, wenn der Niederhalter auf das Blech aufsetzt und den Schmierstoff seitlich verdrängt [20]. 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 Ziehtteilen für diese Einglättung benötigt wird, hängt von der Größe der beanspruchten Fläche, der Viskosität des Schmierstoffs und der Topografie ab. Im mechanisch rheologischen Modell [28, 29] wird dieser Mechanismus durch die offenen hydrodynamischen Schmieraschen abgebildet.

Hydrostatisch wirkende Makro-Schmieraschen

Die von Grahert [30] und Emmens [31] beschriebene Entstehung von Makroschmieraschen 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.

Hydrodynamisch wirkende Makro-Flanken

In Analogie zu den Mikro- und Makro-Schmieraschen können auch Flanken lokale und makroskopische hydrodynamische Effekte bewirken. Makroskopische Flanken entstehen wie die makroskopischen Schmieraschen bei entsprechender Werkzeuggeometrie und bei entsprechender Dickenänderung des Bleches.

Hydrodynamisch wirkende Makro-Stufen

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.

Aus diesen Überlegungen lassen sich die folgenden Anforderungen an eine aus tribologischer Sicht günstige Topografie ableiten [20]:

1. Hohe Spitzen, um Drücke durch Quetschströmungen nutzen zu können
2. Schmale und kleine Spitzen, 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 Einglättung eine "Schmierstoffreserve" in die Kontaktzone gedrückt werden kann.
5. Hohe Anteile abgeschlossener Leerflächen, um große Flächenanteile mit hydrostatisch wirkenden Schmieraschen zu erreichen
6. Topografie hoch abgeschlossen, um bereits bei geringer Einglättung hydrostatische Anteile nutzen zu können
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.
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.

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.

Welcher Mechanismus in realen tribologischen Systemen zu welchem Anteil wirkt, hängt neben der Topografie von verschiedenen weiteren Einflussgrößen ab. So ist zum Beispiel die Geschwindigkeit des Umformprozesses von entscheidender Bedeutung dafür, ob hydrodynamische Effekte wirken können. Bei hochviskosen Schmierstoffen ist bereits bei geringeren Geschwindigkeiten mit stärkeren hydrodynamischen Effekten zu rechnen, als bei niedrigviskosen Schmierstoffen.

Voraussetzung, um diese Zusammenhänge näher untersuchen zu können, sind Messmethoden, die eine quantitative Beschreibung der Merkmale der Oberflächen

ermöglichen.

9.3 Rauheitskenngrößen

In internationalen Normen und in der Literatur wird eine kaum überschaubare Anzahl von Oberflächenkenngrößen beschrieben. 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. Auf eine Beschreibung der Berechnungsmethoden wird hier verzichtet, da dies zu viel Raum einnehmen würde. Stattdessen werden entsprechende Literaturhinweise angegeben.

Man unterscheidet Senkrecht- Waagrecht- und kombinierte Kenngrößen [32, 33]. Bei 3D-Messungen werden zusätzlich flächen- und volumenorientierte Kenngrößen berechnet [34, 35]. Senkrechte Kenngrößen wie R_a (arithmetischer Mittenrauhwert) 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 [36, 37] und das Verhältnis R_y/R_a [38].

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 im Stahleisen-Prüfblatt SEP 1940 [39,40] 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 [36, 37, 38, 41, 42], haben sie sich für stochastische Oberflächenstrukturen von Blechen durchgesetzt.

In **Bild 18** sind die Möglichkeiten, Oberflächenkenngrößen zu berechnen, klassifiziert.

- 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.
- 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 [32]. Beispiele sind die Kenngrößen S_a , S_t 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. Diese Kenngrößen beschreiben die selben Eigenschaften von Blechoberflächen, wie die 2D-Kenngrößen aus den Spalten 1 und 2. Solange die selben Auswertungsmethoden wie bei der 2D-Messung verwendet werden, bringen die 3D-Messungen keine grundsätzlichen Vorteile gegenüber der einfacheren 2D-Messung [20].
- 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 [32, 43]. Entsprechende echte 3D-Kenngrößen sind in [32] und [44] 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 hydrostatischer Druck aufbaut, lässt sich als Funktion der Durchdringung angeben [32, 44]. 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 [32]
- 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 [46, 47].

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.

9.4 Streifenziehversuche

Bei der Diskussion um geeignete Oberflächenstrukturen wird immer wieder die Frage gestellt, welches Dressierverfahren die aus tribologischer Sicht besten Ergebnisse liefert. Dass diese Frage nicht pauschal beantwortet werden kann, soll mit den folgenden Untersuchungsergebnissen verdeutlicht werden.

Mit der Reibversuchsanlage des PtU an der TU Darmstadt wurden in den letzten Jahren mehrere mit verschiedenen Verfahren dressierte Bleche untersucht [20]. Die Randbedingungen wie Werkzeugwerkstoff und Schmierung wurden möglichst konstant gehalten, lediglich die Rauheit der Bleche wurde variiert. **Bild 19** zeigt, dass für jede Topografie die Reibungszahlen mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit abnehmen, was einen Hinweis auf hydrodynamische Effekte darstellt. Das Bild zeigt aber auch, dass es nicht möglich ist, anhand der Herstellungsmethode eindeutig zu erkennen, ob das Blech hohe oder niedrige Reibungszahlen aufweist. Mit mehreren Herstellungsmethoden wurden sowohl Bleche hergestellt, die hohe Reibung aufweisen, als auch solche mit niedriger Reibung.

Zur Beschreibung der Blechoberfläche reicht es deshalb nicht aus, nur das Herstellungsverfahren anzugeben. Jede Herstellungsmethode ermöglicht die Variation von Herstellungsparametern, so dass stark unterschiedliche Oberflächen mit dem selben Verfahren herstellbar sind. Eine eindeutige Beschreibung ist nur bei Angabe aller Parameter oder durch die Angabe von Rauheitskenngrößen möglich.

9.5 Zusammenhänge zwischen Rauheitskenngrößen und Ergebnissen aus Streifenziehversuchen

Mit den im Folgenden dargestellten Versuchsergebnissen soll aufgezeigt werden, in wie weit man Streifenziehversuche und Rauheitsmessungen dazu nutzen kann, die zuvor beschriebenen Überlegungen zu überprüfen.

In **Bild 20** sind die Höhe S_{pk} bzw. Größe S_{r1} der Rauheitsspitzen über dem Unterschied der Reibungszahlen bei hoher und geringer Gleitgeschwindigkeit aufgetragen. Je höher die Spitzen der Rauheit sind, desto größer ist der Unterschied der Reibungszahlen bei hoher und niedriger Gleitgeschwindigkeit. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass kleine schmale Spitzen es ermöglichen, dass die Spitzen während des Reibvorgangs so weit einglätten, dass sich zwischen der Werkzeugoberfläche und dem Kernprofil der Blechrauheit schmale Schmierkeile ausbilden können. Große hohe Spitzen verhindern, dass die Blechoberfläche während des Reibvorganges so weit einglättet. Eine Blechoberfläche, bei der die Spitzen klein sind, führt deshalb zu deutlicheren hydrodynamischen Effekten, als eine mit größeren Spitzen.

In **Bild 21** sind die S_k -Werte der Bleche über der maximalen Kontaktnormalspannung des Streifenziehversuch dargestellt. Niedrige S_k -Werte deuten auf ein flaches Kernprofil mit ausgeprägten Plateauflächen hin. Die maximale Kontaktnormalspannung ist ein Maß für die maximale Druckbelastung, die im Streifenziehversuch aufgebracht werden kann, ohne dass das Blech reißt. Die Maximale Kontaktnormalspannung hat sich im Streifenziehversuch an der TU Darmstadt als eine der geeignetsten Kenngrößen zur Beurteilung tribologischer Systeme für die Blechumformung erwiesen. Je größer die maximale Kontaktnormalspannung eines Bleches ist, desto günstiger sind die tribologischen Bedingungen.

Es ist ein leichter Trend festzustellen, dass mit niedrigeren S_k -Werten höhere Kontaktnormalspannungen erreicht werden. Eine mögliche Erklärung ist, dass bei einer

Oberfläche mit flachem Kernprofil mehr Flächen zur Verfügung stehen, die mit der Werkzeugoberfläche Schmierkeile bilden können.

Dieser Trend ist in Bild 21 allerdings nicht sehr deutlich ausgeprägt. Betrachtet man die Oberflächen allerdings genauer, dann stellt man fest, dass die mit Quadraten gekennzeichneten Punkte unterhalb der Trendlinie größere und höhere Spitzen haben als die mit Dreiecken gekennzeichneten Bleche oberhalb der Trendlinie. Berücksichtigt man dass das Reibverhalten durch große und hohe Spitzen negativ beeinflusst wird, dann wird deutlich, dass in Bild 21 zwei Effekte überlagert sind. Die besten Ergebnisse werden von den Blechen erreicht, die sowohl ein flaches Kernprofil (niedrige S_k -Werte), als auch kleine flache Spitzen (niedrige S_{pk} - oder S_{r1} -Werte) haben. Zu große Spitzen verhindern auch bei Oberflächen mit günstigem Kernprofil, dass viele Flächen hydrodynamisch wirken können.

Das mit einem Dreieck gekennzeichnete Blech, das nur geringe maximale Kontaktnormalspannungen erreicht, passt nicht zu dieser Erklärung. Es erreicht keine hohen Kontaktnormalspannungen, da es bereits bei geringer Belastung durch Kaltverschweißungen zwischen Blech und Werkzeug versagt. Es weist aber als einziges der untersuchten Bleche einen Ra-Wert unter $1\ \mu\text{m}$ auf, was darauf schließen lässt, dass das Leervolumen zu gering ist, so dass nicht genug Schmierstoff in der Oberfläche aufgenommen und gehalten werden kann.

In **Bild 22** ist das Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils über der maximalen Kontaktnormalspannung aufgetragen. Das Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils ist ein Maß für den Anteil der Blechoberfläche, in dem Schmierstoff in abgeschlossenen Schmiertaschen so eingeschlossen werden kann, dass hydrostatischer Druck aufgebaut werden kann.

Drei der vier Bleche mit hohem geschlossenem Leerflächenanteil erreichen höhere maximale Kontaktnormalspannungen, was auf die Wirkung der hydrostatischen Schmiertaschen hinweisen kann. Ein Blech erreicht trotz eines geringen Anteils geschlossener Leerflächen hohe Kontaktnormalspannungen. Eine mögliche Erklärung ist, dass bei diesem Blech aufgrund der kleinen flachen Spitzen und der geringen Kernrautiefe die hydrodynamischen Effekte ausreichen, um hohe Kontaktnormalspannungen zu erreichen.

Deutlichere Zusammenhänge bestehen noch zwischen den Anzahlen der Leerflächen und der maximalen Kontaktnormalspannung (**Bild 23**). Es sollten folglich eher viele kleine Schmiertaschen vorliegen, als wenige große. Eine Erklärung ist, dass bei vielen kleinen Schmiertaschen auch mehr Kanten vorliegen, an denen hydrodynamische und elasto-plasto-hydrodynamische Effekte auftreten können.

Die Ergebnisse zeigen, dass man in den Ergebnissen aus Rauheitsmessungen und Streifenziehversuchen einige Hinweise auf die Wirkung der in Kapitel 9.2 beschriebenen Mechanismen ableiten kann. Es bleibt jedoch noch Forschungsarbeit zu leisten, bis die Zusammenhänge so weit durchdrungen sind, dass man aus Rauheitskenngrößen eindeutig auf das tribologische Verhalten schließen kann. Schwerpunkt aktueller Arbeiten sind u.A. geeignete Messgeräte, Messbedingungen und Filtermethoden.

Ziel muss es sein, die Topografien so zu optimieren, dass sie im Presswerk eine prozesssichere Umformung auch unter schwierigen Umformbedingungen ermöglichen. Es ist deshalb zu überprüfen, ob sich die dargestellten Zusammenhänge auch unter Praxisbedingungen bestätigen lassen.

9.6 Untersuchungen im Presswerk

Untersuchungen im Presswerk sind um ein Vielfaches aufwendiger als z.B. die Streifenziehversuche. Zum einen lassen sich nicht so einfach eindeutige Messgrößen erfassen, zum anderen wirken unter Serienbedingungen viele weniger kontrollierbare Störgrößen auf das Ergebnis ein. Es liegen deshalb nur relativ wenige Untersuchungen zum Einfluss der Topografie auf das Umformergebnis im Presswerk vor.

Ziel der von Pfestorf [23] durchgeführten Untersuchungen in einem Presswerk war es, die Aussagefähigkeit der 3D-Kenngrößen für die Qualitätssicherung zu überprüfen und ein Hilfsmittel für die Klassifizierung der Blechoberflächen zu finden. Insgesamt wurden vier Versuchsreihen mit vier unterschiedlichen Karosseriebauteilen durchgeführt. Bei den Abpressungen unter Serienbedingungen wurden die Bauteile Stirnwand, Tunnel, Rückwand und C-Säule (Innenblech) verwendet. Je Bauteil wurden sowohl stochastisch (SBT, ECD (PreTex) und EDT) wie auch deterministisch (EBT und LT) texturierte Oberflächenstrukturen eingesetzt. Die zusätzliche Bezeichnung wie zum Beispiel TA bei EBT-TA dient zur Unterscheidung der unterschiedlichen Strukturen. T bedeutet die Abkürzung für Tunnel und A die Bezeichnung der ersten EBT-Struktur.

Um einen direkten Vergleich der Aussagefähigkeit von 2D- und 3D-Kenngrößen ziehen zu können, wurden an den jeweiligen Proben sowohl 2D- wie auch 3D-Messungen durchgeführt. Um einen Einfluss des Werkstoffs auf das Prozessergebnis auszuschließen, wurden parallel zu den Oberflächenanalysen auch die mechanischen Kennwerte ermittelt. Diese lagen bei allen verwendeten Blechen innerhalb der üblichen Toleranzen.

Die Beurteilung und Quantifizierung der Abpressergebnisse erfolgte mit einem neu definierten Qualitätsindex QI. Ein Qualitätsindex von 6 entspricht einem optimalen Abpressergebnis, ein Qualitätsindex von 0 entspricht einem schlechten Abpressergebnis. Das Material konnte nicht verpresst werden. In den Qualitätsindex fließen für die Karosseriebauteile Tunnel und Stirnwand die drei Kriterien Fertigteilqualität, Fresserbildung und die relative Produktionsleistung ein (**Tabelle 1**). Da bei den Karosseriebauteilen C-Säule und Rückwand wegen der geringeren Komplexität der Umformoperation teilweise die Beölungsmenge reduziert werden kann, wurde diese zusätzlich mit in den Qualitätsindex einbezogen (**Tabelle 2**).

| Bewertungsziffer | Fertigteilqualität | Fresserbildung | Produktionsleistung |
|------------------|---|--|--|
| 2 | keine Einschnürung, keine Quetschfalten | keine Fresser | Sollfertigungszeit wird weniger als 50% überschritten |
| 1 | Einschnürung und Faltenbildung vorhanden, führt aber noch nicht zum Ausschuss | pro Coil tritt <u>ein Mal</u> Fresserbildung auf | Sollfertigungszeit wird zwischen 50 und 100% überschritten |
| 0 | Einschnürung und Faltenbildung führen vermehrt zu Ausschuss | pro Coil tritt <u>mehr als ein Mal</u> ein Fresser auf | Sollfertigungszeit wird um mehr als 100% überschritten |

Tabelle 1: Bewertungsskala für die Erstellung der Qualitätsindizes des Karosseriebauteils *Getriebetunnel* und *Stirnwand* (maximal möglicher Qualitätsindex: 6)

| Bewertungsziffer | Fertigteilqualität | Fresserbildung | Beölungsmenge | Produktionsleistung |
|------------------|--|--------------------------------|--------------------|--|
| 0 | vermehrt auftretender Ausschuss | tritt häufiger als ein Mal auf | normale Beölung | Sollfertigungszeit wird um mehr als 100% überschritten |
| 1 | Falten führen nur zu Nacharbeit, Einschnürung führt nicht zu Ausschuss | tritt maximal ein Mal auf | reduzierte Beölung | Sollfertigungszeit wird zwischen 50 und 100% überschritten |
| 2 | keine Einschnürung, keine Falten | | | Sollfertigungszeit wird um weniger als 50% überschritten |

Tabelle 2: Bewertungsskala für die Erstellung der Qualitätsindizes der Bauteile *Rückwand* und *C-Säule* (maximal möglicher Qualitätsindex: 6)

Eine Auswahl der Ergebnisse der Untersuchungen ist in den folgenden Bildern dargestellt. **Bild 24** zeigt für alle untersuchten Bleche die 2D-Kennwert arithmetischer Mittenrauwert R_a und Spitzenzahl P_c gemessen nach SEP1940 dar. Die Verteilung der Messwerte zeigt sehr deutlich, dass kein Zusammenhang zwischen den 2D-Kenngrößen und dem Qualitätsindex besteht.

In **Bild 25** ist das geschlossene Leervolumen über dem Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils aufgetragen. Je größer der geschlossene Leerflächenanteil und das geschlossene Leervolumen sind, desto besser ist das Abpressergebnis.

Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass der Schritt von der 2D- zur 3D-Oberflächenanalyse auch im Presswerk eine wesentlich bessere Aussagefähigkeit im Bezug auf das Abpressverhalten gebracht hat.

10 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass neben Werkstoff, Werkzeuggeometrie und dem Zusammenwirken Presse/Werkzeug die durch die Topografie beeinflussten tribologischen Verhältnisse das Umformergebnis entscheidend beeinflussen. Hierbei wird die Umformbarkeit in hohem Maße durch die Werkstoffeigenschaften wie Güte, Oberfläche und Beschichtung mitbestimmt. Die Tribologie ist im wesentlichen durch Faktoren wie Oberflächenrauheit und Schmierstoff charakterisiert.

Mit den beschriebenen Prüfverfahren können vergleichende Tests durchgeführt werden, mittels derer die Umformbarkeit und die tribologischen Verhältnisse grundsätzlich beurteilt werden können. Damit kann der allgemeine Zusammenhang zwischen den gängigen Blechgüten, Werkzeugwerkstoffen und Schmierstoffen und der Umformbarkeit sowie den Reibungszahlen beim Tiefziehen aufgezeigt werden. Die unmittelbare Übertragung dieser Ergebnisse auf großflächige Bauteile komplexer Gestaltung ist jedoch nur bedingt möglich, was häufig in der Praxis zusätzliche Versuche unter Serienbedingungen an der zu untersuchenden Geometrie notwendig macht. Die so zu erreichende Optimierung des Umformprozesses, insbesondere im Hinblick auf die tribologischen Verhältnisse, ist und wird zukünftig mit zunehmender Mechanisierung und Rationalisierung eine wesentliche Voraussetzung zur Gewährleistung der prozesssicheren Fertigung von Karosserieteilen sein.

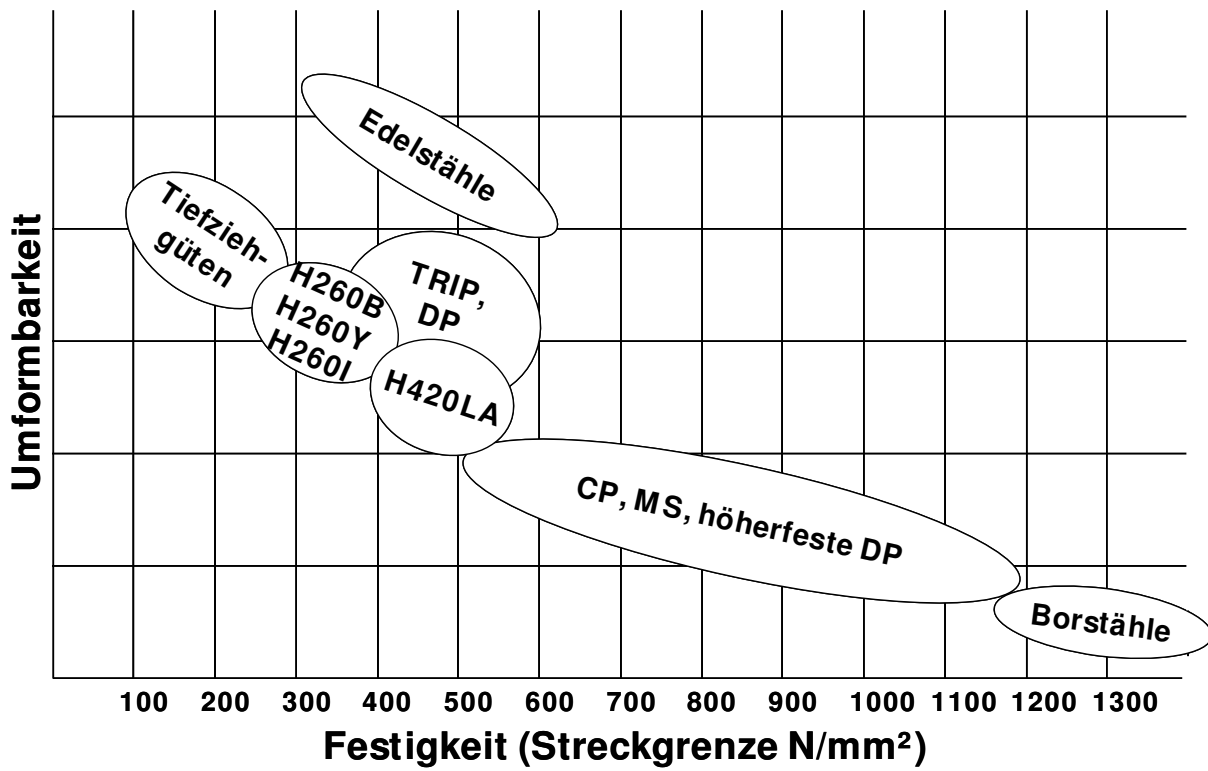


Bild 3: Umformbarkeit und Festigkeit verschiedener Stahlgüten

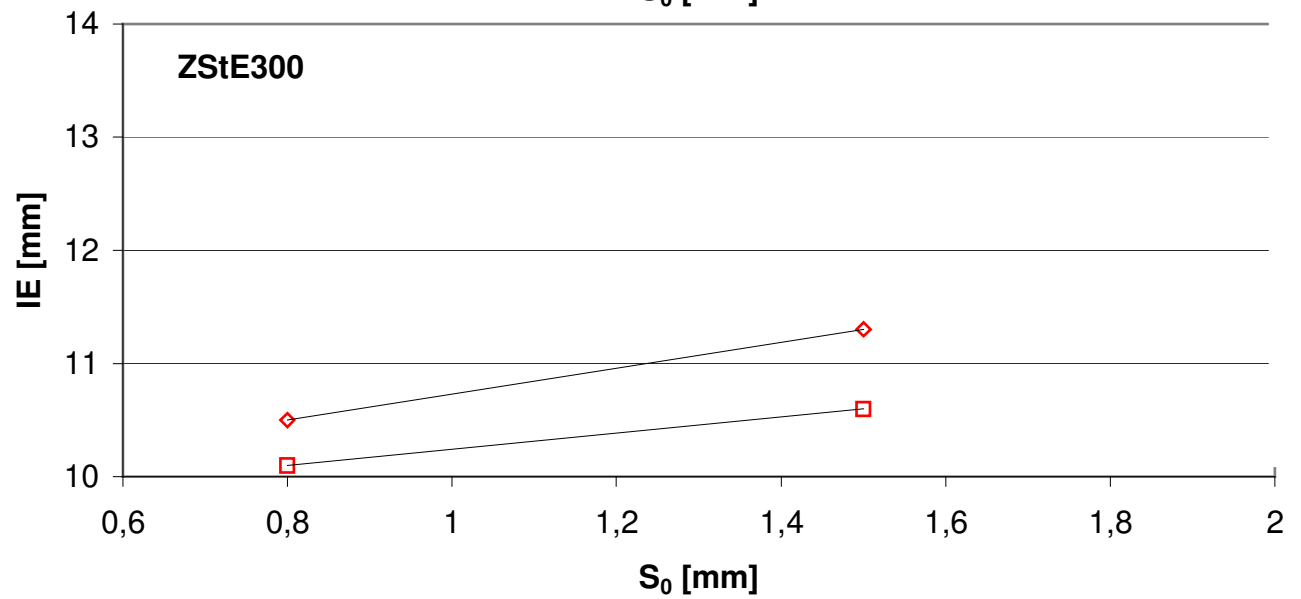
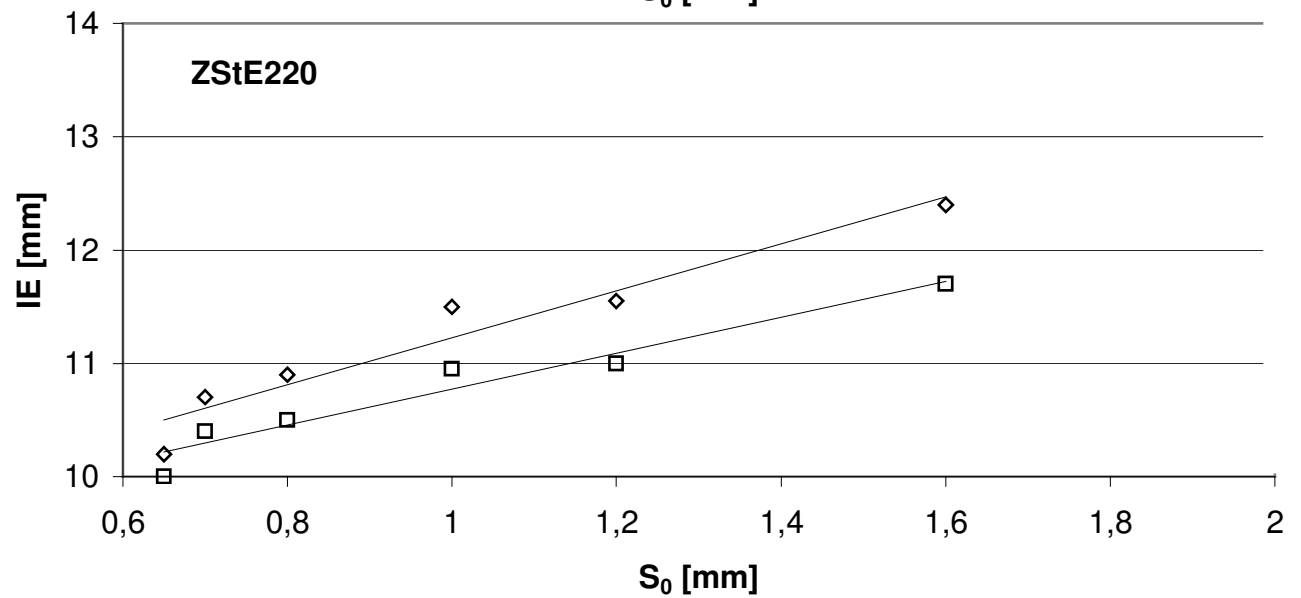
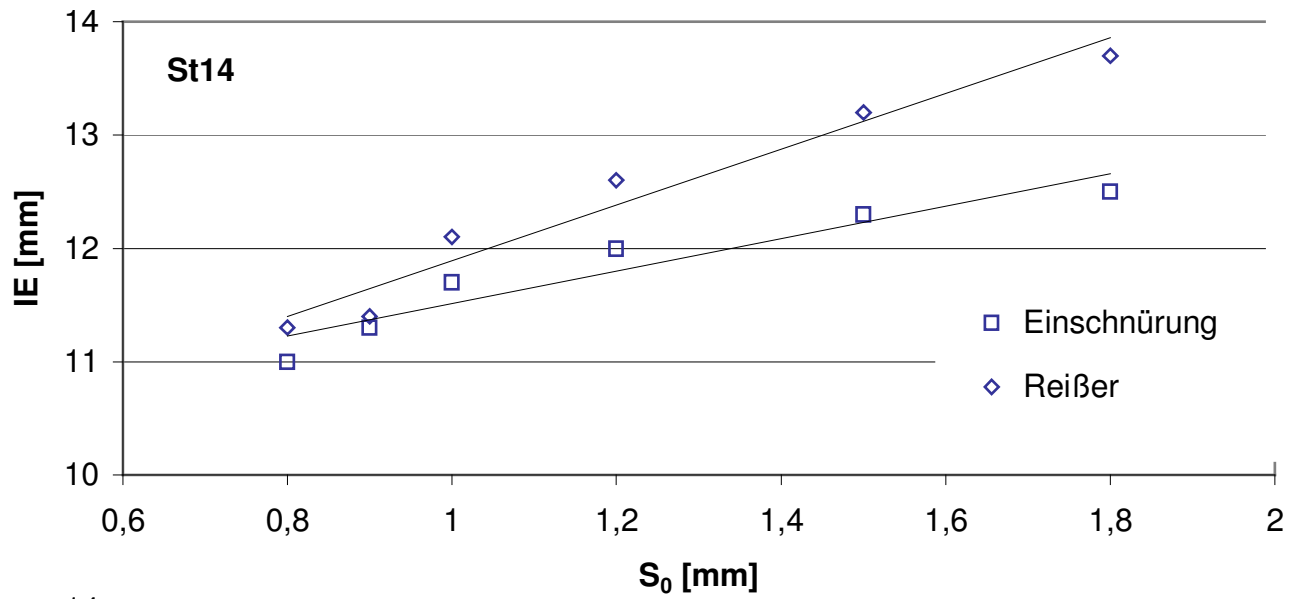


Bild 4: Erichsen-Tiefungswerte verschiedener Stahlgüten

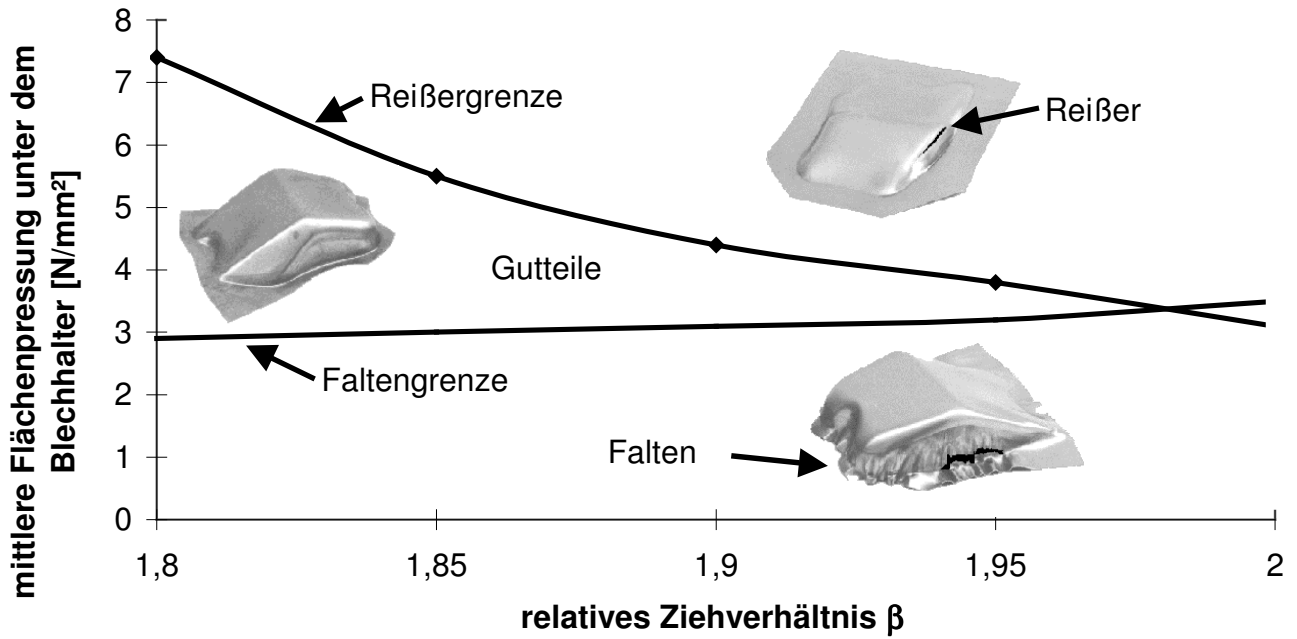
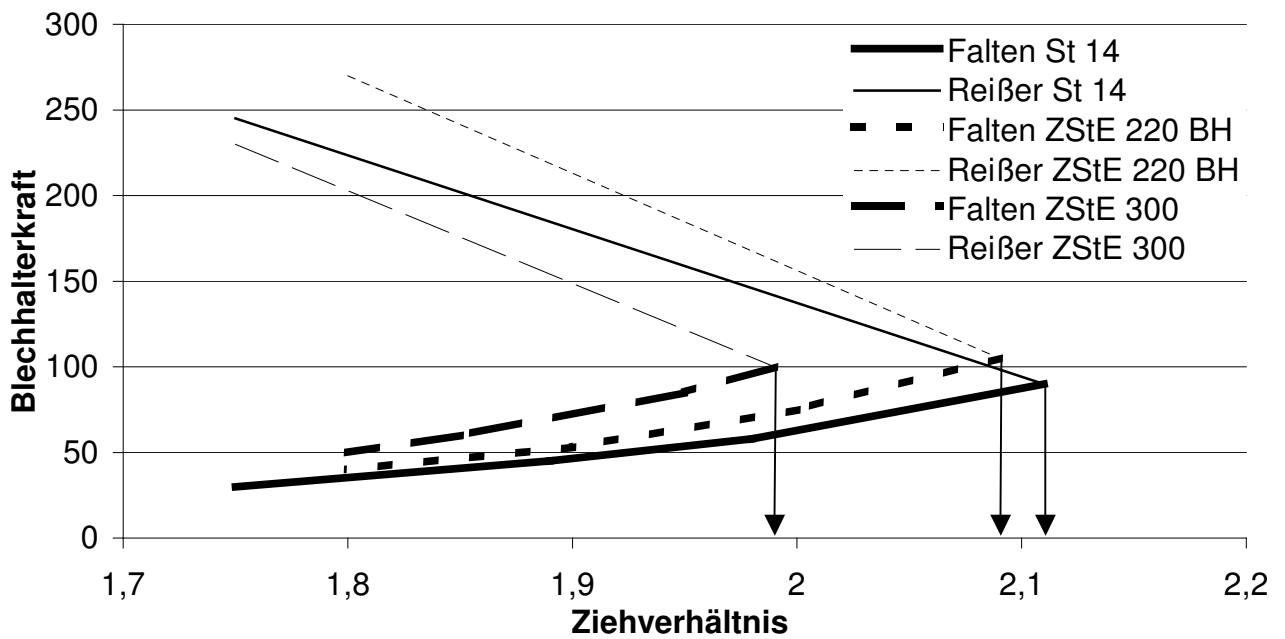


Bild 5: Arbeitsbereich und Grenzziehverhältnis beim Tiefziehen



| | St14 | ZStE 220 BH | ZStE 300 |
|---------------------------------|-------|-------------|----------|
| $R_{p0,2}$ [N/mm ²] | 161,3 | 232,6 | 351,5 |
| R_m [N/m ²] | 304,8 | 351,9 | 444,5 |
| A_{80} [%] | 43,8 | 35,1 | 28,8 |
| r-Wert | 1,925 | 1,597 | 0,963 |
| n-Wert | 0,226 | 0,167 | 0,185 |
| Blechdicke [mm] | 0,78 | 0,76 | 0,79 |
| ∅ Stempel [mm] | 150 | | |
| Ziehringradius [mm] | 8 | | |

Bild 6: Arbeitsbereiche und Grenzziehverhältnisse ausgewählter Stahlgüten

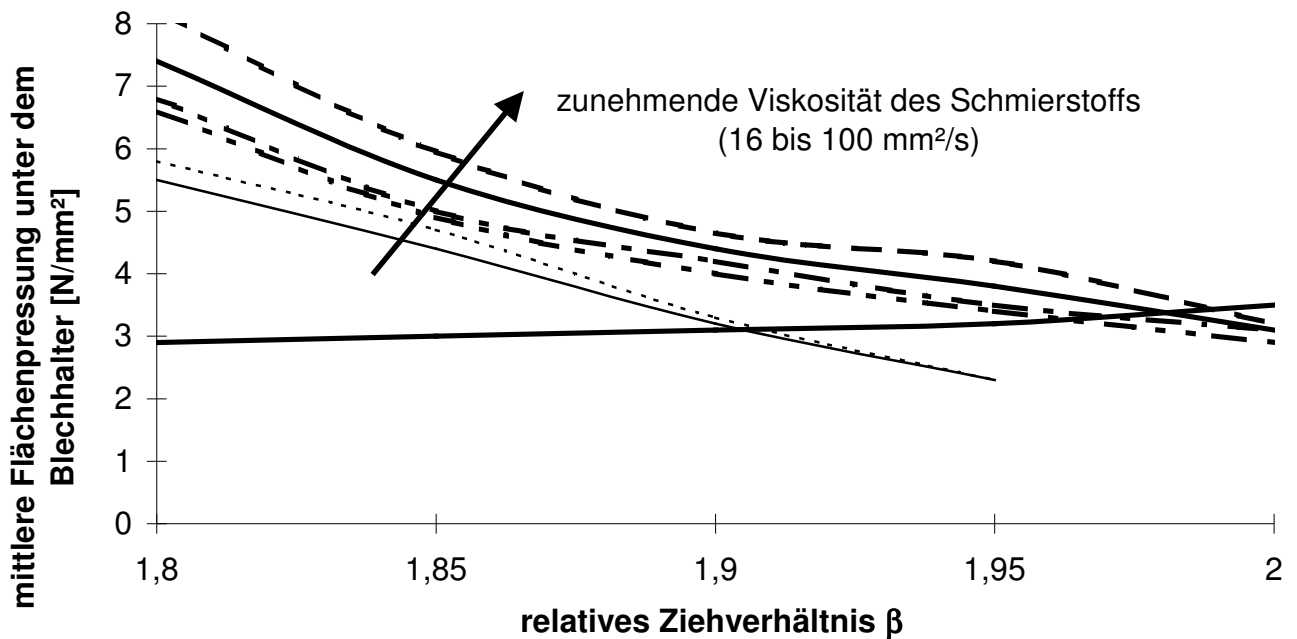


Bild 7: Arbeitsbereiche und Grenzziehverhältnisse bei Variation der Schmierstoffviskosität

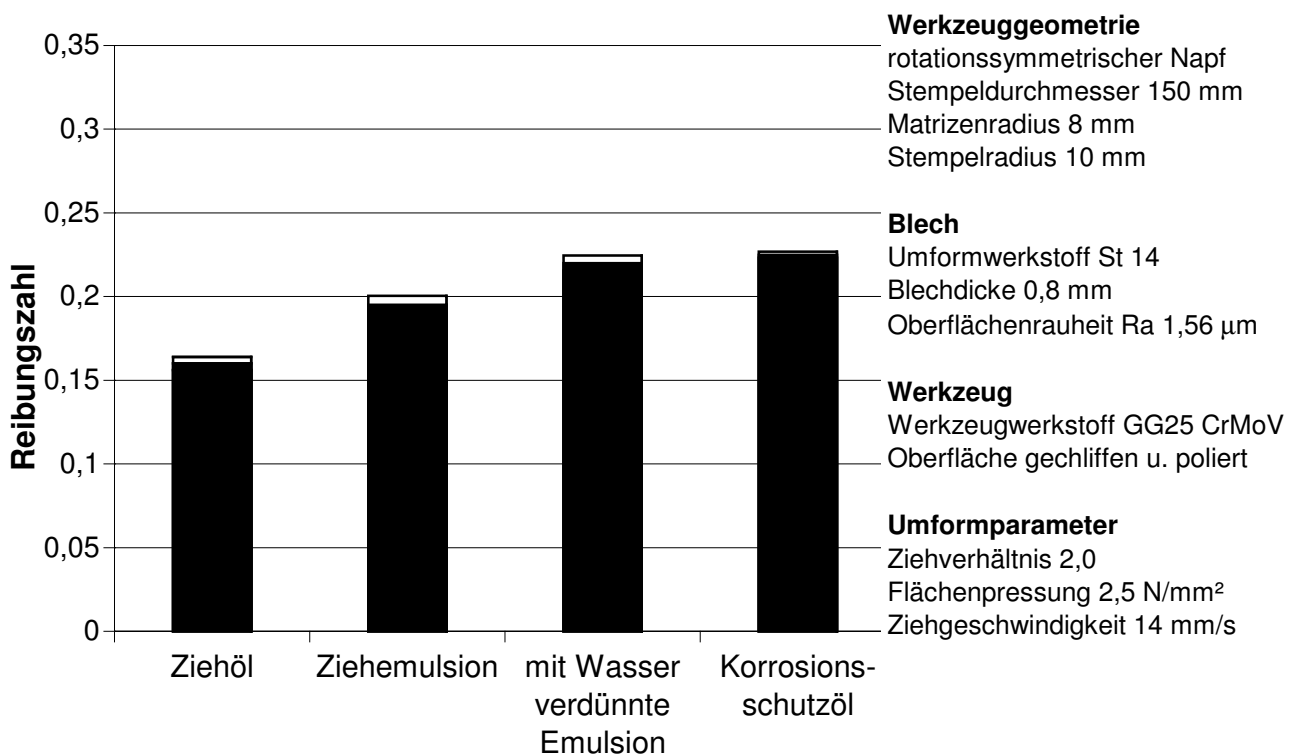


Bild 8: Reibungszahlen beim Tiefziehen mit charakteristischen Schmierstoffen

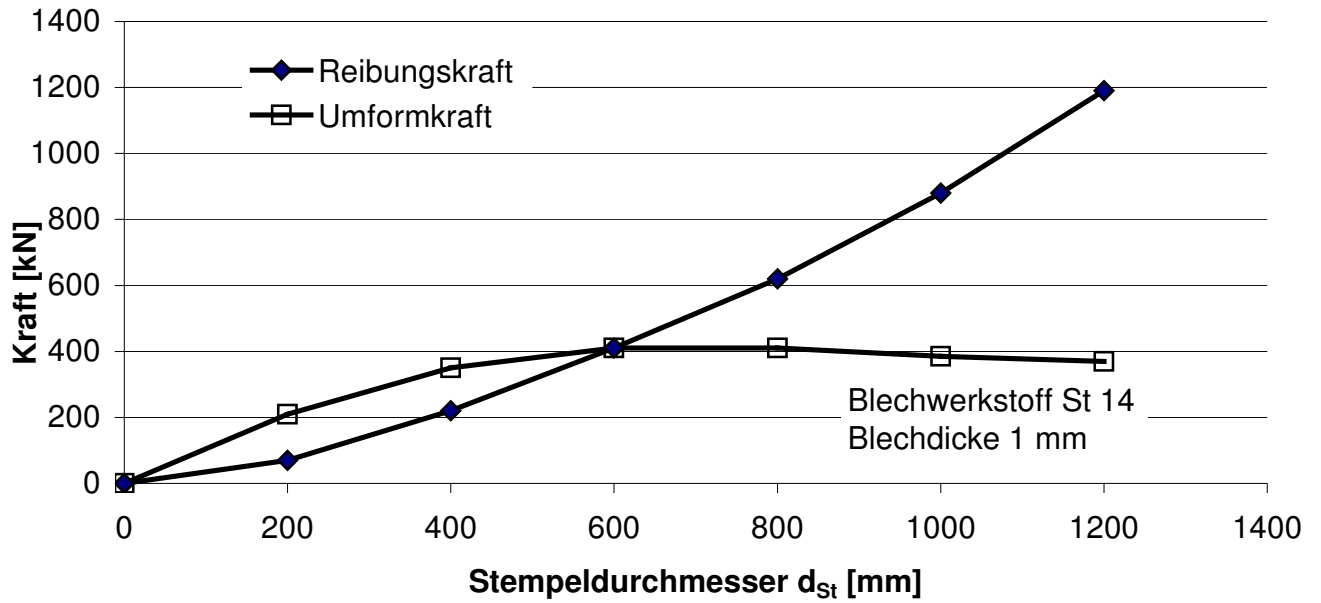


Bild 9: Einfluss der Ziehteilgröße auf die erforderliche Umform- und Reibkraft [16]

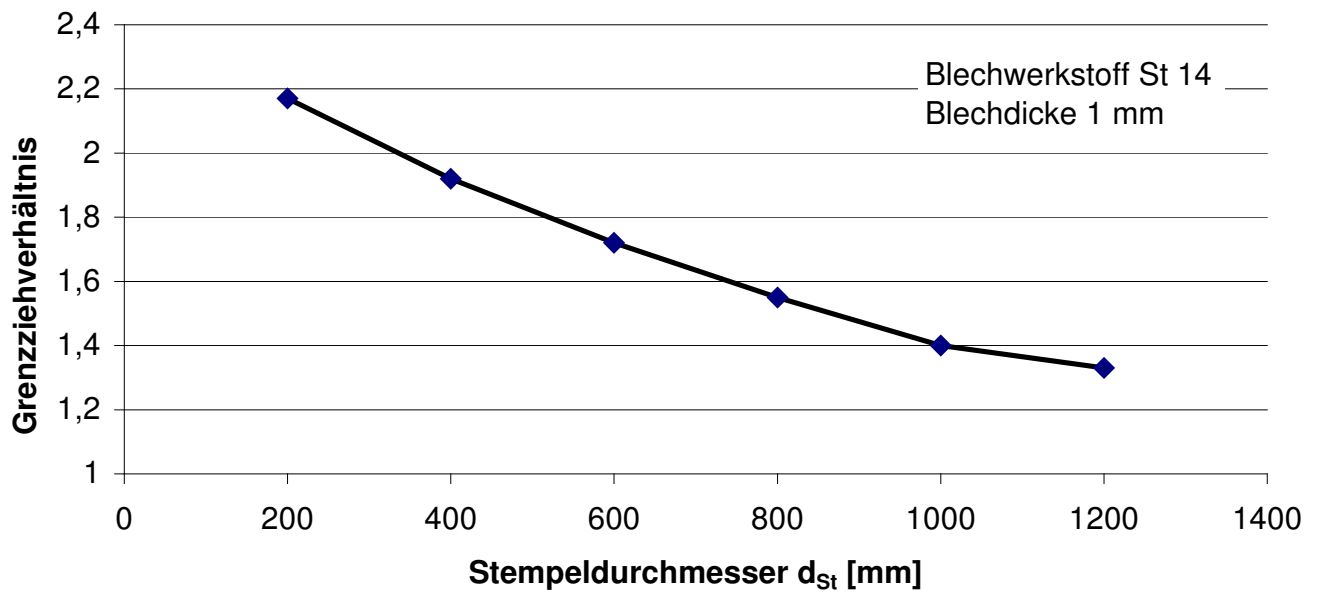
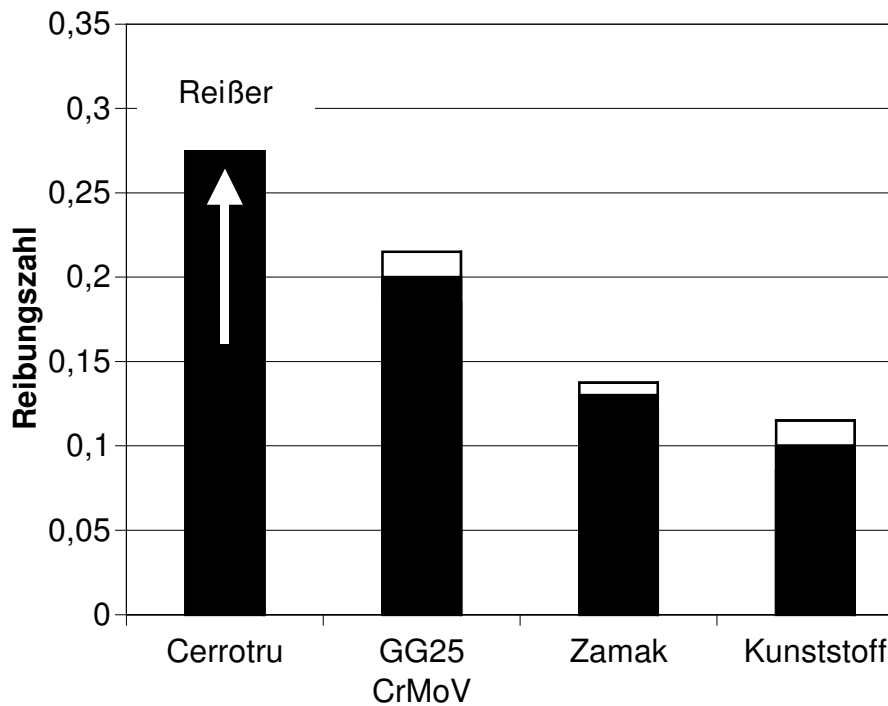


Bild 10: Einfluss der Ziehteilgröße auf die maximalen Ziehverhältnisse [17]

St 14 unbeschichtet, Emulsion



Werkzeuggeometrie

rotationssymmetrischer Napf
 Stempeldurchmesser 150 mm
 Matrizenradius 8 mm
 Stempelradius 10 mm

Blech

Umformwerkstoff St 14
 Blechbeschichtung keine
 Blechdicke 0,8 mm
 Oberflächenrauheit Ra 1,56 µm

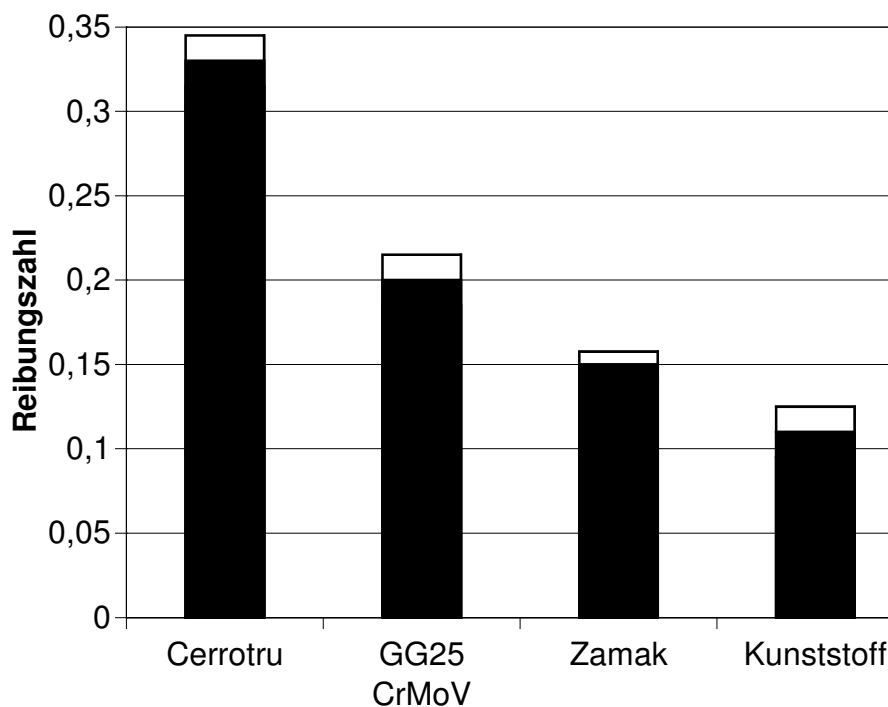
Werkzeug

Werkzeugwerkstoff GG25 CrMoV
 Oberfläche gechliffen u. poliert

Umformparameter

Ziehverhältnis 2,0
 Flächenpressung 2,5 N/mm²
 Ziehgeschwindigkeit 14 mm/s
 Beölungsgrad 3,5 g/m²

St 14 elektrolytisch verzinkt, Emulsion



Werkzeuggeometrie

rotationssymmetrischer Napf
 Stempeldurchmesser 150 mm
 Matrizenradius 8 mm
 Stempelradius 10 mm

Blech

Umformwerkstoff St 14
 Blechbeschichtung ZE 75/75
 Blechdicke 0,8 mm
 Oberflächenrauheit Ra 1,56 µm

Werkzeug

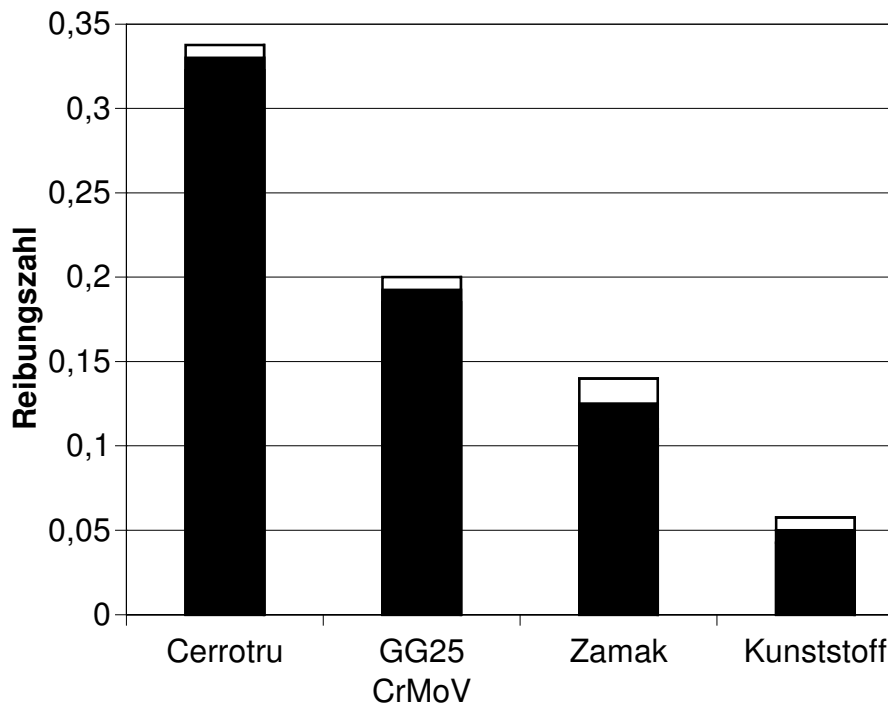
Werkzeugwerkstoff GG25 CrMoV
 Oberfläche gechliffen u. poliert

Umformparameter

Ziehverhältnis 2,0
 Flächenpressung 2,5 N/mm²
 Ziehgeschwindigkeit 14 mm/s
 Beölungsgrad 3,5 g/m²

Bild 11: Reibungszahlen beim Umformen von Karosserieblechen mit verschiedenen Werkzeugwerkstoffen bei Verwendung von Emulsion

St 14 unbeschichtet, Ziehöl



Werkzeuggeometrie

rotationssymmetrischer Napf
 Stempeldurchmesser 150 mm
 Matrizenradius 8 mm
 Stempelradius 10 mm

Blech

Umformwerkstoff St 14
 Blechbeschichtung keine
 Blechdicke 0,8 mm
 Oberflächenrauheit Ra 1,56 µm

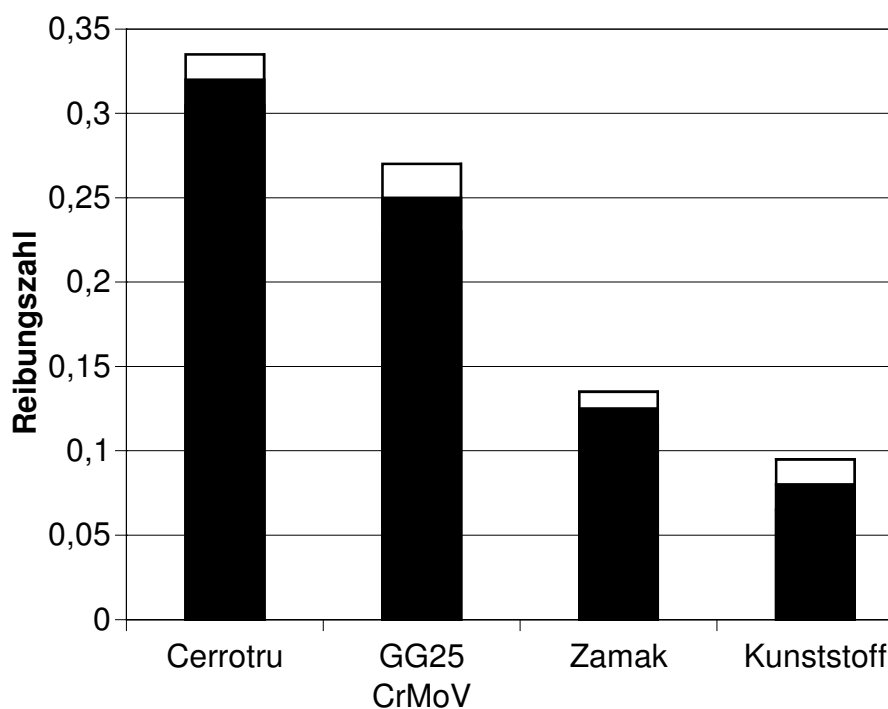
Werkzeug

Werkzeugwerkstoff GG25 CrMoV
 Oberfläche gechliffen u. poliert

Umformparameter

Ziehverhältnis 2,0
 Flächenpressung 2,5 N/mm²
 Ziehgeschwindigkeit 14 mm/s
 Beölungsgrad 3,5 g/m²

St 14 elektrolytisch verzinkt, Ziehöl



Werkzeuggeometrie

rotationssymmetrischer Napf
 Stempeldurchmesser 150 mm
 Matrizenradius 8 mm
 Stempelradius 10 mm

Blech

Umformwerkstoff St 14
 Blechbeschichtung ZE 75/75
 Blechdicke 0,8 mm
 Oberflächenrauheit Ra 1,56 µm

Werkzeug

Werkzeugwerkstoff GG25 CrMoV
 Oberfläche gechliffen u. poliert

Umformparameter

Ziehverhältnis 2,0
 Flächenpressung 2,5 N/mm²
 Ziehgeschwindigkeit 14 mm/s
 Beölungsgrad 3,5 g/m²

Bild 12: Reibungszahlen beim Umformen von Karosserieblechen mit verschiedenen Werkzeugwerkstoffen bei Verwendung von Ziehöl

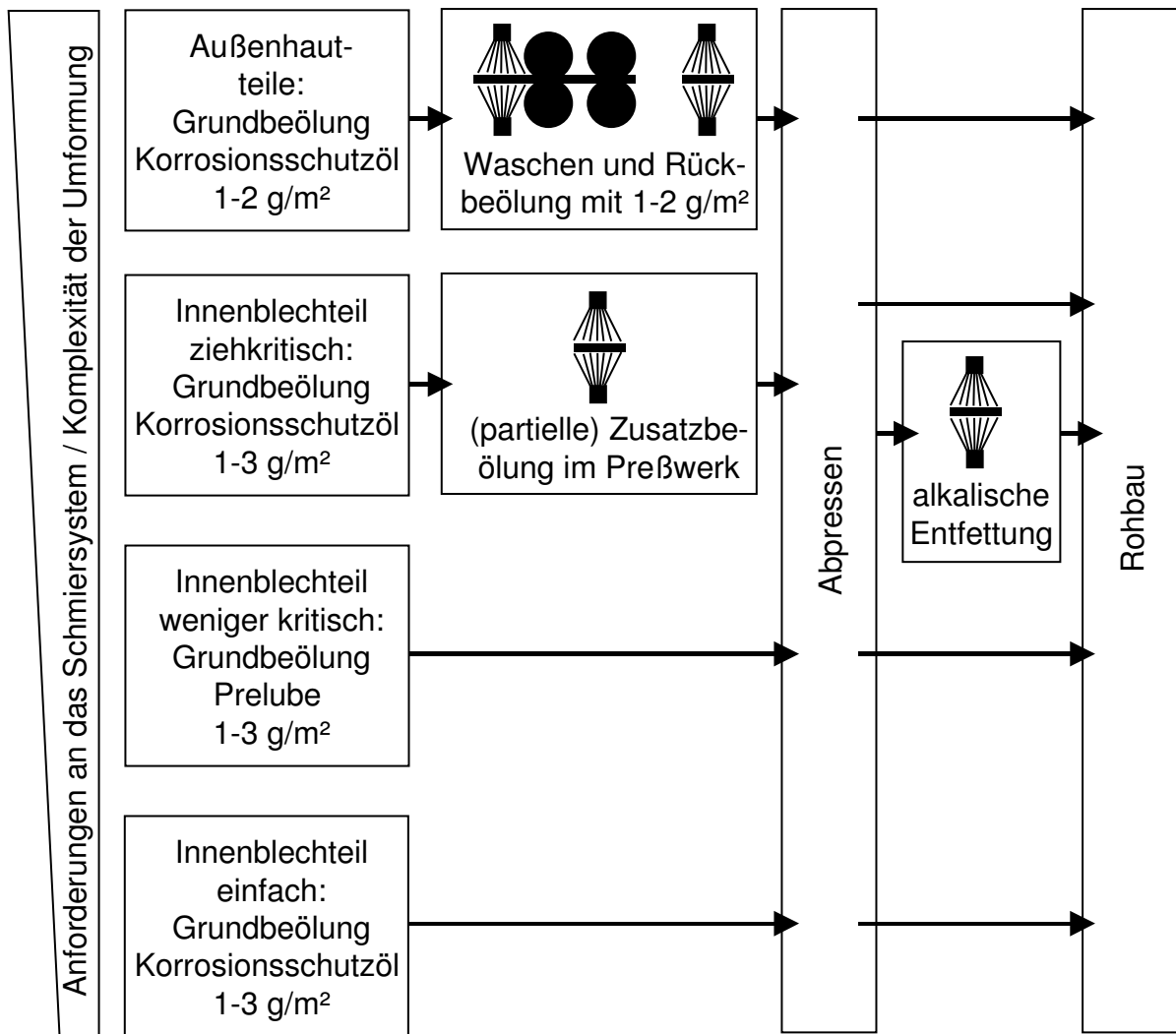
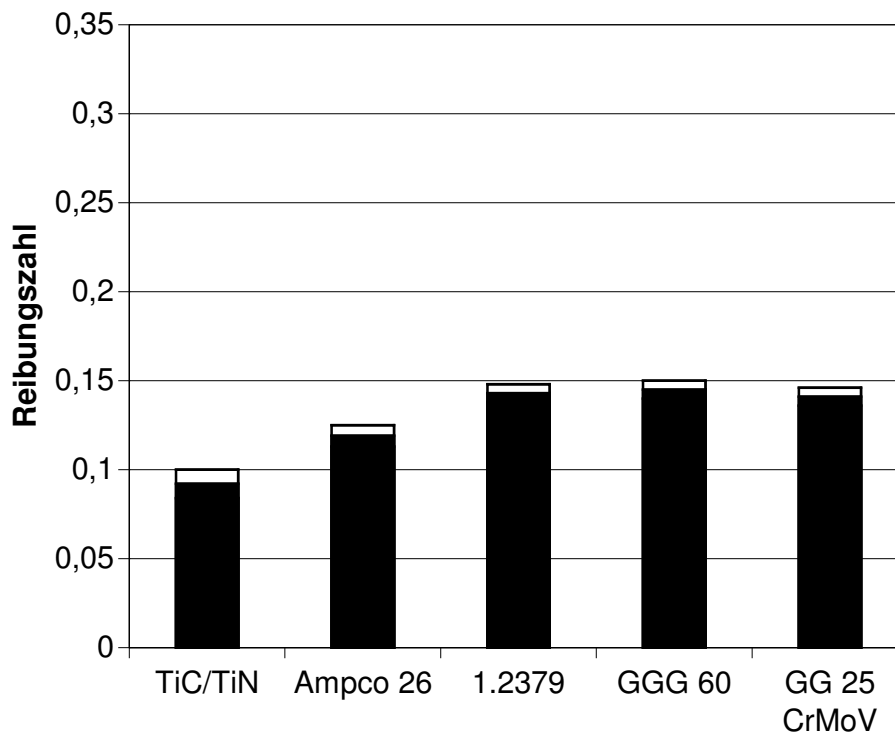


Bild 13 : Prozeßschritte beim Fertigen von Blechteilen

Werkzeugwerkstoffe und Beschichtungen



Werkzeuggeometrie

rotationssymmetrischer Napf
 Stempeldurchmesser 150 mm
 Matrizenradius 8 mm
 Stempelradius 10 mm

Blech

Umformwerkstoff ZStE 300 BH
 Blechbeschichtung keine
 Blechdicke 0,8 mm
 Oberflächenrauheit Ra 1,59 µm

Werkzeug

Werkzeugwerkstoff GG25 CrMoV
 Oberfläche geschliffen u. poliert

Umformparameter

Ziehverhältnis 1,9
 Flächenpressung 11,5 N/mm²
 Ziehgeschwindigkeit 14 mm/s
 Schmierstoff Emulsion
 Beölungsgrad 3,5 g/m²

Bild 14: Einfluss von Werkzeugwerkstoffen bzw. Werkzeugbeschichtungen auf die Reibungszahlen beim Tiefziehen

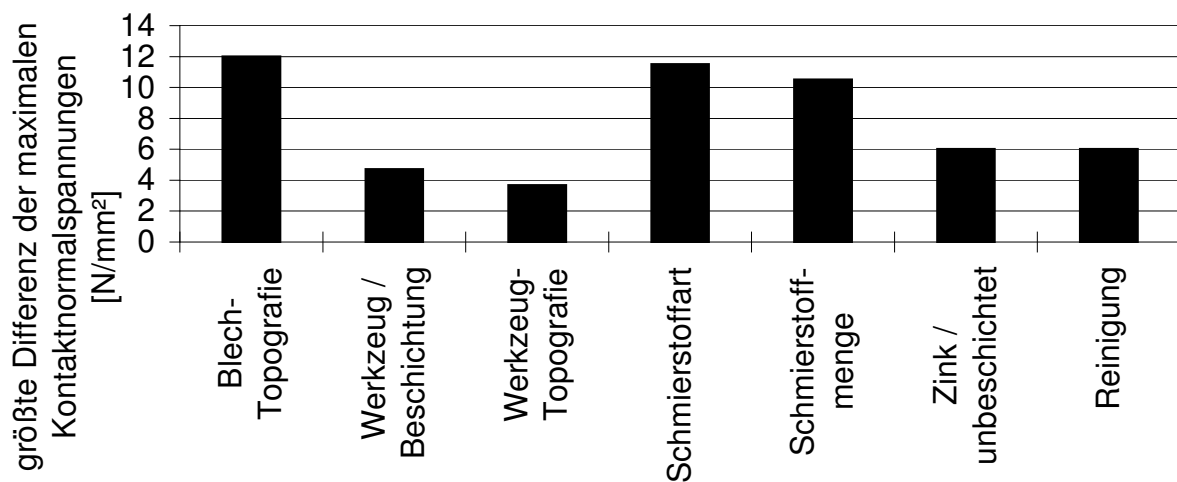


Bild 15: Ergebnisse aus Streifenziehversuchen zu Einflussgrößen auf die Reibung

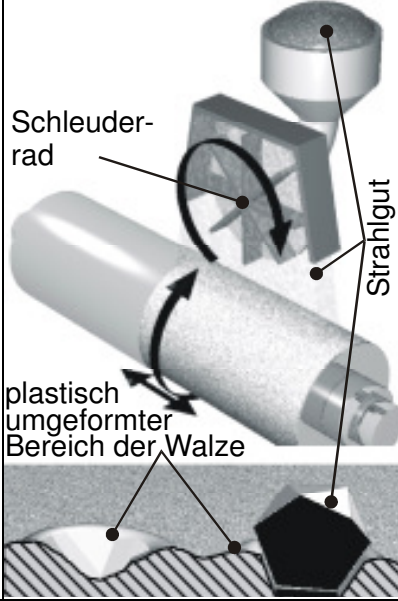
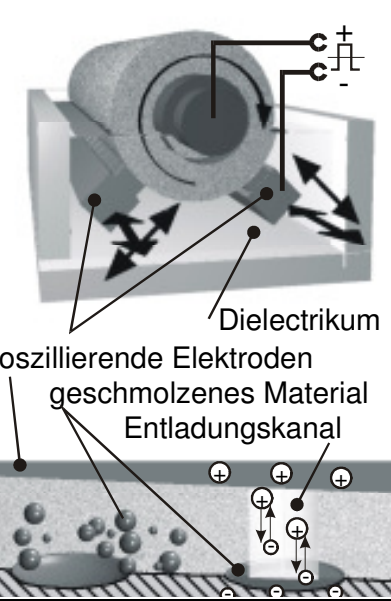
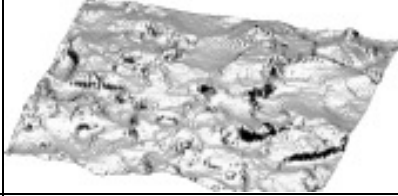
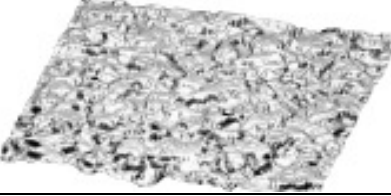
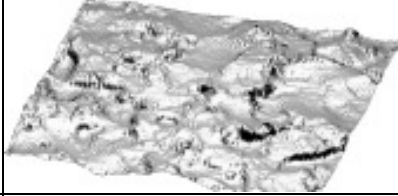
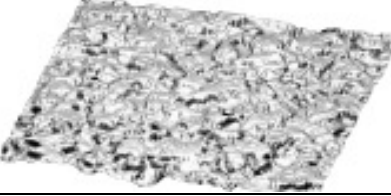
| Bezeichnung | SBT Shot Blast Texturing | EDT Electrical Discharge Texturing |
|--|--|---|
| Anlagenprinzip |  |  |
| Mechanismus der Strukturierung auf Walze |  |  |
| Topografie auf Blech Fläche 660x660µm ² Höhe 5 x überhöht |  |  |
| Regelmäßigkeit | stochastisch | stochastisch |
| Rauheit der Walzen | 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 |

Bild 16: Dressierverfahren (Teil 1) [20]

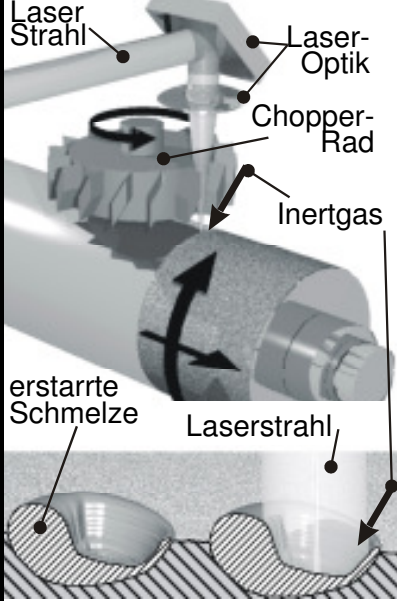
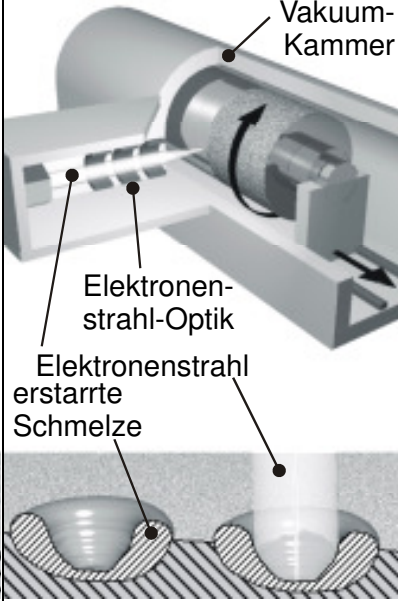
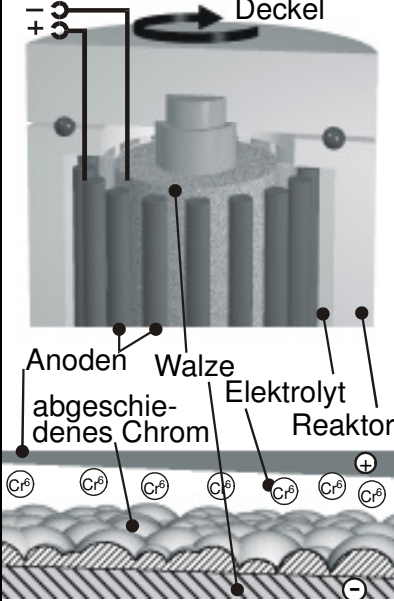
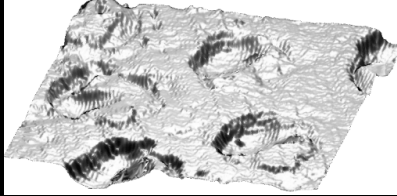
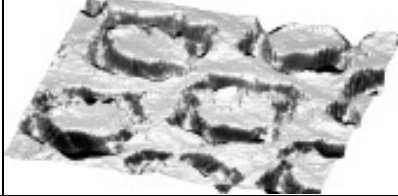
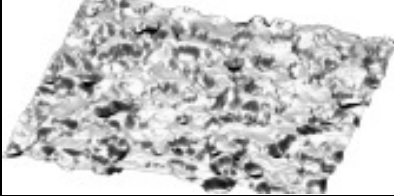
| LT Laser Texturing | EBT Electron Beam Texturing | PreTex Precision Texturing |
|--|---|---|
|  <p>Laser Strahl Laser-Optik Chopper-Rad Inertgas erstarre Schmelze Laserstrahl</p> |  <p>Vakuu-Kammer Elektronenstrahl-Optik Elektronenstrahl erstarre Schmelze</p> |  <p>Deckel Anoden Walze abgeschiedenes Chrom Elektrolyt Reaktor Cr³⁺ Cr³⁺ Cr³⁺ Cr³⁺ Cr³⁺ Cr³⁺ Cr³⁺ Cr³⁺</p> |
|  |  |  |
| (semi-) deterministisch (pseudostochastisch ist möglich) | deterministisch oder pseudostochastisch | stochastisch |
| R _a 0,8-10 µm, Kraterabstand 40-420 µm | R _y bis 25 µm, KraterØ 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, pseudostochastisch länger | 30 min / Walze, pseudostochastisch länger | 120 min / 2 Walzen |
| hoch | hoch | mittel |
| hoch | hoch | gering |

Bild 16: Dressierverfahren (Teil 2) [20]

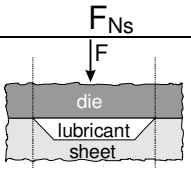
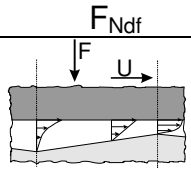
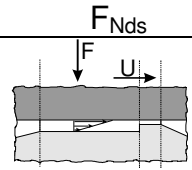
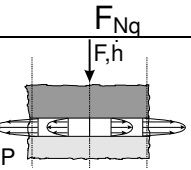
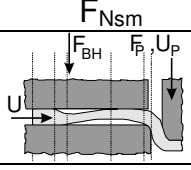
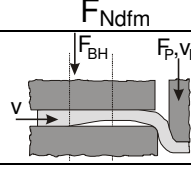
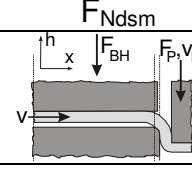
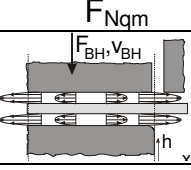
| Mechanismus | hydrostatisch wirkende Schmieraschen | hydrodynamisch wirkende Flanke | elasto-plasto-hydrodynamisch wirkende Stufe | Quetschströmung |
|--|--|---|---|---|
| Mikro-Mechanismen | | | | |
| Prinzip |  |  |  |  |
| Voraussetzungen / günstige Bedingungen | <ul style="list-style-type: none"> • deutliche Einglättung • hohe Kontaktspannungen • Dehnung des Bleches | <ul style="list-style-type: none"> • niedrige Kontaktspannung • Hohe Viskosität • hohe Gleitgeschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Einglättung der Spitzen • hohe Kontaktspannungen • hohe Gleitgeschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Impulsartige Belastung • Hohe Viskosität des Schmierstoffs |
| Anforderungen an Topografie | <ul style="list-style-type: none"> • geschlossen • leer kleine Spitzen | <ul style="list-style-type: none"> • voll schwach geneigte Plateaus | <ul style="list-style-type: none"> • voll flache Plateaus | <ul style="list-style-type: none"> • voll flache Plateaus |
| Makro-Mechanismen | | | | |
| Prinzip |  |  |  |  |
| Voraussetzungen / günstige Bedingungen | <ul style="list-style-type: none"> • entsprechende Werkzeuggeometrie | <ul style="list-style-type: none"> • entsprechende Werkzeuggeometrie • Hohe Viskosität • hohe Gleitgeschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> • entsprechende Werkzeuggeometrie • Hohe Viskosität • hohe Gleitgeschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> • schnelle Umformung • große homogen beanspruchte Flächen • hohe Viskosität |
| Anforderungen an die Topografie | <ul style="list-style-type: none"> • geschlossen • fein (Dichtwirkung) | <ul style="list-style-type: none"> • geschlossen • fein (Dichtwirkung) | <ul style="list-style-type: none"> • geschlossen • fein (Dichtwirkung) | <ul style="list-style-type: none"> • leer • geschlossen • fein |

Bild 17: Tribologische Mechanismen der Topografie [20]

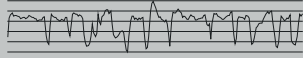



| 3D-Messungen | | | | | | |
|--|--|---|--|---|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 2D-Messungen oder berechnete Schnitte  | | | | direkt berechnet: | über berechnete Kurven:  | über berechnete Flächen: |
| direkt berechnet: - Tiefe - Volumen - mittlere Rauhtiefe - Spitzen - ... | über berechnete 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 18: Klassifizierung von Oberflächenkenngrößen [20]

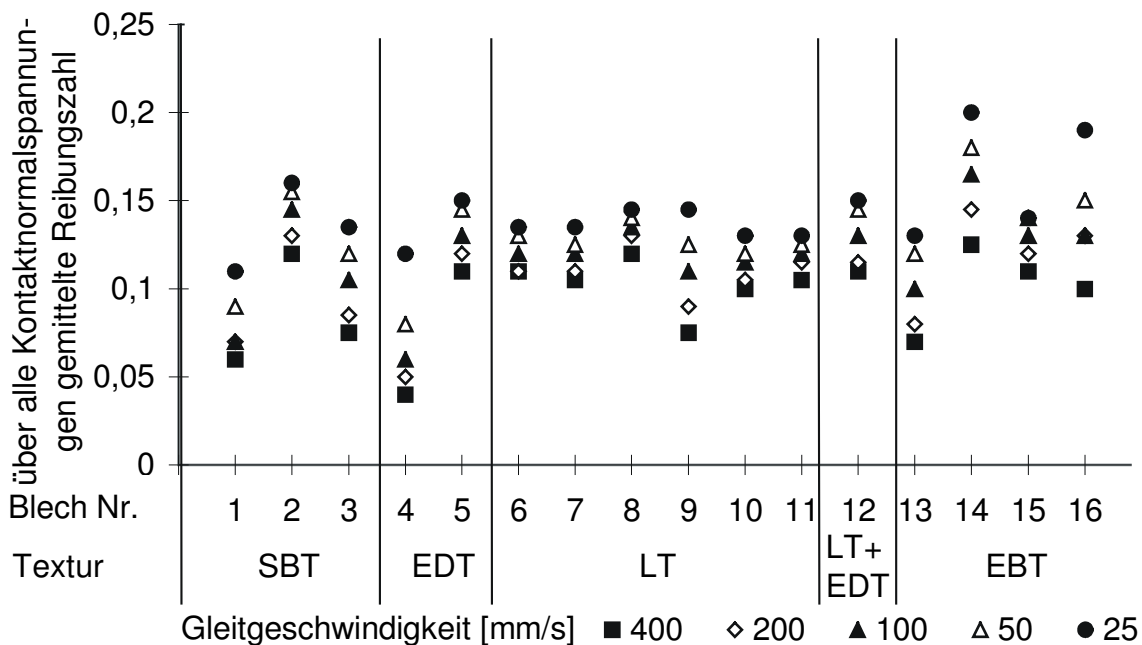


Bild 19: Reibungszahlen unterschiedlich texturierter Bleche im Streifenziehversuch

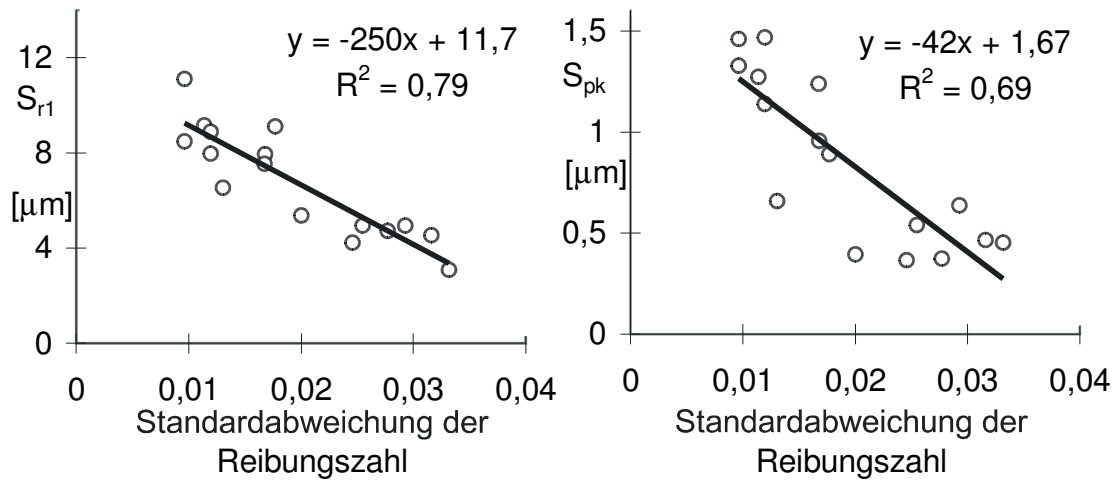


Bild 20: Einfluss von Spitzengröße und Spitzenhöhe auf die Reibung im Streifenziehversuch

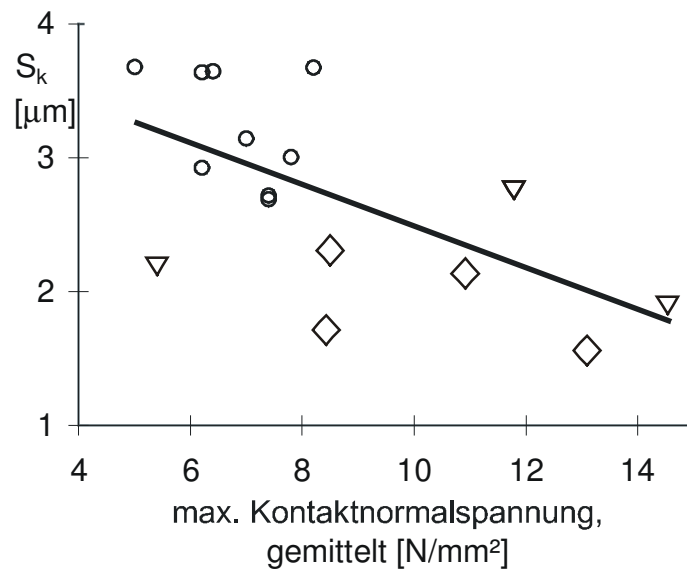


Bild 21: Zusammenhang zwischen Kernrautiefe und maximaler Kontaktnormalspannung im Streifenziehversuch

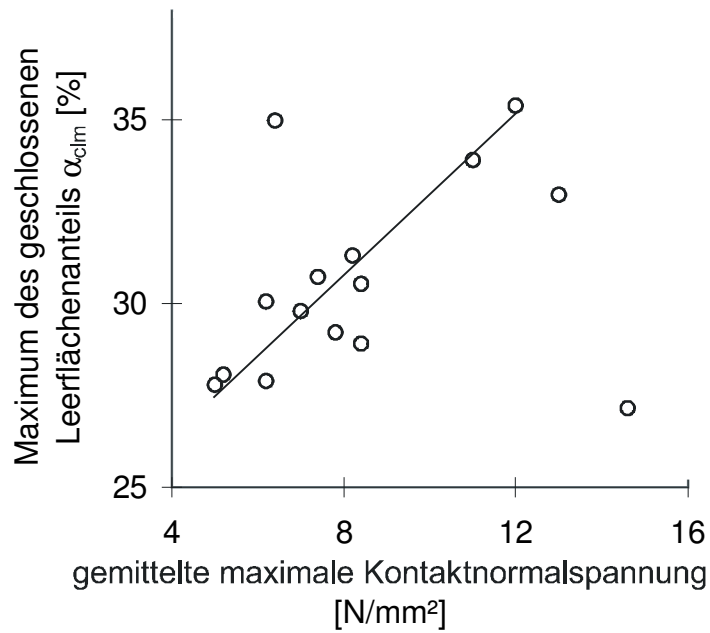


Bild 22: Maximaler geschlossener Leerflächenanteil über der maximalen Kontaktnormalspannung im Streifenziehversuch

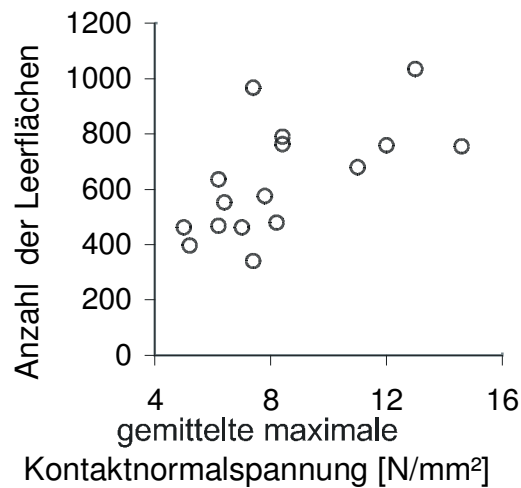


Bild 23: Anzahl der Leerflächen über der maximalen Kontaktnormalspannung im Streifenziehversuch

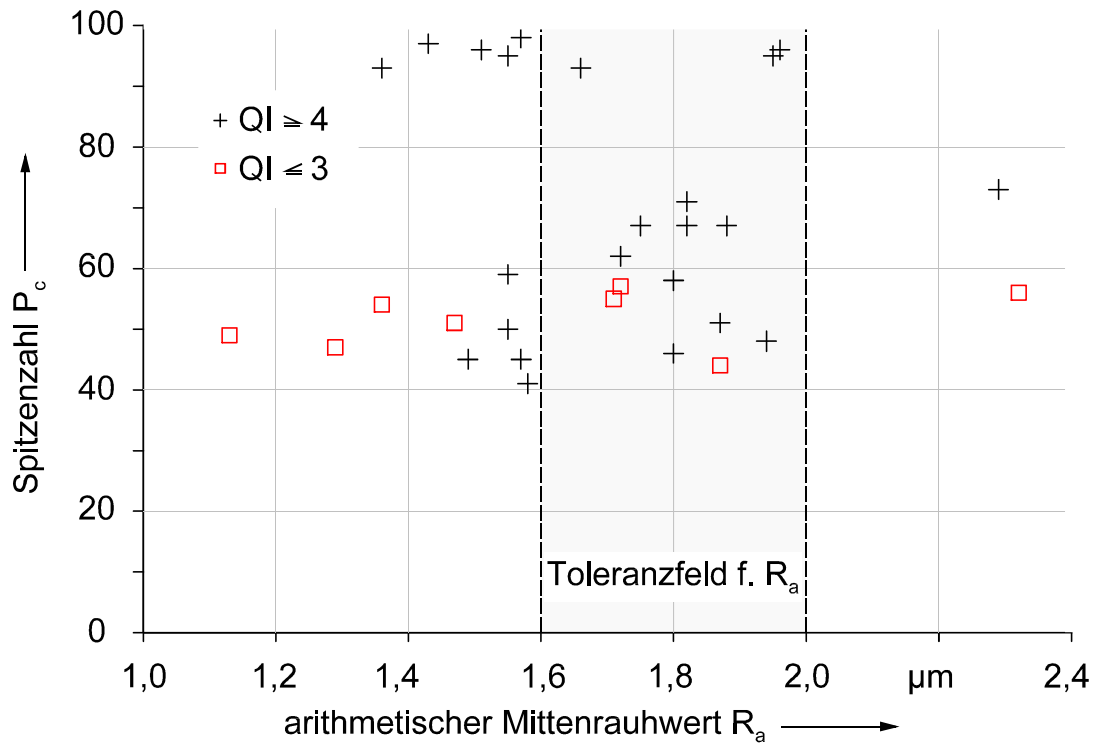


Bild 24: Oberflächenkenngrößen nach SEP 140 und Prozessergebnis [23]

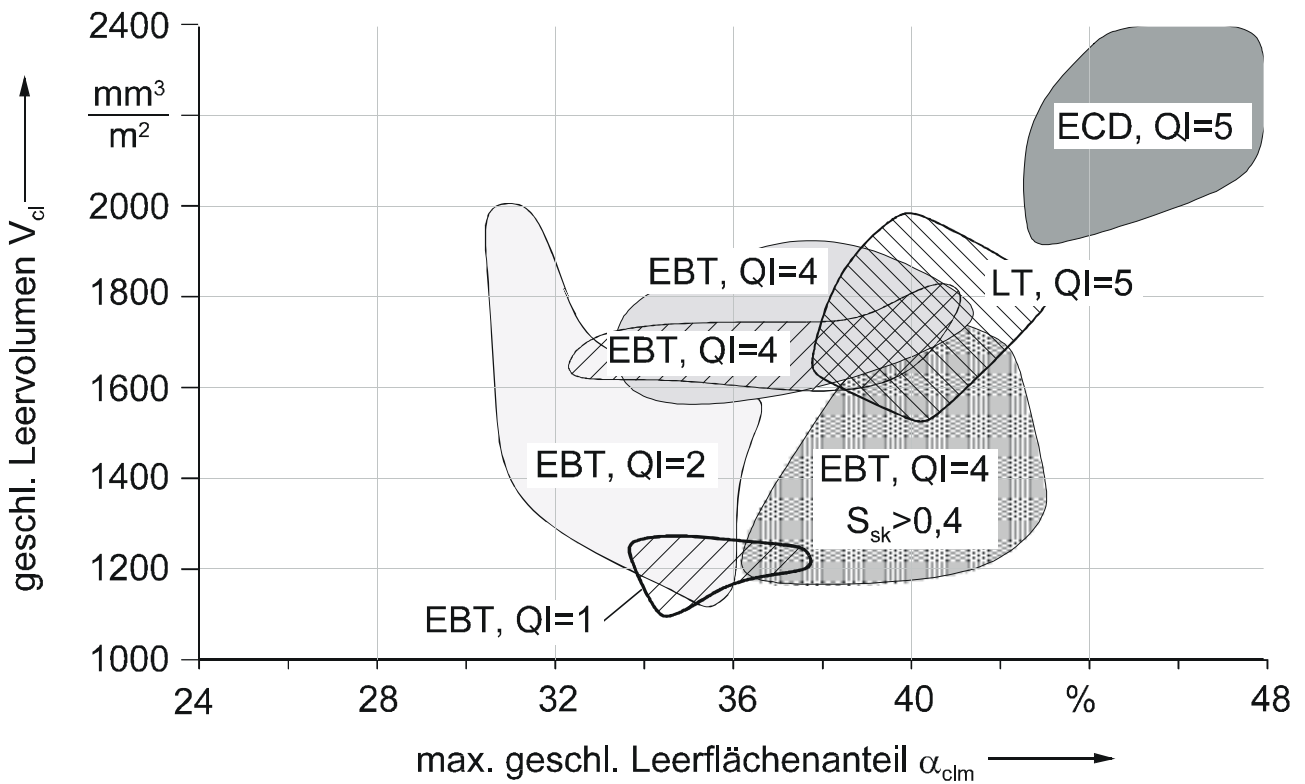


Bild 25: 3D-Oberflächenkenngrößen und Prozessergebnis [23]

12 Literaturverzeichnis

- 1 Doege, E.:
Wichtige Einflußgrößen beim Tiefziehen.
wt - Zeitschrift für industrielle Fertigung 66 (1976), 5. 615 - 619
- 2 Doege, E.; Sommer, N.:
Wichtige Grundlagen des Tiefziehens. Teil 1 und Teil II.
Blech Rohre Profile 31(1984) 2, S. 47 - 51 und
Blech Rohre Profile 31(1984) 3, S.102 - 105
- 3 Wohnig, W.;Ponschab, H.; Radlmayr K.M.; Meinhardt, J:
Möglichkeiten des Einsatzes und der Verarbeitung höherfester
Stahlfeinbleche für Karosserieteile. VDI-Berichte 1142, Hannover 1994
- 4 Kruska, J-U.: Qualitätsmerkmale von Stahlfeinblech.
Bänder Bleche Rohre 9 (1997), 30-37
- 5 Schmidt, H., Lenze, F.-J.: Karosserie-Leichtbau mit höherfestem Stahl.
Bänder Bleche Rohre 9 (1997), 38-45
- 6 Drewes, E.-J.; Gorissen, W.; Litzke, H.; Müschenborn, W.; Schmidt-Zinges, J.;
Schneider, C.; Constantin, M.V.:
Hochfeste warm- und kaltgewalzte Stahlbleche für den Automobilbau-
Verarbeitungseigenschaften und Funktionverhalten.
Stahl u. Eisen 104 (1984), S.39-44
- 7 Stüwe, H.P.: Höherfeste kaltgewalzte Stahl-Feinbleche.
Z. Metallkunde 72 (1981) 11, S. 746 -751
- 8 Müschenborn, W., Sonne, H-M., Hartmann, G.:
Neuzeitliche Methoden einer anwendungsbezogenen Feinblechprüfung.
Thyssen Technische Berichte, Heft 1 (1993), 121-135
- 9 Engl, B., Drewes, E-J.:
Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Fein- und Feinstblechwerkstoffe.
Blech Rohre Profile 36 (1989), 166-169 u. 241-245
- 10 Sardemann, K.: Tendenzen bei der Entwicklung neuer Stahlblechgüten und
Oberflächenveredelungen.
Symposium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, Fellbach 1992, 5 1-33
- 11 Graßhoff, H.W.; Tenhaven, U.:
Oberflächenveredelte Feinbleche - Stahl mit Zukunft.
Stahlu.Eisen 110 (1990), 61 -70
- 12 Lange, K.:
Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft.
Band 3 Blechbearbeitung.
Berlin Heidelberg: Springer Verlag 1990
- 13 Panknin, W.; Dutschke, W.:
Die Gesetzmäßigkeiten beim Tiefziehen runder, quadratischer, rechteckiger und
elliptischer Teile im Anschlag.
Mitt. Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung 1959 (2/3), 5. 13 - 23

-
- 14 Siebel, E; Beisswanger, H.:
Tiefziehen.
München: Carl Hanser Verlag 1955
 - 15 Gucker, G.:
Rechnergestutztes Meßverfahren zur Ermittlung von Kenngrößen der Tribologie
beim Tiefziehen von Karosserieblechen mit und ohne Oberflächenveredelung.
Dr.-Ing. Diss., Universität Siegen, 1989
 - 16 Spur, G.; Stöferle, Th.:
Handbuch der Fertigungstechnik. Band 2/3.
München Wien: Carl Hanser Verlag 1985
 - 17 Doege, E.; Fetzer, H.; Kellenbenz, R.; Bergmann, E.:
Tiefziehen auf einfach- und doppelwirkenden Karosseriepennen unter
Berücksichtigung des Gelenkantriebs.
Werkstatt und Betrieb 104 (1971) 10, 5. 737 - 747
 - 18 Breun, F.; Wohnig, W.:
Blechumformwerkzeuge für begrenzte Stückzahlen.
VDI-Z 133 (1991) Nr.1, 5. 77- 81
 - 19 Schwethelm, K.J.:
Tiefziehen von Stahlblechen ohne Zusatzbelung.
Bänder Bleche Rohre 7/8 (1994), 26-33
 - 20 Staeves, J.:
Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung bei der
Umformung
Dr.-Ing. Diss., Technische Universität Darmstadt, 1998
internet: <http://www.staeves.de>
 - 21 Dinkel, F., Hoffmann, H., Kopietz, J.: Einfluß der Oberflächenrauheit auf die
Umformung von Aluminiumblechen, Blech Rohre Profile 7/8/1997, 36-40
 - 22 Wagner, S.: 3D-Beschreibung der Oberflächenstrukturen von Feinblechen, Dr.-Ing.
Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
 - 23 Pfestorf, M.: Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik, Dr.-Ing.
Dissertation, Universität Erlangen, 1997, ISBN 3-87525-097-4
 - 24 Neudecker, T., Pfestorf, M., Engel, U.: Einglättung strukturierter Oberflächen unter
Druckbelastung mit und ohne Schmierstoffeinsatz, Tribologie und
Schmierungstechnik 6/1997, 261-263
 - 25 Lo, S. W., Wilson, W. R. D.: A Theoretical Model of Micro-Pool Lubrication in Metal
Forming, Proc. 1st ICTMP, 1997, 83-90
 - 26 Schmoeckel, D., Prier, M.: Optimierung der Oberflachenmikrostruktur von
Tiefzieheblechen durch Einsatz der Methode der Finiten Elemente, Abschlußbericht
DFG-Forschungsvorhaben Schm 463/56-3
 - 27 Scheers, J., Vermeulen, M., De Mar, 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
 - 28 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
- 29 Sobis, T.: Geometrische Oberflächeneigenschaften bei Mischreibung, Tribologie und Schmierungstechnik 4/1996, 191-197
- 30 Doege, E., Grahner, R.: Der Einfluß der Werkzeugwerkstoffe und Schmierstoffe auf den Kraftbedarf beim Tiefziehen, Blechumformung - Grundlagen, Technologie, Werkstoffe, DGM, Oberursel, 1983, 179-207
- 31 Emmens, W. C.: Tribology of Flat Contacts and its Application in Deep Drawing, PhD-thesis, University of Twente, The Netherlands, 1997
- 32 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
- 33 Weingräber, v. FL., Abou-Aly, M.: Handbuch Technische Oberflächen, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1989
- 34 Lonardo, P. M., Trumpold, H., De Chiffre, L.: Progress in 3D Surface Microtopography Characterisation, Annals of the CIRP 1996, 589-598
- 35 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
- 36 Kienzle, O., Mietzner, K.: Atlas umgeformter metallischer Oberflächen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1967
- 37 Kienzle, O., Mietzner, K.: Grundlagen einer Typologie umgeformter metallischer Oberflächen mittels Verfahrensanalyse, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1965
- 38 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
- 39 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
- 40 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
- 41 Bodschinna, H., Hilimann, W.: Oberflächenmeßtechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis, Deutsches Institut für Normung e.V., 1. Auflage 1992
- 43 Greenwood, J.A., Williamson, J.B.P.: Contact of Nominally Flat Surfaces, Int. J. Mach. Tool Des. Res., 1966, 300-319
- 44 Pfestorf M., Staeves, J., Wagner, S.: Definition von 3D-Oberflächenkenngrößen, Stahl u. Eisen 7/1997, 89-94
- 46 Bodschinna, H., Hilimann, W.: Oberflächenmeßtechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis, Deutsches Institut für Normung e.V., 1. Auflage 1992
- 47 Schmidt, U., Bodschinna, H., Schneider, U.: Mikro-EHD: Funktionsgerechte Rauheitskennwerte durch Auswertung der Abbott-Kurve, Antriebstechnik 9/10/1987, 55-59 u. 65-69