

Kunststoff als Werkzeugwerkstoff für das Tiefziehen von Feinblechen

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation
von
Dipl.-Ing. Christian Frank
geboren am 04.09.1968 in Hamburg

1999

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Doege

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. G. Poll

Datum der mündlichen Doktorprüfung: 24.11.1999

Abstrakt

Die durchgeführten Verschleißuntersuchungen an Kunststoffprüfkörpern zeigen, daß es möglich ist, Werkzeuge aus Kunststoffen zu fertigen, mit denen bis zu 50.000 Teile gezogen werden können. Die Kosten für den Werkzeugbau bei kleinen und mittleren Stückzahlen können dadurch beträchtlich gesenkt werden. Diese Kunststoffwerkzeuge haben im Gegensatz zu den heute üblichen Stahl- oder Graugußwerkzeugen eine Lebensdauer, die der zu fertigenden Anzahl von Teilen angepaßt ist. Beim Einsatz von Kunststoffwerkzeugen ist zu beachten, daß der umzuformende Blechwerkstoff maßgeblichen Einfluß auf den Verschleiß hat. Oberflächenveredelte Bleche erwiesen sich als besonders geeignet, da hierbei nur ein minimaler Verschleiß auftritt. Für die Umformung unbeschichteter Stahlbleche insbesondere höherfester Güte bietet es sich hingegen an, Galvanowerkzeuge anzufertigen.

Neben einem guten Verschleißverhalten weisen die untersuchten Kunststoffe auch ein sehr gutes Reibverhalten auf. Die Reibwerte, die mit Kunststoffen erzielt werden, sind deutlich geringer als die, welche mit Stahlwerkzeugen erzielt werden. Besonders vorteilhaft erweisen sich Kunststoffe für die Aluminiumblechumformung, da hierbei keine Neigung zu Kaltaufschweißungen auf den Werkzeugen festgestellt werden konnte.

Es konnte gezeigt werden, daß die Ergebnisse von FEM-Berechnungen des Tiefziehens mit Kunststoffwerkzeugen sehr gut mit experimentellen Untersuchungen übereinstimmen. Die Nachgiebigkeit der Kunststoffe führt zu einer gleichmäßigen Verteilung der Flächenpressung im Flansch, was den Aufwand für das Eintuschieren von Kunststoffwerkzeugen überflüssig macht. Darüber hinaus können mit Hilfe der Simulation Deformationen der Werkzeuge berechnet werden. Dadurch ist es möglich, ein geeignetes Herstellungsverfahren für die Matrizen auszuwählen.

Schlagworte

Blechumformung, Tiefziehen, Werkzeugtechnologie, Kunststoff, Galvanoschalen, organisch beschichtete Bleche, Verschleiß, Reibung, Elastizität

Title

„Polymers as tooling material for deep drawing of sheet metal“

Abstract

Wear testing has shown that the wear resistance of polymeric tooling materials is sufficient for the manufacture of up to 50,000 sheet metal parts with soft dies. Costs can be reduced if small and medium sized batches are drawn with polymeric dies.

Besides a good wear resistance, polymers offer an outstanding frictional behaviour. Coefficients of friction obtained with polymeric dies are significantly lower than the values obtained with metallic tooling materials. Especially in aluminium sheet metal forming no adhesion and material transfer was detected.

It was also shown that deep drawing processes with polymeric dies can be simulated using Finite Element Analysis. The compliance of the softer material leads to evenly distributed normal stresses under the blank holder, which reduces the effort for the time consuming working in of the tools in the press shop.

Keywords

Sheet metal forming, deep drawing, tooling, polymers, galvanic, organic sheet coatings, wear, friction, elasticity

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover.

Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Doege gilt mein besonderer Dank für seine Unterstützung und die Bereitschaft, diese Arbeit jederzeit durch wertvolle Hinweise zu fördern.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Poll, dem Leiter des Instituts für Maschinenelemente, Konstruktionstechnik und Tribologie, danke ich für die eingehende Durchsicht der Arbeit und die sich daraus ergebenden Hinweise. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Heimann vom Institut für Mechanik für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin danke ich allen Kolleginnen und Kollegen sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und hier insbesondere meiner Frau Susanne, ohne deren Unterstützung und Beistand diese Arbeit nicht in der vorliegenden Form entstanden wäre.

Hannover, im Dezember 1999

Christian Frank

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung	3
3	Stand der Technik	4
3.1	Umformverfahren für kleine und mittlere Serien	5
3.1.1	Tiefziehverfahren mit Wirkmedien	5
3.2	Prototypenwerkzeuge	6
3.2.1	Tiefziehwerkzeuge aus niedrigschmelzenden Legierungen	7
3.2.1.1	Zinn-Wismut-Legierungen	7
3.2.1.2	Feinzinklegierungen	7
3.2.2	Kunststoffwerkzeuge	7
3.2.2.1	Herstellung von Kunststoffwerkzeugen	8
3.2.2.2	Polyurethanwerkstoffe (PUR)	9
3.2.2.3	Recycling von Polyurethan	10
3.2.2.4	Werkstoffliches Recycling von Polyurethan	10
3.2.2.5	Rohstoffliches Recycling von Polyurethan	10
3.3	Sonderverfahren zur Herstellung von Tiefziehwerkzeugen	11
3.3.1	Metallspritztechnik	11
3.3.2	Galvanoschalen	12
3.4	Organisch beschichtete Feibleche	12
3.4.1	Beschichtete Stahlfeibleche	13
3.4.2	Beschichtete Aluminiumfeibleche	14
4	Verschleiß und Verschleißprüfverfahren	16
4.1	Verschleiß	16
4.1.1	Struktur eines Tribosystems	16
4.1.2	Beanspruchungskollektiv	16
4.1.3	Verschleißerscheinungsformen	18
4.2	Verschleiß beim Tiefziehen	19
4.3	Prüfverfahren für Beanspruchungen beim Tiefziehen	20
4.3.1	Verschleißprüfstand von WOSKA	20

4.4	Prinzip des Verschleißprüfstands	21
4.4.1	Aufbau des Prüfstands	21
4.5	Versuchsdurchführung	22
4.5.1	Konturmessung und Verschleißrate	23
4.5.2	Blechwerkstoffe	24
4.6	Versuchsergebnisse	24
4.6.1	PUR-Frontguß und PUR-Gel-Coat	24
4.6.2	PUR-Plattenmaterialien	25
4.6.3	Einfluß der Flächenpressung auf das Verschleißverhalten	26
4.6.4	Einfluß von Füllstoffen auf das Verschleißverhalten	26
4.6.5	Vergleich von Polyurethanen mit anderen Werkzeugwerkstoffen	27
4.6.6	Verschleißverhalten von Galvanoschalen	28
4.7	Berechnungsansatz zur Verschleißermittlung	28
4.8	Experimenteller Abgleich des Ansatzes zur Verschleißberechnung	29
4.9	Zusammenfassung der Ergebnisse	30
5	Untersuchung des Reibverhaltens von Kunststoffen	32
5.1	Verfahren zur Ermittlung von Reibwerten	33
5.1.1	Streifenziehversuch mit Umlenkung	34
5.2	Reibwerte der unterschiedlichen Kunststoffwerkstoffe	35
5.2.1	Reibwerte von Stahlfeinblechen	35
5.2.2	Reibwertuntersuchungen mit Aluminiumfeinblechen	36
5.3	Reibwerte von oberflächenbeschichteten Feinblechen	37
5.3.1	Beschichtete Stahlfeinbleche	37
5.3.2	Beschichtete Aluminiumfeinbleche	38
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	39
6	Umformversuche mit Modellwerkzeugen	40
6.1	Einfluß des Werkzeugwerkstoffs auf das Tiefziehergebnis	40
6.2	Einfluß der Blechbeschichtung auf das Umformergebnis	45
6.2.1	Oberflächenbeschichtete Stahlfeinbleche	45
6.2.2	Oberflächenveredelte Aluminiumfeinbleche	47
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	48

7	Simulation des Tiefziehprozesses mit Kunststoffwerkzeugen	49
7.1	Das explizit dynamische FEM-System PAM-STAMP	49
7.2	Elemente für die Simulation von Tiefziehprozessen mit Kunststoffwerkzeugen	51
7.3	Beschreibung des Materialverhaltens von Kunststoffwerkzeugen	52
7.4	Elastische Kennwerte von Kunststoffwerkstoffen aus dem Zugversuch	53
7.5	Elastische Deformation der Ziehkante	55
7.6	Einfluß der Werkzeugnachgiebigkeit auf das Tiefziehergebnis	57
7.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	58
8	Anwendungspotential von Kunststoffen im Werkzeugbau	60
8.1	Umformung von Aluminiumblechen	60
8.1.1	Werkzeugauslegung mit FEM	60
8.1.2	Versuchsergebnisse	62
8.2	Warmumformung von Magnesium-Feinblechen	63
8.3	Galvanoschalen	63
8.3.1	Versuchswerkzeug	63
8.3.2	Praxiswerkzeug	64
9	Zusammenfassung und Ausblick	65
10	Bilder und Tabellen	67
11	Literatur	119
12	Lebenslauf	124

Formelzeichen

A_g	[-]	Gleichmaßdehnung
b	[mm]	Breite
d_0	[mm]	Stempeldurchmesser
D_0	[mm]	Platinendurchmesser
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
F_{ges}	[kN]	gesamte Ziehkraft
F_{id}	[kN]	ideelle Umformkraft
F_{rb}	[kN]	Biegekraft an der Ziehkante
F_{RN}	[kN]	Reibkraft im Flansch
F_{RZ}	[kN]	Reibkraft an der Ziehkante
F_{SG}	[kN]	Gegenhalterkraft
$F_{St,max}$	[kN]	Stempelkraftmaximum
F_{SZ}	[kN]	Streifenziehkraft
G	[MPa]	Schubmodul
K	[MPa]	Kompressionsmodul
L	[mm]	Charakteristische Elementlänge
m	[g]	Masse
n	[-]	Verfestigungsexponent
p_N	[MPa]	mittlere Flächenpressung
p_{N0}	[MPa]	mittlere Anfangsflächenpressung
p_{NH}	[MPa]	Niederhalterdruck
p_{NH0}	[MPa]	Anfangsniederhalterdruck
R_a	[μm]	arithmetischer Mittenrauhwert
r_E	[mm]	Eckenradius
r_m	[-]	mittlere senkrechte Anisotropie
r_M	[mm]	Ziehkantenradius

R_m	[MPa]	Bruchspannung
$R_{p0,2}$	[MPa]	Dehngrenze
r_{St}	[mm]	Stempelkantenradius
R_Z	[mm]	Ziehkantenradius eines Verschleißprüfkörpers
R_{Z0}	[mm]	Ausgangsziehkantenradius eines Verschleißprüfkörpers
R_{ZDIN}	[μm]	gemittelte Rauhtiefe
R_{ZEnde}	[mm]	Abbruchkriterium für Verschleißuntersuchungen
s	[mm]	Weg
s_0	[mm]	Blechdicke
s_{max}	[mm]	maximale Blechdicke
s_{min}	[mm]	minimale Blechdicke
β_0	[-]	Ziehverhältnis
β_{0max}	[-]	Grenzziehverhältnis
t	[s]	Zeit
u	[mm]	Betrag der Knotenverschiebung
u_{max}	[mm]	maximale Verschiebung
u_Z	[mm]	Ziehspalt
v_Z	[mm/s]	Ziehgeschwindigkeit
W	[mm/1]	Verschleißrate
ε	[-]	Dehnung
ν	[-]	Querkontraktionszahl
ρ	[g/cm ³]	Dichte
ρ_{Sim}	[g/cm ³]	Dichte für Finite Elemente Simulation
σ	[MPa]	Spannung

1 Einleitung

Komponenten und Baugruppen aus Feiblechen zeichnen sich durch ausgezeichnete mechanische Eigenschaften bei geringem Gewicht aus. Blechformteile lassen sich auf vollautomatisierten Fertigungsstraßen mit hoher Produktivität in höchsten Stückzahlen fertigen. Aus diesen Gründen zählen die Blechumformung und hierbei insbesondere das Tiefziehen zu den bedeutendsten Verfahren der Massenfertigung. Tiefgezogene Teile werden in vielen Bereichen von der Hausgeräte- über die Verpackungs- bis hin zur Automobilindustrie eingesetzt.

Die Produktionskosten werden bei der Blechumformung im Wesentlichen durch die Höhe der Werkzeugkosten bestimmt. So betragen die Kosten eines Werkzeugsatzes, der für die Fertigung eines Automobils erforderlich ist und bis zu 2500 Einzelwerkzeuge umfaßt, derzeit etwa 300 Millionen DM (Bild 1). Die Werkzeuge für die Blechumformung werden heute überwiegend aus Stahl oder Grauguß hergestellt und spanend bearbeitet. Vor dem endgültigen Einsatz in der Produktion werden die Werkzeuge in aufwendiger Handarbeit eingearbeitet. Gerade auf dem Automobilsektor ist ein anhaltender Trend zur Individualisierung der Fahrzeuge und damit zu kleineren Serien zu verzeichnen. Eine wirtschaftliche Fertigung von Nischenfahrzeugen ist nur bei einer deutlichen Senkung des Investitionsvolumens möglich. Überdies ist im Werkzeugbau ein großes Zeiteinsparungspotential vorhanden und eine technologische Neuerung erforderlich. Durch den Einsatz einer neuen Werkzeugtechnologie kann dieses Potential erschlossen werden.

Im Bereich des Prototypenbaus werden Kunststoffe bereits als Werkzeugwerkstoffe verwendet. Hierbei werden sowohl Platten- als auch Gießmaterialien eingesetzt. Für Losgrößen von mehr als fünfhundert Teilen werden jedoch generell Grauguß- oder Stahlwerkzeuge gefertigt, obwohl die Stückzahlen einiger Fahrzeugvarianten einen wirtschaftlichen Einsatz solcher Werkzeuge nicht sinnvoll erscheinen lassen.

Für den Stückzahlbereich von 5.000 bis 50.000 Einheiten sowie für die Verarbeitung von lackierten Blechen existiert bisher keine angepaßte Werkzeugtechnologie, obgleich bereits heute Kunststoffwerkstoffe auf dem Markt erhältlich sind, deren Verschleißverhalten und Festigkeit einen Einsatz bei derartigen Werkzeugen erlaubt und deren Reibverhalten zudem günstiger ist als das von Stahlwerkzeugen.

Der Einsatz von Kunststoffwerkzeugen ist insbesondere bei organisch beschichteten Blechen sinnvoll, da die Lackschicht des Blechs durch ein weiches Kunststoffwerkzeug nicht beschädigt wird. Darüber hinaus können aus Kunststoffen seriennahe Prototypenwerkzeuge gefertigt werden, die in der Großserienproduktion erst dann durch Stahlwerkzeuge ersetzt werden, wenn alle Änderungen, welche bei Stahlwerkzeugen das Tiefziehergebnis stark beeinträchtigen können, in das Kunststoffwerkzeug eingearbeitet sind.

2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, das Potential von Kunststoff als Werkzeugwerkstoff für das Tiefziehen von Feinblechen und somit das Potential einer stückzahlangepaßten, wirtschaftlichen Werkzeugtechnologie für die Fertigung kleiner und mittlerer Serien zu demonstrieren.

Dabei soll insbesondere gezeigt werden, wie sich diese Werkzeuge hinsichtlich des Verschleißes und der Reibung verhalten und welchen Einfluß die Elastizität von Kunststoffen auf den Tiefziehprozeß hat. Die Untersuchung des Verschleißverhaltens von kommerziell erhältlichen Kunststoffen soll belegen, daß mittlere Serien bei minimalem Werkzeugverschleiß tiefgezogen werden können. Durch einen Berechnungsansatz sollen die Ergebnisse, die in Modellversuchen erzielt werden, auf den realen Tiefziehprozeß übertragen werden. Reibuntersuchungen und Modellumformversuche mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen sollen zeigen, daß sich aus der Umformung mit Kunststoffwerkzeugen technologische Vorteile für den Tiefziehprozeß ergeben. Hierbei soll insbesondere nachgewiesen werden, daß sich bei der Umformung von Aluminiumblechen sowie von organisch beschichteten Blechen Vorteile ergeben.

Kunststoffe weisen eine geringere Festigkeit und höhere Nachgiebigkeit als Stahl auf. Ein geringerer Elastizitätsmodul kann sich auf die Maßhaltigkeit der Teile sowie auf die erforderlichen Niederhalterkräfte auswirken. Ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die Grundlagen für die Prozeßsimulation des Tiefziehens mit Kunststoffwerkzeugen zu schaffen und anzuwenden. Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode sollen Prozeßparameter wie die erforderlichen Niederhalterkräfte überprüft sowie die elastische Deformation während des Tiefziehens berechnet werden.

3 Stand der Technik

Tiefziehwerkzeuge bestehen prinzipiell aus mindestens drei Komponenten: dem **Stempel**, der das Blech in die **Matrize** hineinpreßt, sowie einem **Niederhalter**, der ein Ausknicken des Blechs im Flanschbereich verhindert (Bild 2). Die Faltenbildung im Flansch ist dabei die Folge tangentialer Druckspannungen, die während des Tiefziehens im Flansch auftreten. Neben dieser Versagensform ist das Reißen des Blechs im Bereich der Stempelkantenrundung die häufigste Schadensursache. Zwar wird in diesem Bereich die tangentielle Dehnung des Blechs durch den innen anliegenden Stempel verhindert, was zu deutlichen Steigerungen der übertragbaren Kraft führt, dennoch ist dieser Bereich durch eine Blechverdünnung geschwächt, die eine Folge der Ausbildung des Bodens durch eine zweiachsige Zugbeanspruchung ist.

Die Produktkosten werden beim Tiefziehen maßgeblich durch die Werkzeugkosten, die Material- und Fertigungskosten sowie durch die Kosten für das Einfahren der Werkzeuge bestimmt [Töns97]. Daher ist das Tiefziehen mit Stahl- oder Graugußwerkzeugen derzeit nur bei sehr großen Serien von mehreren 10.000 Teilen ein wirtschaftliches Verfahren.

Für die Produktion komplexer Teile, die nicht in einer Umformstufe gezogen werden können, sind Werkzeugsätze erforderlich, die teilweise aus bis zu fünfzehn einzelnen Werkzeugen bestehen können. Die Werkzeugaktivflächen, die maßgebend für die Teilegeometrie sind, werden in zeitaufwendigen spanenden Operationen hergestellt. Trotz moderner CNC-gesteuerter Bearbeitungsmaschinen bedarf es häufig langwieriger manueller Nacharbeit, bevor erste Teile gezogen werden können [Töns96].

Um diesen Nachteil zu umgehen und auch kleinere Stückzahlen kostengünstig fertigen zu können, wurden mehrere Verfahren entwickelt, die eine Reduktion der Werkzeugkosten zum Ziel haben.

Im Bereich des Prototypenbaus, in dem man sich auf die Fertigung weniger hundert Teile beschränkt, werden derzeit Werkzeuge aus niedrigschmelzenden Legierungen sowie aus Kunststoffen eingesetzt. Diese Werkstoffe zeichnen sich dadurch aus, daß die Bearbeitungszeiten im Vergleich zu Stahlwerkstoffen deutlich geringer ausfallen und die Werkzeuge somit kostengünstiger zu fertigen sind [Sieg96].

Ein anderer Ansatz, der derzeit verfolgt wird, ist das Umformen von Blechen mit Wirkmedien. Bei diesen Verfahren ist lediglich die Fertigung einer Werkzeughälfte erforderlich, da ein Fluid oder ein sogenannter Gummikoffer die Matrize ersetzt. Der wirtschaftliche Vorteil dieser Verfahren ergibt sich aus der Tatsache, daß nur eine Werkzeughälfte (ein Stempel oder eine Matrize) gefertigt werden muß.

Neben neuen Werkzeugwerkstoffen und neuen Umformverfahren werden zunehmend beschichtete Stahl- und Aluminiumfeinbleche entwickelt und eingesetzt. Organische Beschichtungen, die walzwerkseitig auf Bandbeschichtungsanlagen im sogenannten Coil-Coating-Verfahren aufgetragen werden, sollen als Korrosionsschutzschutzmaßnahme dienen, die Gleiteigenschaften während der Umformung verbessern und zur Verkürzung der Prozeßketten bei der Endlackierung beitragen [Stre94].

3.1 Umformverfahren für kleine und mittlere Serien

Für kleine und mittlere Serien wurden in der jüngeren Vergangenheit eine Vielzahl von Umformverfahren entwickelt. Hierbei unterscheidet man zwischen Prozessen, die mit flexiblen statt starren Werkzeugen arbeiten, und Verfahren, bei denen nur eine Werkzeughälfte gefertigt werden muß. Da die Taktzeiten bei den Fertigungsmethoden, die mit einem flexiblen Satz von Werkzeugen arbeiten, den Anforderungen an die Herstellung mittlerer Serien noch nicht genügen, sollen hier nur die Verfahren vorgestellt werden, die lediglich mit einer Werkzeughälfte und mit Wirkmedien arbeiten.

3.1.1 Tiefziehverfahren mit Wirkmedien

Einen Ansatz zur Steigerung der Flexibilität bieten Umformverfahren, welche nur eine formgebende Werkzeughälfte benötigen. Die Matrize wird durch ein Wirkmedium ersetzt. Als Medien werden hierbei sowohl Fluide als auch nachgiebiges Gummi eingesetzt. Bei den Fluidform-Verfahren [Amin90, Joha87] ist die formgebende Werkzeugaktivfläche der Stempel; eine Matrize wird nicht benötigt. Das Blech wird bei diesem Umformverfahren durch eine Membran von dem Wirkmedium, einem Fluid (z.B. Öl), getrennt. Die Membran stützt sich gegen einen Niederhalter ab, durch den der Stempel während der Umformung in das Blech und damit in das Wirkmedium eintaucht. Bei der verwandten Fluidzell-Ziehtechnik [Mind92] wird auf die Stempelbewegung verzichtet (Bild 3). Die zur Umformung nötige Arbeit wird durch das Wirkmedium, das von der Platine durch eine Membran getrennt ist, aufgebracht. Die formgebende Werkzeugaktivfläche wird im Flugzeugbau aus Schichtholz gefertigt. Dieses Material zeichnet sich durch einen geringen Preis und eine sehr gute Zerspanbarkeit aus. Hergestellt wird es aus einer Vielzahl von Lagen aus Buchenfurnieren, die nach der vollständigen Trocknung und nach dem Tränken mit Phenolharzen unter Druck und Hitze zu einem druckbeständigen Verbundmaterial zusammengefügt werden.

Weitere Verfahren sind das aktive hydromechanische Tiefziehen [Jänc99] (Bild 4) sowie das ähnliche pneumomechanische Tiefziehen [Klei97]. Bei beiden Verfahren wird zunächst die Platine in das Werkzeug eingelegt, das anschließend geschlossen wird. Durch ein Druckmedium wird das Werkstück im nächsten Schritt entgegen der Stempelwirkrichtung vorgereckt. Im letzten Schritt werden Blechhalter, Platine und Ziehring gegen den feststehenden Stempel verdrängt.

Neben den Verfahren, welche mit Öl oder anderen Fluiden als Wirkmedien arbeiten, gehören zu dieser Verfahrensgruppe auch die Prozesse, die mit anderen Wirkmedien wie zum Beispiel Gummi, Metallkugeln oder einer durch Sprengstoff erzeugten Druckwelle, arbeiten. Hierzu zählen das Tiefziehen mit Gummistempeln beziehungsweise Gummikissen, das Kugelstrahlumformen [Simm52] sowie die Explosionsumformung [Schi71].

Der Werkstofffluß bei den Verfahren, die mit nur einer Werkzeughälfte arbeiten, unterscheidet sich grundsätzlich von dem, der beim konventionellen Tiefziehen auftritt. Daher lassen sich die Ergebnisse und Erfahrungen, die mit einteiligen Werkzeugen erzielt wurden, nicht auf den konventionellen Tiefziehprozeß übertragen, was einen deutlichen technologischen Nachteil dieser Verfahren im Hinblick auf die Fertigung von Prototypenteilen darstellt.

Ein weiterer wirtschaftlicher Nachteil dieser Technologien liegt in der zusätzlich zu Tiefziehpressen erforderlichen Anlagentechnik. Für Preßwerke, die nicht über die apparative Ausstattung für die Verfahren verfügen, ist daher das konventionelle Tiefziehen mit Stempel, Matrize und Niederhalter, gefertigt aus alternativen Materialien [Neub97], wie z.B. Kunststoffen oder niedrigschmelzenden Legierungen, die einzige Alternative zu Stahl- beziehungsweise Graugußwerkzeugen. Durch den Einsatz von Kunststoff als Werkzeugwerkstoff kann die Zeit für die Fertigung und Einarbeitung sowie für die sich ergebenden Änderungen reduziert werden. Darüber hinaus können bei der Teilefertigung dieselben Taktzeiten wie beim Tiefziehen mit Stahlwerkzeugen erreicht werden.

3.2 Prototypenwerkzeuge

Im Bereich des Prototypenbaus besteht die Forderung nach einer Werkzeugtechnologie, mit der sehr kleine Serien, d.h. weniger als einhundert Tiefziehteile, in kürzester Zeit gefertigt werden können. Die Herstellung von Stahl- oder Graugußwerkzeugen ist hierbei nicht sinnvoll, da die Bearbeitungszeiten keine schnelle Fertigung von wenigen Blechteilen erlauben. Aus diesem Grund werden im Prototypenbereich Werkzeugwerkstoffe eingesetzt, die leicht und schnell zu bearbeiten sind. Dies können sowohl niedrigschmelzende Legierungen als auch Kunststoffe sein. Beide Werkstoffgruppen lassen sich leicht mecha-

nisch bearbeiten und können gegossen werden, so daß langwierige NC-Bearbeitungszeiten vermieden werden.

3.2.1 Tiefziehwerkzeuge aus niedrigschmelzenden Legierungen

Im Prototypenbau werden vielfach Tiefziehwerkzeuge aus niedrigschmelzenden Legierungen eingesetzt [Radk83]. Zum Einsatz kommen dabei Zinn-Wismut-Legierungen sowie Feinzinklegierungen.

3.2.1.1 Zinn-Wismut-Legierungen

Eine vielfach im Prototypenbau eingesetzte niedrigschmelzende Legierung besteht zu etwa 57 Volumenprozenten aus Zinn und zu 43 Volumenprozenten aus Wismut. Dieses mit etwa 200 DM/dm³ sehr teure Material hat den großen Vorteil, daß die Erstarrung von der Schmelztemperatur ($T_S = 139\text{ °C}$) nicht zu einer Schwindung, sondern zu einer minimalen Volumenvergrößerung um 0,05 % führt. Somit sind für die Herstellung von Werkzeugen keine Expansionsmodelle erforderlich, wodurch kurze Durchlaufzeiten erzielt werden. Der hohe Preis erfordert aus wirtschaftlichen Gründen allerdings ein baldiges Einschmelzen der Werkzeuge [Thom94].

3.2.1.2 Feinzinklegierungen

Genau wie Zinn-Wismut-Legierungen können auch Feinzinklegierungen (zum Beispiel mit 93 % Zink, 4 % Aluminium und 3 % Kupfer) immer wieder eingeschmolzen und neu vergossen werden (Schmelztemperatur $T_S = 390\text{ °C}$). Da Feinzinklegierungen eine höhere Härte als Zn-Bi-Legierungen haben, weisen sie ein deutlich besseres Verschleißverhalten auf. Sie eignen sich dennoch nicht zur Herstellung von Großserienwerkzeugen. Das Schwindmaß beträgt bei den Feinzinklegierungen ähnlich wie beim Grauguß 1 %. Aus diesem Grund müssen Werkzeuge aus Feinzinklegierungen in der Regel mit Übermaß gegossen werden und anschließend spanend nachbearbeitet werden, was die Durchlaufzeiten der Werkzeuge entsprechend erhöht [Thom94, Sieg96].

3.2.2 Kunststoffwerkzeuge

Im Prototypenbau werden seit Jahren Kunststoffe als Werkzeugwerkstoffe eingesetzt. Dabei kommen sowohl Epoxid- als auch Polyurethanharze zum Einsatz, deren Eigenschaften zum Teil durch Füllstoffe modifiziert werden. Solche Kunststoffwerkzeuge können nach [Sieg96] mit 55 % der Kosten von Grauguß- beziehungsweise mit 75 % der Kosten von Tiefziehwerkzeugen aus Feinzinklegierungen gefertigt werden. Im folgenden Abschnitt

werden die Herstellung von Werkzeugen aus Kunststoff sowie die Bildungsreaktion und das Recycling der am häufigsten eingesetzten Kunststoffe beschrieben.

3.2.2.1 Herstellung von Kunststoffwerkzeugen

Für die Herstellung der Kunststoffwerkzeuge gibt es verschiedene Verarbeitungsmethoden. Einerseits ist es möglich, die Werkzeuge spanend zu fertigen. Dazu wird die Kontur des Werkzeugs zunächst aus einzelnen, miteinander verklebten Kunststoffplatten angenähert und die Endkontur aus diesem Werkzeugrohling herausgefräst. Der Vorteil gegenüber der Herstellung von Guß- oder Stahlwerkzeugen liegt dabei in dem deutlich höheren Zeitspannvolumen [Kien98].

Außerdem können Kunststoffe einfach gegossen werden. Vorteilhaft bei diesem Fertigungsverfahren ist die optimale Rohstoffausnutzung und die gute Oberflächenqualität. Eine gute Maßhaltigkeit der Werkzeuge kann dabei durch eine angepaßte Werkstoffwahl und Gießtechnik erzielt werden, durch welche die reaktionsbedingte Schrumpfung (0,01 – 0,03 % [Thom94]) minimiert wird.

Die ersten Arbeitsschritte bei der Herstellung gegossener Werkzeuge sind bei den drei verschiedenen Gießtechniken sehr ähnlich:

1. Fräsen eines Stempels aus Plattenmaterial (Bild 5).
2. Aufbringen einer Wachsschicht, um die Blechdicke zu berücksichtigen.
3. Modellieren des Blechhalters aus Plattenmaterial und des Ziehkantenradius aus Plastilin.
4. Auftragen einer Trennschicht zum einfachen Entformen und Einschalen, um den Abguß herzustellen (Bild 6).

Im Anschluß an diese Arbeitsgänge kann die Matrize gegossen werden. Hierbei werden verschiedene Verfahren angewendet:

Das einfachste Verfahren ist der **Vollguß**. Die zuvor entstandene Form wird mit flüssigem Kunststoff aufgefüllt. Bei der Konsolidierung kommt es jedoch zu reaktionsbedingter Schwindung, so daß dieses Verfahren nur bei kleinen Werkzeugen zur Anwendung kommt.

Eine ebenfalls einfache Methode ist das Streichen der Oberfläche (auch: **Gel-Coat-Verfahren**), um eine verschleißfeste Oberflächenschicht zu erhalten. Dazu wird eine 1 - 2 mm dicke Kunststoffsicht auf die Gußform aufgestrichen (Bild 7). Die Thixotropie des Kunststoffs ist eine maßgebliche Einflußgröße, da die Schicht auch auf vertikalen Flä-

chen eine gleichmäßige Stärke aufweisen soll. Nach dem Aushärten wird diese Schicht mit flüssigem Kunststoff hinterfüllt (Bild 8). Eine dünne Schicht eines Epoxidklebers dient dabei einer optimalen Haftung zwischen Gel-Coat und Hinterbau. Als Füllstoffe werden unter anderem Metallspäne und Quarzsand eingesetzt. Dabei muß der Matrixwerkstoff die Füllstoffe gut benetzen, um eine hohe Festigkeit zu erreichen. Füllstoffe dienen zur Steigerung der Druckfestigkeit und Steifigkeit sowie zur Verringerung der Schwindung beim Aushärten des Kunststoffs.

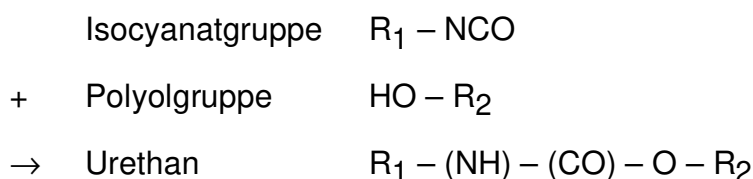
Durch eine Armierung, zum Beispiel einen Stahlring, werden die radialen Zugspannungen abgetragen, die im Hinterbau als Folge der hohen Umformkräfte auftreten. Dadurch können einerseits die elastischen Deformationen des Werkzeugs reduziert und andererseits kann ein Reißen des Werkzeugs verhindert werden.

Das derzeit genaueste aber auch recht zeitaufwendige Verfahren ist der **Frontguß** (Bild 9). Stempel und Niederhalter werden dabei mit einer Distanzschicht in der geforderten Dicke des Frontmaterials (5 - 10 mm) belegt. Daraufhin wird zunächst die Hinterfüllung gegossen, die aus kostengünstigem, druckfestem und steifem Kunststoff besteht. Wie beim Gel-Coat-Verfahren werden auch hier Armierungen eingearbeitet. Nachdem die Hinterfüllung ausgehärtet ist, wird die Distanzschicht entfernt und die verschleißfeste Frontschicht in den entstandenen Hohlraum gegossen.

3.2.2.2 Polyurethanwerkstoffe (PUR)

Polyurethane, die ein breites Anwendungsspektrum aufweisen [Gotz98], sind aufgrund ihrer mechanischen und chemischen Eigenschaften ideale Werkzeugwerkstoffe für die Blechumformung [Neub97]. Der Marktanteil von Polyurethanwerkstoffen im Werkzeugbau ist in den letzten Jahren im Vergleich zu den Epoxidwerkstoffen, die ein höheres Gefährdungspotential bei der Verarbeitung aufweisen [Zhar94], stetig gestiegen [Hoch91].

Die Bildungsreaktion dieser räumlich vernetzten Makromoleküle ist die Polyaddition. Hierzu sind besonders reaktionsfähige funktionelle Gruppen notwendig (Polyisocyanat sowie Polyol), die ohne Bildung von Nebenprodukten in einer exothermen Reaktion zu monomeren hochmolekularen Polyaddukten zusammengeführt werden.



R_1 und R_2 sind dabei sogenannte Restgruppen, die aus Kohlenstoffketten bestehen können. Abhängig von der Anzahl Isocyanat- sowie Polyolgruppen an den Molekülen der

Ausgangsstoffe entstehen lineare oder räumlich vernetzte Polymere. Das Spektrum der Polyurethane deckt daher den Bereich von Thermoplasten (lineare und somit einschmelzbare Polymere) über Elastomere (Polymere mit gummielastischen Eigenschaften, z.B. PUR-Kautschuk) bis hin zu hochgradig räumlich vernetzten Duroplasten (nicht einschmelzbare Polymere) ab [Mich92].

Erhältlich sind PUR-Werkstoffe als Zweikomponentengießmassen, die vom Verarbeiter zur Festigkeitssteigerung sowie zur Vermeidung der Schrumpfung, die bei der Aushärtung auftreten kann, mit Füllstoffen (zum Beispiel Metallspänen oder Quarzsand) versehen werden können. Außerdem sind Platten erhältlich, die im Vakuum vergossen werden. Die Eigenspannungen in Platten, die beim Fräsen zu Maßabweichungen führen können, werden nach der Aushärtung im Temperofen bei erhöhten Temperaturen um 150 °C abgebaut. Somit weisen Plattenmaterialien besonders homogene Eigenschaften auf.

3.2.2.3 Recycling von Polyurethan

Auf dem Gebiet des Recycling von Polyurethanwerkstoffen (PUR) sind zahlreiche Erkenntnisse vorhanden [Raßh94]. Aus diesem Grund sollte das Recycling der Werkzeuge nicht Gegenstand dieser Arbeit sein. Durch die weite Verbreitung von PUR wurden verschiedene Techniken zum Recycling der wertvollen PUR-Reste entwickelt, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

3.2.2.4 Werkstoffliches Recycling von Polyurethan

Unter dem werkstofflichen Recycling von PUR versteht man die Wiederverwendung unter Beibehaltung der Molekularstruktur. Kunststoffwerkzeuge können nach Erreichen der Lebensdauer geschreddert werden. Die so entstehenden Späne können dann als Füllmaterial für neue Werkzeuge verwendet werden. Untersuchungen der Firma Ciba-Geigy haben gezeigt, daß in einer Gesteinsmühle gemahlene PUR-Reste problemlos als Hinterfüllungsmaterial wiederverwendet werden können. Die Haftung zwischen neuer Matrix und dem Recyclat ist hierfür ausreichend hoch.

3.2.2.5 Rohstoffliches Recycling von Polyurethan

Polyurethane können auf verschiedene Ebenen des Polymeraufbaus zurückgeführt werden. Dabei sind Verbrennung, Pyrolyse und Hydrierung wesentlich schwerwiegendere Eingriffe in das Makromolekül als die Chemo- und Thermolyse. Endprodukte des Recycling sind Energie und chemische Rohstoffe. Die nachfolgend aufgelisteten Recyclingverfahren

sind nach zunehmender Tiefe des chemischen Abbaus (abnehmendes Molekulargewicht der Polymerbruchstücke) geordnet [Raßh94, Uhli98]:

- **Chemolyse** bezeichnet einen für die Verflüssigung ausreichend geringen Abbau beziehungsweise eine Modifizierung des Polymergerüsts. Die Reaktionstemperatur liegt bei maximal 220 °C.
- **Thermolyse** ist ein Verfahren, mit dem bei 200 - 400 °C vor allem polyolartige Produkte entstehen, die zur energetischen Verwertung geeignet sind.
- **Pyrolyse** wird bei 700 - 800 °C durchgeführt und liefert Koks, Öle und Gase für die Petrochemie.
- **Hydrierung** liefert bei Drücken von 400 bar und Temperaturen von 500 °C niedermolekulare petrochemische Öl- und Gasprodukte.
- **Verbrennung** liefert Energie und Verbrennungsprodukte.

3.3 Sonderverfahren zur Herstellung von Tiefziehwerkzeugen

Neben den klassischen Verfahren zur Herstellung von Tiefziehwerkzeugen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zwei weitere Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen für kleine und mittlere Serien untersucht. Bei diesen Werkzeugen besteht die Oberfläche aus einer metallischen Schicht mit einer Dicke von etwa 5 mm. Bei der Metallspritztechnik wird diese auf eine Negativform aufgespritzt, bei den Galvanoschalen wird sie hingegen elektrolytisch abgeschieden. Beide Verfahren werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

3.3.1 Metallspritztechnik

In Metallspritztechnik hergestellte Werkzeuge finden insbesondere bei Prototypenwerkzeugen für den Kunststoff-Spritzguß eine breite Anwendung [Träg97]. Die Herstellung solcher Werkzeuge läuft ähnlich ab wie die Herstellung von Kunststoffwerkzeugen mit gestrichener Oberfläche (Gel-Coat-Technik). Anstatt der dünnen Polyurethanschicht wird allerdings eine Metallschicht auf die Oberfläche des Werkzeugs gespritzt. Hierzu wird Metall geschmolzen und mittels einer Druckpistole als fein verteilte Tröpfchen von geringem Durchmesser auf die Negativform aufgespritzt. Beim Auftreffen auf die Oberfläche erstarren die Metalltröpfchen und bilden eine Schicht, deren Dicke bei Tiefziehwerkzeugen etwa 5 mm betragen sollte. Nachdem die Metallschicht auf die Oberfläche aufgetragen wurde, wird das Werkzeug mit Kunststoff hinterfüllt.

3.3.2 Galvanoschalen

Galvanomatrizen für die Umformung von Feinblechen bestehen aus zwei Komponenten: einer Metallschale mit einer Schichtdicke von etwa 5 mm sowie einem Hinterbau, der aus Kunststoff gegossen wird. Die Herstellung einer Galvanomatrize gliedert sich in vier Arbeitsschritte (Bild 10):

1. Zunächst wird eine Negativform aus Kunststoff hergestellt, auf deren Oberfläche die Metallschicht galvanisiert werden soll. Die Oberfläche wird mit einem sogenannten Silberleitlack bestrichen und somit elektrisch leitfähig.
2. Im Elektrolytbad wird anschließend die Metallschicht galvanisch abgeschieden. Dieser Vorgang dauert je nach gewünschter Schichtdicke zwischen zwei und vier Wochen. Derzeit werden allerdings Bedampfungsverfahren erprobt, mit denen ein Schichtaufbau von bis zu 1 mm pro Tag realisiert werden soll.
3. Nachdem auf der Negativform eine etwa 5 mm dicke, sehr harte Metallschicht abgeschieden wurde, werden Gewindebolzen auf die Unterseite der Schale geschweißt, die eine gute Haftung zwischen der Schale und dem Hinterbau gewährleisten.
4. Im letzten Arbeitsschritt wird die Galvanoschale mit einem Kunststoff hinterfüllt, der eine hohe Dauerfestigkeit unter den beim Tiefziehen im Werkzeughinterbau herrschenden Druckbeanspruchungen aufweist (Bild 11).

Die Aktivflächen von Galvanowerkzeugen weisen eine sehr glatte Oberfläche auf (arithmetischer Mittenrauhwert des gezeigten Werkzeugs: $R_a = 0,61 \mu\text{m}$). Die Härte von Galvanoschalen hängt von der Legierungszusammensetzung ab und beträgt bei den härteren Nickel-Kobalt-Legierungen etwa 48 HRC beziehungsweise 25 HRC bei den weicheren Sulfamat-Nickel-Legierungen.

3.4 Organisch beschichtete Feinbleche

Da unbeschichtete Stahl- und Aluminiumfeinbleche in automatisierten Fertigungslinien nicht ohne den Auftrag von flüssigen Schmiermitteln umgeformt werden können, wurde eine Reihe von organischen Beschichtungssystemen entwickelt, die den Schmiermittelbedarf bei der Umformung senken oder ganz eliminieren sollen. Ein weiterer wesentlicher Vorteil einiger Oberflächenveredelungen besteht in der Tatsache, daß insbesondere bei Stahlfeinblechen auf eine Korrosionsschutzbeölung verzichtet werden kann. Diese wird im Walzwerk aufgetragen, um das Blech während des Transports und der Lagerung vor Korrosion zu schützen [Alsm98]. Bei Aluminiumblechen ist die Gefahr der Korrosion aufgrund der Barrierewirkung einer Oxidschicht, die sich auf blanken Blechen durch die Reaktion

mit dem Luftsauerstoff bildet, äußerst gering. Allerdings müssen diese Bleche wegen ihrer empfindlichen Oberfläche vor dem Verkratzen geschützt werden [Furr98].

3.4.1 Beschichtete Stahlfeinbleche

Die Oberflächenveredelung der Stahlbleche wird in sogenannten Bandbeschichtungsanlagen aufgetragen. Hierbei werden komplette Coils kontinuierlich ein- oder beidseitig mit ein- oder mehrschichtigen Lacken versehen. Nach einer Entfettung der Bleche wird zunächst eine Chromatierung oder Phosphatierung aufgetragen, die der Lackhaftung dient. Im Anschluß daran können in mehreren Schritten die einzelnen Lackschichten auf beide Seiten des Blechs aufgetragen werden. Bild 12 zeigt den prinzipiellen Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten organisch beschichteten Stahlbleche.

Die verschiedenen organische veredelten Stahlbleche unterscheiden sich hinsichtlich des Lackaufbaus, nicht aber hinsichtlich der elektrolytisch abgeschiedenen Zinkschicht. Diese Schicht stellt bei einer Beschädigung der Lackschicht einen zusätzlichen Korrosionsschutz dar und verhindert somit insbesondere ein Unterwanderung des Lacks, die im ungünstigsten Fall zu großflächigem Abplatzen führen kann.

Im Rahmen der Arbeit wurden unterschiedliche Systeme untersucht, die sich hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Weiterverarbeitung beim Fügen und bei der Endlackierung unterscheiden. Aus diesen Materialien gefertigte Teile werden in der Regel nach der Umformung durch Widerstandsschweißen gefügt. Im Anschluß daran werden die Teile in alkalischen Bädern entfettet und nach einer Chromatierung mit einer kathodischen Tauchlackierung (KTL) versehen, die besonders guten Korrosionsschutz aufweist, da diese Lackierung auch in Fugen und schwer zugänglichen Bereichen eine deckende Schicht erzeugt. Im Anschluß daran wird ein Füllerlack und im letzten Prozeßschritt wird der Decklack aufgetragen [Wohn93].

- Der **Trockenschmierstoff**, aufgetragen mit einer Schichtdicke von einem Mikrometer, dient als Ersatz für flüssige Schmierstoffe. Die untersuchten Trockenschmierstoffe werden auf Acrylbasis hergestellt, sind schweißbar und werden wie flüssige Schmiermittel in den alkalischen Bädern der Lackiererei entfernt, so daß keine Änderung der Prozeßkette erforderlich wird.
- Die **schweißbare Dünnschichtversiegelung** Bonazinc 3000 ist ein Epoxidlack, der mit Zinkstaub versehen ist. Die Blechteile können herkömmlich gefügt werden, eine aufwendige Vorbehandlung zum Korrosionsschutz an Falzen sowie eine Hohlraumversiegelung kann jedoch entfallen [Behr98]. Auf die Dünnschichtversiegelung kann zusätzlich

eine Trockenschmierstoffschicht mit einer Schichtdicke von etwa einem bis zwei Mikrometern aufgetragen werden, durch die auf flüssige Schmiermittel verzichtet werden kann.

- Die **schweißbare KTL-Ersatzlackierung** Zincroplex Black weist eine Dicke von 13 µm auf. Der Lackschicht sind Partikel einer Eisenlegierung beigemischt, welche den Lack elektrisch leitfähig machen, so daß die Bleche geschweißt werden können. Aus diesem Material gefertigte Teile und gefügte Baugruppen müssen daher lediglich entfettet werden, damit man sie mit der Grundierung und dem Decklack versehen kann [Alsm98].

Die **Polyesterbeschichtung** ist ein Zwei-Schichtsystem mit einer Gesamtdicke von 30 µm. Da die Beschichtung elektrisch nicht leitfähig ist, müssen bei diesem Material mechanische Fügetechniken zum Einsatz kommen [Been98]. Bild 13 zeigt, wie die Fertigungstiefe beim Automobilhersteller durch den Einsatz organisch beschichteter Bleche verkürzt werden kann. Durch den Einsatz von Trockenschmierstoffen kann auf einen Korrosionsschutz sowie die Beölung für den Tiefziehvorgang verzichtet werden, durch die Verarbeitung von Blechen mit Dünnschichtlackierungen können Korrosionsschutzmaßnahmen wie die Naht- und Falzabdichtung entfallen. Verwendet man Blech, das mit einer KTL-Ersatzlackierung beschichtet ist, so kann darüber hinaus auf die kathodische Tauchlackierung verzichtet werden. Dieser Vorteil wird derzeit beispielsweise bei der Fertigung von Ersatzteilen, die nur noch endlackiert werden müssen, genutzt.

3.4.2 Beschichtete Aluminiumfeinbleche

Wie die Beschichtung der Stahlbleche erfolgt auch die Lackierung der Aluminiumbleche walzwerkseitig in Bandlackieranlagen. Während beim Stahl lediglich ein Grundwerkstoff für die verschiedenen Beschichtungen untersucht wurde, wurden beim Aluminium zwei Legierungen (AlMg_{4,5}Mn_{0,4} und AlMg_{0,4}Si_{1,2}) in die Untersuchungen einbezogen, die jeweils mit denselben Beschichtungen versehen waren. Den schematischen Aufbau der drei Beschichtungssysteme zeigt Bild 14. Im einzelnen wurden neben unbeschichteten Blechen als Referenz folgende Beschichtungen untersucht:

- **Trockenschmierstoff**, aufgetragen in einer Schichtdicke von 3 µm.
- Die **schweißbare Dünnschichtversiegelung** Bonazinc 2004, bei der Aluminiumpartikel in den Epoxidlack eingelagert sind, der in einer Schichtdicke von 7 µm aufgetragen war. Der Einsatz von Aluminiumpartikeln anstatt der Zinkpartikel wie bei Bonazinc 3000 für Stahl verhindert eine Anreicherung von Zink als unerwünschtes Legierungselement beim Recycling der Aluminiumbleche.

- Eine **KTL-Ersatzlackierung**, die in zwei Schichten auf das Blech aufgetragen wurde. Dieses Lacksystem zeichnet sich durch eine hohe Schlagunempfindlichkeit aus, kann jedoch nicht geschweißt werden.

Bei einigen der untersuchten Bleche wurde die übliche Chromatierung, die einer verbesserten Lackhaftung dient, aber zu einer Umweltbelastung führen kann, durch eine anodische Sperrschicht aus einer Titan-Zirkon-Verbindung ersetzt.

4 Verschleiß und Verschleißprüfverfahren

4.1 Verschleiß

Verschleiß ist nach DIN 50320 definiert als der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Beanspruchung, das heißt Kontakt und Relativbewegung mit einem Gegenkörper. Die Beanspruchung der Oberfläche des festen Körpers durch Kontakt mit einem festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörper unter Relativbewegung wird als tribologische Beanspruchung bezeichnet. Im Unterschied zu den Festigkeitseigenschaften wie Zug- oder Druckfestigkeit, die als stoffbezogene Werkstoffkenngrößen angesehen werden, resultiert der unter tribologischen Beanspruchungen auftretende Verschleiß aus dem Zusammenwirken aller am Verschleißvorgang beteiligten Elemente und kann nur durch systembezogene Verschleißkenngrößen beschrieben werden. Bild 15 zeigt schematisch ein tribologisches System (Tribosystem) [DIN79].

4.1.1 Struktur eines Tribosystems

Die Struktur eines Tribosystems ist durch die am Verschleißvorgang beteiligten Elemente sowie ihre tribologisch relevanten Eigenschaften und Wechselwirkungen gekennzeichnet. Man unterscheidet offene und geschlossene Tribosysteme. Bei offenen Systemen wird die Oberfläche des Grundkörpers durch fortlaufend neue Oberflächenbereiche des Gegenkörpers beansprucht. Die Funktion eines solchen Systems hängt hauptsächlich vom Verschleiß des Grundkörpers ab, während der Gegenkörper lediglich die Beanspruchung erzeugt. Das Tribosystem „Tiefziehwerkzeug-Blech“ ist ein solches offenes System, da die Beanspruchung des Werkzeugs, dem Grundkörper, bei jedem Tiefziehvorgang durch eine neue Platine, den Gegenkörper, hervorgerufen wird. Im Gegensatz dazu geraten bei einem geschlossenen Tribosystem die Oberflächenbereiche von Grund- und Gegenkörper wiederholt in Kontakt, so daß die Funktionsfähigkeit vom Verschleiß beider Körper abhängt, wie es zum Beispiel bei einem Tribosystem „Welle-Gleitlager“ der Fall ist.

4.1.2 Beanspruchungskollektiv

Verschleißerscheinungen werden durch die Einwirkung von Beanspruchungen bedingt. Charakteristische Merkmale einer Beanspruchung sind

- die Bewegungsform,

- der zeitliche Bewegungsablauf sowie
- die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter.

Die Bewegungsform kann auf die elementaren Bewegungsformen Gleiten, Rollen, Stoßen und Strömen oder deren Überlagerung zurückgeführt werden. Der zeitliche Ablauf kann kontinuierlich, oszillierend oder intermittierend sein. Die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter eines Verschleißvorgangs sind die

- Relativgeschwindigkeit v ,
- Normalkraft F_N ,
- Beanspruchungsdauer t_B und
- Temperatur T .

Ein Beanspruchungskollektiv setzt sich dabei immer aus mehreren Beanspruchungen zusammen.

Im Falle des Tiefziehens gleitet das Blech auf dem Werkzeug. Die Oberflächen sind dabei in der Regel durch einen Schmierstoffilm, der aus Korrosionsschutzgründen meist im Walzwerk aufgetragen wird, teilweise oder ganz voneinander getrennt. Die Gleitgeschwindigkeit im Ziehteilflansch zwischen Blech und Matrize beziehungsweise Niederhalter variiert zwar in Abhängigkeit von Ort und Ziehtiefe, soll hier aber als konstant angenommen werden. Die Gleitgeschwindigkeit zwischen Blech und Stempel soll hier vernachlässigt werden, da in diesem Bereich nur sehr kleine Bewegungen während der Streckziehphase auftreten.

Die Normalkräfte beziehungsweise Normalspannungen, die beide Oberflächen aufeinander pressen, variieren sehr stark und müssen daher genauer betrachtet werden. Bild 16 zeigt die Reibungszonen, die an einem Tiefziehwerkzeug unterschieden werden. Reibung und somit Normalspannungen treten im Flansch des Ziehtteils zwischen dem Blech und der Matrize sowie zwischen dem Blech und dem Niederhalter auf. In diesem Bereich liegen vergleichsweise geringe Kontaktspannungen vor, die nur lokal begrenzt Werte von $p_N = 5 - 10 \text{ MPa}$ überschreiten. Im Bereich der Stempelkantenrundung treten deutlich höhere Kontaktspannungen auf. Da hier nur geringe Relativbewegungen zwischen Blech und Werkzeug auftreten, ist der Verschleiß in diesem Bereich allerdings gering.

Hingegen ist der Bereich der Matrizenrundung, wo das Blech vom Flansch in die Zarge fließt, nicht nur großen Relativbewegungen, sondern auch hohen Flächenpressungen ausgesetzt. Beide Faktoren sind für den hohen Verschleiß verantwortlich, der an den Ziehkanten von Tiefziehwerkzeugen auftritt.

Die Beanspruchungsdauer wird beim Tiefziehen durch die Ziehtiefe bestimmt, das heißt durch den Weg, den das Blech beim Fertigen eines Teils über dem Matrizenradius zurücklegt.

Die Temperatur spielt beim Tiefziehen eine untergeordnete Rolle, da der Prozeß bei Raumtemperatur abläuft und eine Werkzeugtemperatur von mehr als $T = 50\text{ °C}$ selten überschritten wird.

4.1.3 Verschleißerscheinungsformen

Die auftretenden Verschleißerscheinungen sind abhängig vom wirkenden Verschleißmechanismus. Tabelle 1 zeigt den Zusammenhang zwischen der Verschleißerscheinung und den Haupt-Verschleißmechanismen.

- **Adhäsion** entsteht durch Mikroverschweißung d.h. durch die Erzeugung atomarer Bindungen zwischen einzelnen Rauheitsspitzen infolge hoher lokaler Pressungen. Hierbei kann sowohl eine Materialanlagerung als auch ein Materialabtrag am Grundkörper erfolgen. Dieser Verschleißmechanismus ist maßgebend für den Verschleiß von Werkzeugen, die aus metallischen Werkstoffen gefertigt werden. Es kommt hierbei durch Verschweißungen von Rauheitsspitzen des Blechs mit dem Werkzeug zu starker Riefenbildung insbesondere an der Ziehkante und am Ziehteil. Die Werkzeuge müssen regelmäßig poliert werden, um fehlerfreie Teile fertigen zu können. Besonders stark ist der Effekt der Kaltaufschweißungen bei Aluminium- und Titanwerkstoffen, die eine hohe Affinität zu Stahlwerkstoffen aufweisen [Girs97, Stor96, Wate74]. Bei der Verarbeitung dieser Werkstoffe kann daher ein stark erhöhter Schmiermitteleinsatz erforderlich werden. Neben Schmiermitteln kommen jedoch auch Werkzeugbeschichtungen zum Einsatz, welche die Tendenz zu Kaltaufschweißungen verringern [Kell93, Schm86].
- Die Ritzung und Mikrozerspanung des Grundkörpers, bedingt durch einen härteren und rauheren Gegenkörper oder harte Partikel im Zwischenstoff, wird als **Abrasion** bezeichnet. Dies ist für Kunststoffwerkzeuge der Hauptversagensmechanismus, da die Rauheitsspitzen des harten Blechs in das weichere Kunststoffmaterial eindringen und den Werkstoff somit abtragen können.
- Die **Oberflächenzerrüttung** durch wechselnde mechanische Beanspruchung ist gekennzeichnet durch Ermüdung, Rißbildung, Rißwachstum und Abtrennen von Werkstoffpartikeln. Dieser Verschleißmechanismus ist hauptsächlich bei der Wälzbeanspruchung in den Oberflächenbereichen von Grund- und Gegenkörper wirksam. Typische Erscheinungsform dieses Mechanismus ist die Grübchenbildung (pitting).

- Als **tribochemische Reaktion** werden chemische Reaktionen bezeichnet, die durch dissipierte Reibungsenergie aktiviert werden. Die entstehenden Reaktionsprodukte bilden Bereiche, die mechanische Spannungen häufig nur begrenzt abbauen können und beim Erreichen eines kritischen Zustandes spröde ausbrechen [Iliu97].

Im Bereich des Tiefziehens mit Kunststoffwerkzeugen werden keine Kaltaufschweißungen beobachtet. Statt dessen tritt die Abrasion als überwiegender Verschleißmechanismus in Erscheinung [Eiss81].

Der Grund für dieses Verschleißverhalten liegt in der molekularen Struktur der Kunststoffe. Während Metalle als Kristallgitterstrukturen vorliegen, die ihren Zusammenhalt durch ionische oder metallische Bindungen erhalten, bestehen Kunststoffe aus kettenförmigen Makromolekülen. Die Kohlenstoffketten, die das „Rückgrat“ der Kunststoffe bilden, werden durch Valenzbindungen zusammengehalten [Mich92]. Der Zusammenhalt des Werkstoffs in sich wird einerseits durch Van-der-Waalssche Bindungen und andererseits (bei Elastomeren und Duroplasten) durch eine räumliche Vernetzung der Kettenmoleküle gewährleistet. Die grundsätzlich verschiedenen molekularen Bindungstypen, die beim Tiefziehen mit Kunststoffwerkzeugen im Blech (metallische Bindungen) und im Werkzeug (inerte Valenz- und Van-der-Waalssche Bindungen) vorliegen, verhindern somit Kaltaufschweißungen. Dahingegen kann die rauhe und harte Oberfläche des Blechs die weichere Oberfläche des Kunststoffwerkzeugs abtragen. Außerdem können tribochemische Reaktionen zwischen organischen Schmiermitteln und nicht ölbeständigen Kunststoffen ablaufen, welche die Werkzeugoberfläche langfristig schädigen.

4.2 Verschleiß beim Tiefziehen

Verschleiß beim Tiefziehen wird in Bereichen beobachtet, in denen Relativbewegungen zwischen Blechhalbzeug und Werkzeug auftreten. Am stärksten werden die Kontaktbereiche zwischen Ziehring und Blech und zwischen Blech und Niederhalter beansprucht. Im Bereich der Matrizenradien treten besonders hohe Druck- und Scherbeanspruchungen auf, die unweigerlich zu Verschleißerscheinungen führen (siehe Abschnitt 4.1.2). Die Folge sind Formabweichungen oder Oberflächenbeschädigungen der Ziehteile, die Qualitätseinbußen für das Produkt zur Folge haben.

Das Ziel von Verschleißprüfverfahren ist es, die Reibungs- und Verschleißverhältnisse in den beanspruchten Zonen nachzubilden, um für die Praxis verwertbare Ergebnisse zu erhalten. Stift-Scheibe-Anordnungen [Iliu97], die vielfach zur Beurteilung des Verschleißverhaltens von Kunststoffen herangezogen werden, lassen eine Übertragung der Ergebnisse auf das Tiefziehen nur bedingt zu, da es sich hierbei um ein geschlossenes Tribosystem

handelt, bei dem

- sich die Oberfläche des Gegenkörpers (übertragen auf das Tiefziehen: das Blech) einglättet oder
- sich die Oberflächenrauheiten des Gegenkörpers mit abgetragenem Kunststoff zusetzen können.

Im nächsten Abschnitt werden daher zwei Prüfverfahren vorgestellt, die das tribologische System an der Ziehkante von Tiefziehwerkzeugen als offenes Tribosystem nachbilden.

4.3 Prüfverfahren für Beanspruchungen beim Tiefziehen

Bild 17 zeigt drei beim Tiefziehprozeß auftretende Beanspruchungsarten [Blüm79]. Die Tiefziehbeanspruchung in der Ecke des dargestellten Teils stellt dabei den komplexesten Beanspruchungsfall dar. Neben einem einachsigen Dehnungszustand im Zargenbereich ergeben sich in den Umformzonen mehrachsige Spannungszustände. Im Flanschbereich treten radiale Zugspannungen und tangentielle Druckspannungen auf, denen im Bereich des Ziehringradius eine Biegebeanspruchung überlagert wird. Die bekannten Modellversuche zur Nachbildung dieser Beanspruchung basieren auf dem Streifenziehen. Beim Streifenziehen modellhafter Prüfkörper wird ein Blechstreifen einer einachsigen Zugbeanspruchung ausgesetzt, der beim Streifenziehen mit Umlenkung eine Biegebeanspruchung überlagert ist.

4.3.1 Verschleißprüfstand von WOSKA

Zur Untersuchung des Verschleißverhaltens von Ziehkanten, die mit unterschiedlichen Beschichtungen versehen sind, wurde von WOSKA ein Verschleißprüfstand entwickelt [Wosk82]. Das Prinzip dieses Prüfstandes zeigt Bild 18. Bei dem dargestellten Verfahren wird ein Blechstreifen intermittierend über eine Ziehkante gezogen und dabei um 90° umgelenkt. Hierbei wird ständig Blech vom Coil, das eine bekannte Oberfläche sowie bekannte mechanische Eigenschaften aufweist, über die Probe gezogen. Die Belastung der Ziehkante wird durch einen Niederhalter aufgebracht. Die Kraft F_Z , mit welcher der Streifen über die Kante gezogen wird, kann somit über die Niederhalterkraft F_N eingestellt werden. Nachteilig ist dabei, daß Schwankungen des Reibwerts zu Schwankungen der Ziehkraft führen, da sich die Gegenhalterkraft bei diesem Prinzip proportional zum Reibwert μ verhält. Darüber hinaus kommt es unter dem Niederhalter, bedingt durch die notwendige hohe Flächenpressung, zu einer Einglättung des Blechs. Somit ist die Oberflächenrauheit an der Ziehkante nicht mehr mit der des unverformten Blechs identisch.

Verschleißmeßgröße war bei den Untersuchungen, die mit diesem Prüfstand durchgeführt wurden, die Oberflächenrauheit des Blechs in Abhängigkeit von der Anzahl der Prüfzyklen. Die Oberflächenbeschädigung der Probenkörper aus metallischen Werkstoffen durch Kaltaufschweißungen führte im Laufe der Untersuchungen zu einer Riefenbildung auf der Blechoberfläche, deren Rauheit somit anstieg. Da Kunststoffe keinerlei Neigung zu Kaltaufschweißungen aufweisen und nicht durch abrasiven Verschleiß geschädigt werden, der eine meßbare Änderung der Blechoberfläche hervorruft, kann ein derartiges Verschleißkriterium in diesem Falle nicht angewendet werden.

4.4 Prinzip des Verschleißprüfstands

Das in Abschnitt 4.3.1 vorgestellte Prüfverfahren für Beanspruchungen beim Tiefziehen erfüllt nur zum Teil die Anforderungen an einen Prüfstand für Verschleißuntersuchungen an Kunststoffziehkanten. Deshalb wurde am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen ein Verschleißprüfstand entwickelt, bei dem an einem modellhaften Prüfkörper die Beanspruchungen am Matrizenradius nachgebildet werden [Schu97]. Folgende Zielsetzungen wurden dabei berücksichtigt:

- Auslegung als Streifenziehanlage mit Umlenkung bei einem Umschlingungswinkel des Prüfkörpers durch den Blechstreifen von 90° .
- Intermittierende Relativbewegung zwischen Prüfkörper und Blechstreifen mit einstellbarem Hub.
- Vermeidung praxisunüblicher Niederhalterpressungen.
- Der Radius der Prüfkörper soll den praxisüblichen Ziehkantenradien entsprechen.
- Die Blechoberfläche soll vor dem Kontakt mit dem Prüfkörper nicht eingeglättet werden.
- Praxisübliche Flächenpressungen an der Ziehkante des Prüfkörpers.

4.4.1 Aufbau des Prüfstands

Den Aufbau und die Funktionsweise des Prüfstands zeigt Bild 19. Der Vorschub des Blechstreifens erfolgt durch zwei linear geführte Schlitten, die das Blech während des Ziehvorgangs festklemmen. Die Klemmkraft wird durch Hydraulikzylinder aufgebracht, durch Keilführungen in den Klemmschlitten verstärkt und auf das Blech übertragen. Die Einglättung der Blechoberfläche während des Klemmens ist minimal.

Der Zugschlitten ist über einen Dehnstab mit dem Pleuel eines Kurbeltriebs verbunden,

dessen Hub in diskreten Schritten einstellbar ist. Der Dehnstab ist zur Kraftmessung mit Dehnungsmeßstreifen versehen. Angetrieben wird der Kurbeltrieb durch einen Drehstrommotor mit einem nachgeschalteten Zahnradgetriebe. Die Drehzahl des Motors läßt sich durch einen Frequenzumrichter stufenlos einstellen. Bei konstanter Antriebsdrehzahl ergibt sich für den Zugklemmschlitten ein sinusförmiger Weg-Zeit-Verlauf. Die Hydraulikzylinder klemmen im oberen Totpunkt des Kurbeltriebs, um den Blechstreifen beim Abwärtshub des Zugschlittens über die Probe zu ziehen. Im unteren Totpunkt wird die Klemmung gelöst, so daß sich beide Schlitten relativ zum Blech bewegen können.

Um am Probenkörper eine Flächenpressung zu erzeugen, muß eine Gegenkraft aufgebracht werden. Dies erfolgt durch einen weiteren Hydraulikzylinder, der durch einen Dehnstab mit dem Gegenhalteschlitten verbunden ist. Wird der Gegenhalteschlitten durch das Blech in Vorschubrichtung gezogen, verdrängt der Kolben einerseits Öl gegen den Vordruck eines Hydro-Speichers und saugt andererseits Öl ungedrosselt aus einem Ausgleichsbehälter an. Der Vordruck im Hydro-Speicher wird durch eine mit Stickstoff gefüllte Blase erzeugt. Die Kompression der Blase durch das verdrängte Öl ist durch das hohe Speichervolumen nur mit einem geringen Druckanstieg verbunden, so daß die Gegenhaltekraft praktisch konstant ist. Im unteren Totpunkt des Kurbeltriebs wird die Klemmung gelöst. Der Gegenhalteschlitten wird durch den Druck im Speicher in die Ausgangsstellung zurückbewegt. Eine Drossel verhindert dabei unerwünscht hohe Beschleunigungen. Bild 20 zeigt den Verschleißprüfstand. Der Einfluß der Klemmung auf die Oberflächenrauheit des Blechs durch den Gegenhalteschlitten ist in Bild 21 dargestellt. Die Einglättung des Blechs ist minimal, so daß davon ausgegangen werden kann, daß während eines jeden Prüfzyklus unverformtes Blech über den Probenkörper gezogen wird.

4.5 Versuchsdurchführung

Die Startparameter wurden so eingestellt, daß sie den realen Bedingungen beim Tiefziehen von Karosserieteilen entsprechen. Bei allen Versuchen wurden gleiche Startparameter eingestellt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

Im Rahmen der Verschleißmessungen wurde die Konturänderung des Probenkörpers ermittelt, dessen Ziehkantenradius zu Beginn jeder Versuchsreihe $R_{Z0} = 5,0$ mm betrug. Am Anfang jeder Versuchsreihe wurde die Gegenhaltekraft F_{SG} so eingestellt, daß die mittlere Anfangsflächenpressung mit $p_{N0} = 30$ MPa an der Ziehkante bei allen Werkstoffen identisch und die Belastung der Ziehkante durch die beiden verschiedenen Blechwerkstoffe vergleichbar waren.

Folgende Meßwerte wurden aufgenommen:

- die plastische Dehnung des Blechs ε_{pl} ,
- die Streifenziehkraft F_{SZ} ,
- die Streifengegenhaltekraft F_{SG} und
- die Kontur der Ziehkante.

Aus der Streifenzieh- und der Streifengegenhaltekraft sowie dem aktuellen Radius der Ziehkante läßt sich die mittlere Flächenpressung p_N an der Ziehkante mit folgender Beziehung berechnen:

$$p_N = \frac{\sqrt{F_{SZ}^2 + F_{SG}^2}}{0,5 R_Z \pi b} \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei ist R_Z der aktuelle Radius der Ziehkante des Probenkörpers und b die Breite des Blechstreifens, der über die Probe gezogen wird.

Als Abbruchkriterium diente die Radienänderung der Ziehkante. Bei einem Ziehkantenradius $R_Z > 10$ mm wurden die Verschleißversuche abgebrochen. Messungen erfolgten jeweils am Anfang jedes Versuchs sowie nach 200, 500, 1.000, 2.000, 3.000, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 30.000, 40.000 und 50.000 Prüfzyklen.

4.5.1 Konturmessung und Verschleißrate

Die Konturmessung erfolgte mit Hilfe einer rechnergesteuerten Portalmeßmaschine. Eine schematische Zeichnung dieser Meßeinrichtung zeigt [Bild 22](#). Die verschleißbedingte Radienänderung der Ziehkante wurde ermittelt, indem ein Kreisbogen an die Ziehkantenkontur angelegt wurde, dessen Radius bei zunehmendem Verschleiß wuchs ([Bild 23](#)). Dieses Meßverfahren entspricht dem Anlegen einer Radienlehre an ein Tiefziehwerkzeug. Die Messungen sind somit einfacher durchzuführen als die bei den anderen dargestellten Verschleißmeßgrößen (Volumenabtrag und Umfangsänderung).

Bei einer Radienerweiterung auf mehr als $R_{Z\text{Ende}} = 10$ mm wurden die Versuche abgebrochen. Versuchsreihen, bei denen dieses Abbruchkriterium nach 50.000 Prüfzyklen nicht erreicht wurde, wurden ebenfalls beendet.

In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, daß die Graphen der Ziehkantenradien über der Anzahl der Prüfzyklen linear verlaufen. Daher ist die Verschleißrate W der Quotient aus der Radienänderung ΔR_Z und der Anzahl der Prüfzyklen n :

$$W = \frac{\Delta R_z}{n} . \quad (\text{Gl. 2})$$

Somit steht ein geringer Wert der Verschleißrate W für eine hohe Verschleißbeständigkeit.

4.5.2 Blechwerkstoffe

Die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten weichen kaltgewalzten Stahlbleche DC01, DC01+ZE und DC04 sowie dem beschichteten Aluminiumwerkstoff AlMg4,5Mn0,4 mit einer 3 μm dicken Trockenschmierstoff-Schicht sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Die Stahlbleche wurden im Anlieferungszustand belassen, so daß ein Korrosionsschutzöl als Schmierstoff vorhanden war. Abweichend hiervon war der Befetzungszustand bei zwei Probenkörpern aus Plattenmaterial, von denen einer nur zu Beginn der Versuche einmal befettet und ein anderer permanent befettet wurde. Zu Beginn des Versuchs wurde die Streifengegenhaltekraft so eingestellt, daß die mittlere Anfangsflächenpressung an der Ziehkante $p_{N0} = 30 \text{ MPa}$ betrug. Die Dehnung wurde während der Versuche konstant gehalten. Die Hubhöhe h und die Hubfrequenz z betragen bei allen Versuchen $h = 55 \text{ mm}$ und $z = 12 \text{ min}^{-1}$.

4.6 Versuchsergebnisse

Im Rahmen der Verschleißuntersuchungen wurden etwa fünfzig marktübliche Kunststoffwerkstoffe untersucht. Neben verschiedenen Kunststoffen, die sich hinsichtlich ihrer Komposition, des bevorzugten Werkzeug-Herstellungsverfahrens und ihres Füllstoffgehalts unterschieden, wurden niedrigschmelzende Legierungen sowie ungehärteter Grauguß und Galvanoschalen untersucht. Die Eigenschaften der untersuchten Werkzeugwerkstoffe sind in Tabelle 3 die Verschleißraten der einzelnen Werkzeugwerkstoffe sind in Tabelle 4 aufgelistet.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen vorgestellt. Die Werkstoffe sind hierbei nach dem Werkzeug-Herstellungsverfahren geordnet. Berücksichtigung finden in dieser Arbeit nur diejenigen Werkstoffe, die einen hohen Verschleißwiderstand aufweisen. In den Diagrammen der folgenden Abschnitte ist der gemessene Ziehkantenradius R_z über der Anzahl der Prüfzyklen aufgetragen. In der Legende sind die Prüfkörper nach ihrem Verschleißwiderstand geordnet.

4.6.1 PUR-Frontguß und PUR-Gel-Coat

Die Ergebnisse, die mit den verschleißbeständigsten der Frontguß- und Gel-Coat-

Prüfkörper erzielt wurden, zeigt Bild 24. Der verwendete Blechwerkstoff war bei allen Versuchsreihen der weiche Tiefziehstahl DC01, der im Anlieferungszustand (beölt mit Korrosionsschutzöl) belassen wurde. Bei der Frontguß-Probe wurde das Verschleißkriterium der Radienänderung von $R_{Z0} = 5 \text{ mm}$ auf $R_{Z\text{Ende}} = 10 \text{ mm}$ nach 24.000 Prüfzyklen erreicht. Bei der Gel-Coat-Probe trat deutlich geringerer Verschleiß auf. Nach 50.000 Prüfzyklen wies die Ziehkante einen Radius von lediglich $R_{Z50.000} = 8,0 \text{ mm}$ auf.

Trotz des geringeren Verschleißwiderstands im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren eignet sich die Frontguß-Technik, wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird, insbesondere für die Herstellung großer Werkzeuge. Da die Werkzeugaktivflächen erst gegossen werden, nachdem der Hinterbau erstarrt ist, hat die Schwindung des Hinterbaumaterials keinen Einfluß auf die Maßgenauigkeit der Werkzeugaktivflächen.

4.6.2 PUR-Plattenmaterialien

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse vorgestellt, die mit zwei verschiedenen Plattenmaterialien erzielt wurden. Polyurethanplatten werden vom Hersteller in Formen gegossen, härten unter Luftabschluß aus und werden anschließend bei ca. 150 °C getempert, um Eigenspannungen, die beim Fräsen der Platten zu Maßabweichungen führen können, abzubauen.

Bei diesen Untersuchungen wurden der Einfluß der Schmierung sowie der Beschichtung des Blechwerkstoffs untersucht. Darüber hinaus wurde untersucht, inwieweit Fugen, wie sie beim Verkleben von Platten entstehen, einen Einfluß auf das Verschleißverhalten haben.

Bild 25 zeigt die Ergebnisse, die mit dem Polyurethan-Plattenmaterial 1 erzielt wurden. Es konnte gezeigt werden, daß der Verschleiß unabhängig vom eingesetzten Blechwerkstoff (DC01 und DC04 unverzinkt) ist, sofern die Ziehkante durch eine identische mittlere Flächenpressungen bei etwa gleicher Rauheit des Blechs belastet wird.

Außerdem wird deutlich, daß Klebefugen keinen negativen Einfluß auf das Verschleißverhalten haben. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, daß der Einsatz von Schmiermitteln mit hoher Viskosität (Wedolit Z1046, 3 g/m^2) zu einer Erhöhung der Standzeit führt. Die Verschleißrate halbierte sich im Vergleich zu dem Versuch, bei dem lediglich mit dem Korrosionsschutzöl Anticorit geschmiert wurde. Es genügt hierbei allerdings nicht, die Probe einfach zu Beginn der Verschleißuntersuchungen einzufetten, da der Werkstoff offensichtlich keine Speicherwirkung hat.

Der Verschleiß an der Ziehkante kann durch den Einsatz elektrolytisch verzinkter Stahl-

bleche (DC01+ZE) im Vergleich zum unverzinkten Material deutlich reduziert werden. Beim Ziehen mit verzinktem Blech kommt es zum Abrieb des Zinks von der Blechoberfläche. Der entstehende feine Zinkstaub wirkt im weiteren Verlauf des Versuchs als Schmiermittel und verringert den Materialabtrag an der Ziehkante. Das Resultat war, daß der Ziehkantenradius auch nach 50.000 Prüfzyklen nur einen Radius von $R_{Z\text{Ende}} = 7$ mm aufwies und die Verschleißrate im Vergleich zum unbeschichteten Blech auf ein Viertel sank.

Bild 26 zeigt den Verschleiß, der an einem weiteren Polyurethan-Plattenmaterial (PUR-Platte 2) gemessen wurde und das ein noch besseres Verschleißverhalten als die PUR-Platte 1 aufweist. Bei diesem Plattenmaterial wurde der Einfluß der Beschichtung des Blechs auf das Verschleißverhalten untersucht. Wiederum konnte gezeigt werden, daß eine elektrolytische Verzinkung des Blechwerkstoffs zu einer deutliche Verschleißminderung führt ($R_{Z\text{Ende}} = 6,9$ mm) und die Verschleißrate auf ein Viertel des Werts, erzielt mit unverzinktem Blech, sinkt. Noch bessere Ergebnisse wurden mit einem Aluminiumblech (AlMg4,5Mn0,4) erzielt, das mit einer 3 µm dicken Schicht aus einem Trockenschmierstoff beschichtet war. Hierbei war der Verschleiß am kleinsten, der Ziehkantenradius betrug am Ende des Versuchs lediglich $R_{Z\text{Ende}} = 5,25$ mm.

Die Ursache für dieses sehr gute Verhalten liegt in der vollständigen Trennung der Werkzeugoberflächen von der Blechoberfläche durch den dazwischen liegenden Trockenschmierstoffilm.

4.6.3 Einfluß der Flächenpressung auf das Verschleißverhalten

Neben dem Blechwerkstoff, der Beschichtung des Blechs und der Schmierung hat auch die Flächenpressung an der Ziehkante Einfluß auf das Verschleißverhalten. Bild 27 zeigt, wie der Verschleiß durch eine Reduktion der mittleren Flächenpressung von $p_N = 30$ MPa auf $p_N = 15$ MPa verringert wird. Bei der Probe aus dem PUR-Plattenmaterial 1 sank die Verschleißrate auf die Hälfte des Werts, der bei der doppelten Flächenpressung gemessen wurde.

4.6.4 Einfluß von Füllstoffen auf das Verschleißverhalten

Kunststoffen werden häufig sogenannte Füllstoffe beigemischt, die einerseits die Schwindung bei der Aushärtung minimieren sollen und andererseits die mechanischen Eigenschaften wie zum Beispiel die Druckfestigkeit und Steifigkeit steigern sollen. Hierbei wird neben Metallspänen auch Quarzsand eingesetzt, der aufgrund seines geringen Korndurchmessers (circa 0,1 mm) vom Kunststoff leicht benetzt werden kann und die Fließei-

genschaften beim Gießen kaum verschlechtert. Ein weiterer Vorteil liegt im geringen Preis von Quarzsand im Vergleich zu Metallspänen.

Bild 28 zeigt, wie die Verschleißbeständigkeit eines für Werkzeughinterbauten genutzten Polyurethans mit zunehmendem Quarzsandgehalt sinkt. Der Füllstoffanteil selbst hat nur einen geringen Einfluß auf den Verschleiß, der schon bei einer Zugabe von nur 33 Gewichtsprozenten Quarzsand erheblich gesteigert wird. Signifikant ist, daß die Verschleißrate bei geringeren Quarzsandbeigaben am Anfang der Verschleißuntersuchungen (bis ca. 200 Prüfzyklen) geringer ist als bei höheren. Erst im weiteren Verlauf der Untersuchungen war die Verschleißrate nahezu unabhängig vom Füllstoffgehalt.

Bild 29 zeigt, weshalb der Verschleiß durch zugemengte Füllstoffpartikel ansteigt. Der Verschleiß wird initiiert, wenn Rauheitsspitzen des Blechs Füllstoffpartikel aus der Matrix herauslösen. Das Korn läßt eine Pore zurück und wandert mit dem Blech über die Werkzeugoberfläche. Dadurch, daß die Füllstoffe eine weit höhere Härte aufweisen als der Kunststoff, beschädigen sie die Oberfläche des Werkzeugs, so daß weitere Füllstoffpartikel in die Nähe der Oberfläche geraten, herausgelöst werden und den Verschleiß beschleunigen.

Eine ähnliche unerwünschte Steigerung des Abtrags konnte [Haas97] bei Gleitelementen aus Kunststoffen feststellen, die jedoch nicht mit Füllstoffen versetzt, sondern durch Glasfasergewebe verstärkt waren. Die Schlußfolgerung seiner Untersuchungen ist, daß nur solche Kunststoffe für hochbeanspruchte Gleitlager verwendet werden sollten, die entweder ungefüllt oder aber mit weichen Füllstoffen - wie zum Beispiel Graphit oder Talkumpulver - versehen sind.

4.6.5 Vergleich von Polyurethanen mit anderen Werkzeugwerkstoffen

Da Kunststoffwerkstoffe gerade im Bereich des Prototypenbaus mit niedrigschmelzenden Legierungen (siehe Abschnitt 3.2.1) konkurrieren, wurden auch diese Werkstoffe untersucht. Darüber hinaus wurden metallische Proben untersucht, deren Oberflächen durch Metallspritzen (siehe Abschnitt 3.3.1) sowie durch galvanisches Abscheiden (siehe Abschnitt 3.3.2) erzeugt wurden.

Bild 30 zeigt die verschleißbeständigsten der untersuchten Kunststoffe im Vergleich zu Proben aus einer Zinn-Wismut-Legierung und einer Feinzinklegierung. Es wird deutlich, daß die untersuchten Kunststoffe ein besseres Verschleißverhalten als niedrigschmelzende Legierungen aufweisen. Die Proben aus der Zinn-Wismut-Legierung erreichten das Verschleißkriterium bereits nach wenigen tausend Prüfzyklen. Proben aus einer Feinzinklegierung wiesen ein ähnliches Verschleißverhalten auf wie die PUR-Frontguß-Proben.

Allerdings mußte der Versuch nach 10.000 Prüfzyklen abgebrochen werden, da die Ziehkante infolge von Kaltaufschweißungen eine starke, irreparable Welligkeit aufwies.

Das Diagramm in Bild 31 zeigt weitere Ergebnisse von Verschleißuntersuchungen, die mit einem Epoxid-Plattenmaterial, einer in der Metallspritztechnik hergestellten Probe sowie einer mit Aluminiumpulver gefüllten Polyurethan-Platte erzielt wurden. Alle Werkstoffe erreichten das Verschleißkriterium bereits nach 5.000 Prüfzyklen, wiesen somit einen unbefriedigenden Verschleißwiderstand auf.

Die Ergebnisse zeigen, daß Polyurethanwerkstoffe im Hinblick auf das Verschleißverhalten allen anderen derzeit im Bereich des Prototypenbaus eingesetzten Werkstoffen (Epoxid-Systeme, niedrigschmelzende Legierungen) sowie der Metallspritztechnik überlegen sind.

4.6.6 Verschleißverhalten von Galvanoschalen

Bild 32 zeigt das Verschleißverhalten von Galvanoschalen in Verbindung mit unverzinktem Stahlblech DC01. Beide Galvanoschalen zeigten unabhängig von der Härte ein besseres Verschleißverhalten als der unlegierte Grauguß GG25, aber auch als die Gel-Coat-Probe. Das Verschleißverhalten der weicheren Sulfamat-Nickel-Legierung (25 HRC) war jedoch geringfügig besser als das der härteren Nickel-Kobalt-Legierung (48 HRC). Somit stellen Galvanoschalen eine sehr verschleißbeständige Alternative zu Stahl- und Gußwerkzeugen dar.

4.7 Berechnungsansatz zur Verschleißermittlung

Auf der Basis der Ergebnisse der Modellversuche wurde ein Ansatz zur Ermittlung des Verschleißes an Tiefziehwerkzeugen entwickelt. Mit Hilfe dieses Berechnungsansatzes ist es möglich, die Radienerweiterung an Tiefziehwerkzeugen in Abhängigkeit von primären Einflußgrößen wie

- dem Werkzeugwerkstoff,
- dem Blechwerkstoff (Oberflächenbeschichtung)
- der Flächenpressung sowie
- dem vom Blech auf dem Werkzeug zurückgelegten Weg

zu berechnen. Sekundäre Einflußgrößen wie die Relativgeschwindigkeit, die Temperatur oder der Beölungszustand wurden im Rahmen der Modellversuche so gewählt, daß sie den Werten entsprechen, wie sie in der Praxis im Tiefziehprozeß auftreten. Aus diesem

Grund sollen diese Größen nicht in das hier vorgestellte Berechnungsmodell eingehen.

Die Ergebnisse, die in Tabelle 4 aufgelistet sind, zeigen, daß bei Kunststoffen keine Korrelation zwischen der Härte des Materials und dem Verschleißwiderstand besteht, wie dies zum Beispiel bei Stählen der Fall ist [Khas99]. So ist die Verschleißrate beim PUR-Plattenmaterial 2, das eine Shore-D-Härte von 90 hat, höher als die des Gel-Coat-Materials. Somit ist die Verschleißrate für jedes Material einzeln zu ermitteln. Es konnte jedoch gezeigt werden, daß die Verschleißrate proportional zur Flächenpressung ist. Eine Verdoppelung der Flächenpressung führt zu einer Verdoppelung der Verschleißrate. Aus den Ergebnissen der Verschleißversuche läßt sich somit folgende Beziehung für die Radienerweiterung ΔR_Z der Ziehkante von Tiefziehwerkzeugen aufstellen:

$$\Delta R_Z (\text{Werkstoff, Blech, } h, r_M, p_{N0}, n) = W \times \frac{h}{55 \text{ mm}} \times \frac{p_{N0} \times r_M}{30 \text{ MPa} \times 5 \text{ mm}} \times n. \quad (\text{Gl. 3})$$

Dabei ist ΔR_Z die Radienerweiterung an einem Tiefziehwerkzeug nach n gezogenen Teilen, bei dem die mittlere Anfangsflächenpressung p_{N0} an der Ziehkante mit einem Ziehringradius r_M auftritt und sich das Blech relativ zur Ziehkante um den Weg h bewegt. Die Werte in dieser Gleichung (Weg von 55 mm, Flächenpressung von 30 MPa und Ausgangsziehkantenradius 5 mm) entsprechen dabei den Werten, die bei den Modellversuchen mit dem Verschleißprüfstand als Startparameter eingestellt wurden.

Soll verzinktes an Stellen von unbeschichtetem Blech umgeformt werden, so ergibt sich eine Verringerung der Radienvergrößerung um den Faktor 4:

$$\Delta R_Z (\text{verzinkt}) = \frac{1}{4} \times \Delta R_Z (\text{unbeschichtet}). \quad (\text{Gl. 4})$$

Eine weitere Reduktion des Verschleißes ergibt sich, wenn organisch beschichtetes Blech (zum Beispiel Trockenschmierstoff-beschichtetes Aluminiumblech) umgeformt wird. In diesem Fall beträgt die Radienvergrößerung durch die vollständige Trennung der Rauheitsspitzen des Blechs von der Werkzeugoberfläche nur noch

$$\Delta R_Z (\text{organisch beschichtet}) = \frac{1}{35} \times \Delta R_Z (\text{unbeschichtet}). \quad (\text{Gl. 5})$$

4.8 Experimenteller Abgleich des Ansatzes zur Verschleißberechnung

Der experimentelle Abgleich des Berechnungsansatzes für die Verschleißberechnung (Gl. 3) erfolgte anhand des Tiefziehens rotationssymmetrischer Näpfe mit dem Durchmesser $d_0 = 50$ mm, der Höhe $h = 35$ mm, dem Ziehverhältnis $\beta_0 = 2,1$ und einem Anfangsziehringradius $r_M = 5$ mm aus dem weichen kaltgewalzen Tiefziehstahl DC04 mit der

Blechdicke $s_0 = 0,8$ mm. Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode wurde für diese Versuchsbedingungen eine mittlere Flächenpressung von $p_N = 50$ MPa am Ziehkantenradius der Ziehringe errechnet. Um den Versuchsaufwand zu begrenzen, wurden als Werkzeugwerkstoffe drei Materialien gewählt, die einen geringen Verschleißwiderstand und somit hohe Verschleißraten aufweisen (Bild 33):

- PUR Hinterfüllung mit 66 % Quarzsandgehalt; $W = 6,0 \times 10^{-3}$ mm/Prüfzyklus.
- niedrigschmelzende Sn-Bi-Legierung; $W = 1,7 \times 10^{-3}$ mm/Prüfzyklus.
- PUR-Plattenmaterial Aluminium-gefüllt; $W = 9,9 \times 10^{-4}$ mm/Prüfzyklus.

Nach Gleichung 3 ergibt sich für den Verschleiß an den Ziehkanten der drei Versuchsziehlinge folgende Beziehung:

$$\Delta R_Z (\text{Werkzeugwerkstoff}, n) = W (\text{Werkzeugwerkstoff}) \times 0,64 \times 1,67 \times n. \quad (\text{Gl. 6})$$

Bild 34 zeigt die berechneten und gemessenen Ziehringradien r_M der drei Versuchsziehlinge über der Anzahl gezogener Teile n . Die aktuellen Ziehringradien wurden dabei nach dem Tiefziehen von jeweils 100 Näpfen mit der in Bild 22 gezeigten Portalmeßmaschine vermessen. Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte nachgewiesen werden. Lediglich bei der Versuchsmatrize aus dem Quarzsandgefüllten Hinterbaumaterial tritt eine deutlich Abweichung der berechneten und gemessenen Werte nach 100 gezogenen Teilen auf. Grund hierfür ist das nicht-lineare Verschleißverhalten dieses Materials. In Bild 28 wurde bereits gezeigt, daß die Verschleißrate des Quarzsandgefüllten Materials erst relativ gering ist (bis etwa 200 Prüfzyklen), um dann stark anzusteigen.

4.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen zeigen, daß es mit den heute erhältlichen Kunststoffwerkstoffen möglich ist, Tiefziehwerkzeuge für kleine und mittlere Serien zu fertigen. Durch den Einsatz geeigneter Kunststoffe können bis zu 50.000 Teile bei geringem Verschleiß gezogen werden. Dabei bietet es sich an, vorzugsweise beschichtete Bleche umzuformen, da eine Oberflächenveredelung eine geringe tribologische Beanspruchung des Werkzeugs verursacht und zu äußerst geringem Verschleiß führt. Die Kombination eines Polyurethan-Plattenmaterials mit Trockenschmierstoff-beschichtetem Aluminiumfeinblech führte zum geringsten Verschleiß.

Der Verschleißwiderstand der untersuchten Kunststoffe übertraf außerdem den der niedrigschmelzenden Legierungen, die im Bereich des Prototypenbaus mit Kunststoffen kon-

kurrieren. Der Grund liegt in der Tatsache, daß beim Einsatz von Kunststoffen keine Kaltaufschweißungen auftreten, die bei Metallwerkzeugen zu starker Riefenbildung auf dem Ziehteil führen und ein regelmäßiges Polieren der Werkzeugaktivflächen erfordern.

Es ist bei Kunststoffwerkzeugen zu beachten, daß die Verschleißrate proportional mit der mittleren Flächenpressung ansteigt. Aus diesem Grund sollten Ziehradien nicht kleiner als die dreifache Blechdicke gewählt werden.

Für die Umformung kleiner und mittlerer Serien aus höherfesten sowie unbeschichteten Blechen, die keine Oberflächenveredlung aufweisen, sollten hingegen Galvanoschalen eingesetzt werden. Die Herstellung von Galvanoschalen erfordert zwar die Herstellung einer verlorenen Negativform, jedoch wiesen die Galvanoschalen in Verbindung mit unbeschichteten Blechen ein deutlich besseres Verschleißverhalten als die untersuchte Graugußprobe (GG25) auf.

Darüber hinaus können die Ergebnisse aus den Versuchen mit dem Verschleißprüfstand durch einen Berechnungsansatz auf reale Tiefziehwerkzeuge übertragen werden. Somit kann der Verschleiß an den Ziehkanten von Tiefziehwerkzeugen in Abhängigkeit von der Anzahl der zu fertigenden Teile und der dabei auftretenden Belastungen berechnet werden.

5 Untersuchung des Reibverhaltens von Kunststoffen

Die Reibung stellt beim Tiefziehen ein kritisches Phänomen dar, da Halbzeuge mit großer Oberfläche, geringer Dicke und somit geringem Volumen umgeformt werden. Die beträchtlichen Bewegungen des Blechs relativ zum Werkzeug führen dazu, daß insbesondere beim Umformen großflächiger Teile die Reibkräfte, die überwunden werden müssen, höher sind als die Kräfte, die zur Plastifizierung und Umformung des Metalls erforderlich sind [Doeg71]. Hohe Reibung führt zu einer starken Belastung des Werkstücks, dessen Folge Oberflächenschäden oder Reißen sein können.

Um die Reibung beim Tiefziehen zu reduzieren, wird eine Vielzahl von Ansätzen verfolgt:

- **Flüssige Schmierstoffe** werden meistens bereits im Walzwerk auf die Bleche aufgetragen und haben neben der Reibungsminderung auch die Aufgabe des Korrosionsschutzes beim Transport und der Lagerung der Bleche. Zusätzlich zu den Korrosionsschutzölen werden vor der Verarbeitung häufig spezielle Schmieröle auf die Bleche aufgetragen. Gleichmäßig aufgetragen reduzieren sie die Reibung insgesamt, lokal aufgetragen minimieren sie die Reibung in kritischen Ziehteilbereichen [Müns98]. Da die Schmiermittel im Anschluß an die Umformung beziehungsweise vor einer nachfolgenden Lackierung zum Beispiel mit alkalischer Lauge abgewaschen werden müssen, sollten Schmiermittel sparsam eingesetzt werden. Übliche Schmiermittelmengen liegen in der Praxis zwischen zwei und fünf μm Dicke beziehungsweise g/m^2 [Wohn93]. Bei schwierigen Umformoperationen werden jedoch lokal oft höhere Schmiermittelmengen aufgetragen.
- Der Einsatz von **festen Schmierstoffen** reduziert die Reibung beim Tiefziehen erheblich. Feste Schmierstoffe wie Polyethylen-Ziehfolien, die allerdings nur bei schwer umformbaren Werkstoffen wie Edelstahl- Aluminium- oder Titanblechen zum Einsatz kommen [Wate74], verhindern den direkten Kontakt von Werkzeug und Blech und somit Kaltaufschweißungen. Dadurch wird die Reibung auf ein Minimum reduziert.
- **Texturierte Blechoberflächen** werden durch strukturierte Dressierwalzen erzeugt. Der Vorteil im Vergleich zu Feinblechen, die mit geschliffenen Walzen dressiert wurden, liegt in der Tatsache begründet, daß die Blechoberfläche eine Vielzahl abgeschlossener Schmierstofftaschen aufweist, welche die Reibwerte deutlich senken [Zimn98]. Darüber hinaus sinkt insbesondere bei texturierten Aluminiumblechen die Neigung zu Kaltaufschweißungen erheblich [Oste94].

- **Elektrolytisch verzinkte Stahlbleche** weisen durch die meist etwa 7,5 µm dicke Zinkschicht ein sehr günstiges Korrosionsverhalten auf. Über den Korrosionsschutz hinaus führt die Zinkschicht zu reduzierten Reibwerten bei der Umformung [Braz85, Simc94].
- **Organische Blechbeschichtungen** werden im Walzwerk aufgetragen und dienen einerseits dem Korrosionsschutz und sollen andererseits die Umformeigenschaften der Bleche verbessern. Durch eine Beschichtung mit Trockenschmierstoffen kann auf eine Beölung ganz verzichtet werden [Oste94], wohingegen Zinkstaublackierungen zu einer Erweiterung des Arbeitsbereichs durch bessere Reibeigenschaften führen [Behr98, Bräu98]. Einige der derzeit erhältlichen organischen Beschichtungssysteme für Aluminium- und Stahlbleche wurden bereits im Abschnitt 3.4 detaillierter beschrieben.
- **Werkzeugwerkstoffe und Oberflächenbehandlungen** haben einen starken Einfluß auf die Reibung beim Tiefziehen. Neben unterschiedlichen Kaltarbeitsstählen werden im allgemeinen legierte Graugußwerkstoffe eingesetzt, bei denen der Reibwert stark von der Oberflächen- sowie der Wärmebehandlung abhängt [Haas96]. Darüber hinaus werden in Sonderfällen spezielle Bronzelegierungen eingesetzt. Derzeit werden Keramiken entwickelt, die ebenfalls zu einer Senkung von Reibwerten führen [Doeg97].
- **Inerte Werkzeugbeschichtungen**, die beispielsweise im PVD- oder CVD-Verfahren in geringen Schichtdicken von wenigen µm auf Werkzeugaktivflächen aufgedampft werden, führen ebenfalls zu reduzierten Reibwerten und reduziertem Verschleiß. Die Hartstoffbeschichtung ist jedoch aufwendig und entsprechend teuer, so daß dieses Verfahren in der Regel nur bei hochbelasteten Werkzeugen angewendet wird [Kell93].

Im Rahmen dieser Arbeit sollten die Einflüsse von verschiedenen Kunststoffen im Vergleich zum Kaltarbeitsstahl 1.2379 und den niedrigschmelzenden Legierungen auf den Reibwert μ untersucht werden. Hierbei wurden die aufgetragene Schmiermittelmenge und die Beschichtung des Blechs variiert.

5.1 Verfahren zur Ermittlung von Reibwerten

Um Reibwerte so genau wie möglich ermitteln zu können, muß das Prüfverfahren dem Tiefziehprozeß geometrisch möglichst ähnlich sein. [Bild 16](#) zeigt unterschiedliche Reibungszonen beim Tiefziehen. Von besonderer Bedeutung sind die beiden Reibungszonen, in denen die größten Relativbewegungen auftreten:

- Der Kontaktbereich im Flansch zwischen Blech und Niederhalter beziehungsweise Matrize sowie
- der Bereich an der Ziehringrundung mit Kontakt von Blech und Ziehkante.

Zwei Prüfverfahren haben sich als besonders geeignet für jeweils eine der beiden Reibungszonen herausgestellt. Im Streifenziehversuch ohne Umlenkung wird ein Blechstreifen zwischen zwei Reibbacken hindurch gezogen, die mit einer definierten Kraft gegeneinander gepreßt werden. Dies entspricht den Reibungsverhältnissen, wie sie im Flanschbereich unter dem Niederhalter auftreten. Der Reibwert μ aus diesem Versuch ist der Quotient aus der Ziehkraft F_Z und der Anpreßkraft F_N .

$$\mu = \frac{F_Z}{F_N} . \quad (\text{Gl. 7})$$

Nachteilig bei diesem Verfahren ist, daß nur geringe Flächenpressungen erreicht werden können. Da aber gerade im Bereich der Ziehkantenrundung von Tiefziehwerkzeugen hohe Flächenpressungen auftreten, wurde von WITTHÜSER [Witt80] der Streifenziehversuch mit Umlenkung entwickelt, der im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

5.1.1 Streifenziehversuch mit Umlenkung

Bild 35 zeigt den Streifenziehversuch mit Umlenkung von WITTHÜSER, der die Reibungsverhältnisse an der Ziehkante von Tiefziehwerkzeugen nachbildet [Witt80]. Bei diesem Versuch wird ein Blechstreifen über einen zylindrischen Probenkörper aus dem zu untersuchenden Werkzeugwerkstoff gezogen und dabei um 90° umgelenkt. Durch zwei Hydraulikzylinder wird dabei an einem der Enden des Blechs eine konstante Gegenhaltekraft F_{SG} und am anderen Ende eine Ziehkraft F_{SZ} aufgebracht, durch die der Blechstreifen mit einer konstanten Geschwindigkeit v_Z über den Probenkörper gezogen wird. Beide Kräfte werden während des Versuchs kontinuierlich gemessen. Aus den Kräften kann in Analogie zu den Verschleißuntersuchungen die mittlere Flächenpressung p_N an der Probe mit dem Radius R gemessen werden, über die ein Blechstreifen der Breite b gezogen wird:

$$p_N = \frac{\sqrt{F_{SZ}^2 + F_{SG}^2}}{0,5 R \pi b} . \quad (\text{Gl. 8})$$

Der Streifenziehversuch läßt sich in zwei Teile gliedern. Während der ersten Phase ist der zylindrische Probenkörper frei drehbar, so daß keine Relativbewegung zwischen Blech und Probenkörper auftritt. Die Differenz zwischen der Zieh- und der Gegenhaltekraft entspricht während dieser Phase der Kraft F_U , die notwendig ist, um den Blechstreifen während der Umlenkung zweifach zu biegen:

$$F_U = F_{SZI} - F_{SGI} . \quad (\text{Gl. 9})$$

In der zweiten Phase des Versuchs wird der Probenkörper arretiert. Während dieser Phase entspricht die Differenz zwischen Zieh- und Gegenhaltekraft der Umformkraft F_U sowie

der Reibkraft F_{SR} , die zwischen Blech und Probenkörper wirkt:

$$F_{SR} = F_{SZf} - F_U - F_{SGf} . \quad (\text{Gl. 10})$$

Da die Umformkraft aus der Versuchsphase mit drehbar gelagertem Probenkörper bekannt ist, ist auch die Reibkraft bekannt. Anschließend läßt sich der Reibkoeffizient μ anhand der Eytelweinschen Seilreibungsformel für biegeschlaife Seile berechnen:

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_{SZf} - F_U}{F_{SGf}} . \quad (\text{Gl. 11})$$

Mit Hilfe des Streifenziehversuchs mit Umlenkung wurden die Reibwerte von unterschiedlichen Kombinationen von Werkzeugwerkstoffen, Blechwerkstoffen und -beschichtungen sowie Schmiermittelmengen ermittelt.

5.2 Reibwerte der unterschiedlichen Kunststoffwerkstoffe

Zunächst wurde der Einfluß der unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffe auf den Reibwert von unbeschichteten Aluminium- und Stahlblechen untersucht. Dabei kamen die verschleißbeständigsten der untersuchten Kunststoffe, Aluminium- und Quarzsand-gefüllte PUR-Werkstoffe sowie Stahl 1.2379 und eine Feinzinklegierung als Referenz zum Einsatz.

Bei allen Versuchen wurden die Ziehgeschwindigkeit $v_Z = 30 \text{ mm/s}$ sowie die mittlere Flächenpressung $p_N = 20 \text{ MPa}$ konstant gehalten. Bild 36 zeigt Prüfkörper, die aus unterschiedlichen Materialien (Kunststoffe und Metalle) gefertigt wurden.

5.2.1 Reibwerte von Stahlfeinblechen

Die hier beschriebenen tribologischen Untersuchungen wurden mit weichen Tiefziehstahlblechen (DC05, DC05+ZE und DC06) durchgeführt, um den Einfluß der unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffe auf den Reibwert zu ermitteln. Als Schmiermittel wurde das Korrosionsschutzöl Anticorit RP4107 in einer praxisüblichen Menge von 3 g/m^2 aufgetragen.

Bild 37 zeigt, wie sich die Wahl des Werkzeugwerkstoffes auf den Reibwert μ auswirkt. Sowohl mit dem Werkzeugstahl, mit der Feinzinklegierung als auch mit der Galvanoschale wurden höhere Reibwerte ermittelt als mit den PUR-Materialien. Während bei den Tiefziehgüten DC05 und DC06 durch den Einsatz von PUR-Werkstoffen eine Reduktion der Reibung um etwa 15 % erreicht wurde, lag die Reduktion bei dem elektrolytisch verzinkten Stahlblech DC05+ZE nur bei etwa 9 %. Dies ist auf die in Abschnitt 5 erwähnten günstigen Gleiteigenschaften der Zinkschicht zurückzuführen.

In Bild 38 sind Untersuchungen dargestellt, die den Einfluß von Füllstoffen aufzeigen sol-

len. Neben dem ungefüllten PUR-Plattenmaterial 2 sind die Reibwerte dargestellt, die mit Aluminium- beziehungsweise Quarzsand-gefülltem PUR-Material erzielt wurden. Es wird deutlich, daß Aluminium als Füllstoff bei der Umformung von Stahlblechen nur einen geringen Einfluß auf die Reibwerte hat. Hingegen wirkt sich Quarzsand negativ aus. Zum Beispiel tritt eine deutliche Steigerung der Reibwerte von $\mu = 0,15$ auf $\mu = 0,18$ beim weichen Tiefziehstahl DC06 ein.

5.2.2 Reibwertuntersuchungen mit Aluminiumfeinblechen

Bild 39 zeigt die Ergebnisse, die mit Reinaluminium Al99,5 und unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen erzielt wurden. Hierbei wurde die Menge des bei der Aluminiumumformung gängigen Schmiermittels Raziol CLF 180 schrittweise von 0 auf 6 g/qm erhöht. Es wurde gezeigt, daß alle ungefüllten PUR-Werkstoffe ein sehr ähnliches Reibverhalten aufweisen. Die Reibwerte, erzielt mit ungefüllten PUR-Kunststoffen, liegen mit Werten um $\mu = 0,15$ bei trockener Reibung deutlich unter den mit metallischen Werkzeugwerkstoffen erreichten (circa $\mu \approx 0,20$), aber auch unter denen, die mit dem Aluminium-gefüllten PUR-Material gemessen wurden. Bei zunehmender Schmiermittelmenge nehmen die Reibwerte bei allen Werkstoffen ab. Auch die Differenz zwischen den ungefüllten PUR-Werkstoffen und den metallischen beziehungsweise metallgefüllten Werkzeugwerkstoffen nimmt von 30 % auf etwa 12 % ab.

Ähnliche Ergebnisse lieferten die Untersuchungen, die mit den Aluminiumlegierungen AlMg0,4Si1,2 (Bild 40, üblicherweise eingesetzt bei Blechteilen im Sichtbereich) und AlMg4,5Mn0,4 (Bild 41, Einsatz im nicht sichtbaren Bereich, da Fließfiguren auftreten [Girs97]) durchgeführt wurden. Auch bei diesen Versuchen zeigten die PUR-Werkstoffe ein günstigeres Reibverhalten als die metallischen Werkstoffe. Die Ergebnisse zeigen wiederum, daß die Differenz der Reibwerte der ungefüllten Kunststoffen und der metallischen Werkstoffe mit zunehmender Schmiermittelmenge abnimmt. Auch konnte gezeigt werden, daß sich Aluminiumpulver als Füllstoff ungünstig auf die Reibwerte dieser Aluminiumbleche auswirkt.

Zurückzuführen sind die hier dargestellten Ergebnisse auf die molekulare Struktur der PUR-Werkstoffe, die von denen der Metalle grundsätzlich abweicht. Dieser Unterschied führt dazu, daß die adhäsiven Kräfte zwischen Blech und Kunststoff geringer sind als zwischen Blech und einem von der Bindungsstruktur her ähnlich aufgebauten metallischen Werkzeugwerkstoff. Besonders deutlich zeigt sich dieser Unterschied bei trockener Reibung, wo metallische Werkzeugwerkstoffe zu Kaltverschweißungen insbesondere mit Aluminiumblechen neigen. Bild 42 zeigt Blechoberflächen des Aluminiumwerkstoffs

AlMg_{4,5}Mn_{0,4}, die vor und nach einem Streifenziehversuch mit Umlenkung bei trockener Reibung aufgenommen wurden. Die Oberfläche des Blechstreifens, der über einen Stahlprüfkörper gezogen wurde, zeigt deutliche Riefen, die durch Kaltaufschweißungen zwischen Blech und Werkzeug entstanden sind. Die Oberfläche des Blechs, das über eine PUR-Probe gezogen wurde, weist hingegen eine akzeptable Qualität auf.

Somit kann gefolgert werden, daß die untersuchten PUR-Kunststoffe wegen ihres günstigen Reibverhaltens und der Tatsache, daß insbesondere bei der Aluminiumumformung keine Kaltaufschweißungen auftreten können, geeignete Werkzeugwerkstoffe sind. Den Werkstoffen sollten allerdings keine Füllstoffe beigemischt werden, da diese eine Erhöhung der Reibwerte zur Folge haben.

5.3 Reibwerte von oberflächenbeschichteten Feinblechen

Bereits im Abschnitt 4.6.2 konnte gezeigt werden, daß Oberflächenveredelungen wie eine elektrolytische Verzinkung bei Stahlblechen oder eine Trockenschmierstoffbeschichtung bei Aluminiumblechen zu sehr günstigen Verschleißigenschaften bei der Umformung mit Kunststoffwerkzeugen führen. Deshalb wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Reibwerte verschiedener oberflächenveredelter Feinbleche untersucht. Als Werkzeugwerkstoffe kamen bei diesen Untersuchungen lediglich der Kaltarbeitsstahl 1.2379 als Referenzwerkstoff sowie das PUR-Plattenmaterial 2 zum Einsatz, da bereits in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt werden konnte, daß die ungefüllten PUR-Werkstoffe unabhängig von der Herstelltechnik gleiche Reibeigenschaften aufweisen. Der Grundwerkstoff, auf denen die Beschichtung aufgetragen war, wies jeweils ähnliche Eigenschaften auf. Die wichtigsten Kennwerte der untersuchten Materialien sind in Tabelle 5 aufgeführt.

5.3.1 Beschichtete Stahlfeinbleche

Reibwerte von elektrolytisch verzinkten Stahlblechen unterschiedlicher Festigkeitsklassen, die organisch beschichtet werden können, zeigt Bild 43. Bei den dargestellten Untersuchungen wurde die Menge des aufgetragenen Schmiermittels von 0 g/m² bis auf die in der Praxis maximal üblichen 6 g/m² variiert. Aus dem Diagramm wird deutlich, daß die Reibung durch den Einsatz von Kunststoff deutlich gesenkt werden kann. Besonders klar kann man dies bei dem härtesten Stahlblech H340+ZE sowie dem weichen Tiefziehstahl DC05+ZE erkennen. Gerade im Bereich trockener Reibung wurden bei diesen Materialien die Reibwerte um ein Drittel gesenkt. Im Gegensatz dazu wurde bei der isotropen Blechgüte ZStE280i+ZE eine Senkung des Reibwerts durch Kunststoff erst bei den höheren Schmiermittelmengen erreicht.

Die Messung der Zinkschichtdicke zeigte, daß bei H340+ZE und DC05+ZE mit lediglich etwa 7,5 µm eine um 25 % dünnere Schicht vorlag als bei dem isotropen Blechwerkstoff ZStE280i+ZE. Die Zinkschicht, die beim Ziehen von H340+ZE sowie DC05+ZE über den Stahlprüfkörper bei geringen Schmiermittelmengen starkem Abrieb unterlag, wurde beim ZStE280i+ZE weniger stark beeinträchtigt, so daß hier auch mit dem Stahlprüfkörper niedrige Reibwerte erzielt werden konnten.

Nach der Ermittlung von Reibwerten unterschiedlicher elektrolytisch verzinkter Stahlbleche wurden die schweißbaren organischen Lacksysteme untersucht. Bild 44 zeigt die Reibwerte dieser Bleche über der Schmiermittelmenge. Es wird deutlich, daß Kunststoffe keine geeigneten Werkzeugwerkstoffe für die Umformung dieser schweißbaren organischen Lacksysteme sind, da die Reibwerte deutlich über den mit dem Werkzeugstahl erzielten liegen. Betrachtet man den Aufbau der schweißbaren Dünnschichtversiegelung Bonazinc 3000 (Bild 45) so wird deutlich, daß sich die Zinkstaubpartikel in die elastische Kunststoffoberfläche hinein drücken können, was zu einem starken Anstieg der Reibung führt. Bei der schweißbaren KTL-Ersatzlackierung Zincroplex Black sind ebenfalls Partikel in den Lack eingelagert, sie weisen jedoch keine globulare, sondern eine scharfkantige Form auf, was den Effekt des "Festkrallens" der Beschichtung in dem Kunststoff noch deutlicher werden läßt. Allerdings konnte ebenfalls gezeigt werden, daß eine zusätzliche Trockenschmierstoffschicht, aufgetragen auf die Bonazinc 3000 Dünnschichtversiegelung, sowohl beim Werkzeugstahl als auch beim Kunststoff zu einer drastischen Senkung der Reibwerte auf $\mu = 0,12$ führt.

Hingegen ist bei den Beschichtungen, deren Reibverhalten in Bild 46 dargestellt wird (Trockenschmierstoff und Polyesterbeschichtung), wie schon bei den verzinkten und unbeschichteten Blechen eine Reduktion der Reibwerte durch den Einsatz von Kunststoffen zu verzeichnen. Insbesondere bei der sehr glatten Oberfläche der Polyesterbeschichtung konnte eine deutliche Reibungsminderung beim Ziehen über einen Kunststoffprobenkörper erzielt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß Kunststoffe wegen der reduzierten Reibung gegenüber den Werkzeugstählen Vorteile haben. Allerdings müssen organische Beschichtungssysteme, die Metallpartikel enthalten, mit einer Trockenschmierstoffschicht versehen werden.

5.3.2 Beschichtete Aluminiumfeinbleche

Bild 47 zeigt die Reibwerte, die mit unterschiedlichen organisch beschichteten Aluminiumblechen (AlMg4,5Mn0,4) und Werkzeugwerkstoffen ermittelt wurden, über der Menge des

aufgetragenen Schmiermittels. Wiederum konnte der positive Einfluß von Kunststoff auf die Reibwerte gezeigt werden. Insbesondere beim unbeschichteten Aluminium, aber auch bei der sehr glatten KTL-Ersatzlackierung und dem Trockenschmiermittel, konnten die Reibwerte deutlich gesenkt werden. Ähnlich wie bei der Dünnschichtversiegelung Bonazinc 3000 wurden jedoch erhöhte Reibwerte bei der Aluminiumstaublackierung Bonazinc 2004 festgestellt. Auch hier haben die Metallpartikel einen ungünstigen Einfluß auf die Reibung. Dieser Effekt ist allerdings nicht so ausgeprägt wie bei Bonazinc 3000.

Vergleicht man die Reibwerte der einzelnen Beschichtungen auf unterschiedlichen Grundwerkstoffen, so stellt man fest, daß der Blechwerkstoff keinen signifikanten Einfluß auf den Reibwert hat, sondern vielmehr der Reibwert von dem Lacksystem und dem Werkzeugwerkstoff abhängt (Bild 48). Deutliche Unterschiede lassen sich lediglich bei den unbeschichteten Aluminiumblechen im Bereich der trockenen Reibung erkennen. Hier steigen die Reibwerte des AlMg_{4,5}Mn_{0,4} zu deutlich höheren Werten an als bei AlMg_{0,4}Si_{1,2}. Außerdem weist die nichttaushärtbare Legierung eine deutlich stärkere Neigung zu Kaltaufschweißungen auf, die das Umformergebnis negativ beeinflussen.

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß ungefüllte Kunststoffwerkstoffe einen günstigen Einfluß auf die Reibwerte haben. Die mit Kunststoff erzielten Reibwerte lagen jeweils deutlich unter denen, die mit metallischen Werkstoffen erzielt wurden. Beimischungen von Metallpartikeln oder Quarzsand in PUR-Werkstoffe haben hingegen einen Anstieg der Reibwerte auf das Niveau von metallischen Werkstoffen zur Folge.

Die Reduzierung der Reibung fällt bei den elektrolytisch verzinkten Stahlblechen geringer aus als bei den unbeschichteten Blechen, da verzinkte Bleche auch mit metallischen Werkzeugwerkstoffen geringe Reibwerte aufweisen. Kaltaufschweißungen waren bei der Verwendung von Kunststoffen auch bei trockener Reibung nicht zu beobachten, was einen deutlichen Vorteil für die Umformung von Aluminiumblechen bedeutet.

Organisch beschichtete Bleche wiesen in Kombination mit Kunststoffen ein sehr gutes Reibverhalten auf, sofern keine metallischen Partikel in die Lackschicht eingebettet waren. Bei diesen schweißbaren Lackierungen können die Reibwerte jedoch durch das Auftragen eines Trockenschmierstoffs deutlich gesenkt werden.

6 Umformversuche mit Modellwerkzeugen

In Modellversuchen sollte untersucht werden, inwieweit sich der positive Einfluß der Kunststoffwerkzeuge hinsichtlich ihrer Reibeigenschaften auf das Tiefziehen übertragen läßt. Durch die Ermittlung von Grenzziehverhältnissen beziehungsweise durch das Messen maximaler Ziehkräfte sollte untersucht werden, ob sich Prozeßgrenzen durch den Einsatz von Kunststoffen als Werkzeugwerkstoffe erweitern lassen.

Das Näpfchenprüfverfahren zur Ermittlung von Grenzziehverhältnissen liefert einen verfahrensgebundenen Blechkennwert, der sowohl von der Geometrie des Werkzeugs als auch von den tribologischen Bedingungen während des Tiefziehens abhängt. Daher ist das Prüfverfahren für die Beurteilung von Blechwerkstoffen, Werkzeugwerkstoffen und Schmiermitteln gerade dann geeignet, wenn jeweils nur ein Parameter (Werkzeug beziehungsweise Blechwerkstoff) variiert und Vergleiche angestellt werden sollen.

Das Grenzziehverhältnis $\beta_{0\max}$ ist hierbei als das Verhältnis vom Durchmesser der eingelegten Ronde $D_{0\max}$ zum Stempeldurchmesser d_0 definiert, bei dem gerade noch kein Reißer auftritt.

$$\beta_{0\max} = \frac{D_{0\max}}{d_0} . \quad (\text{Gl. 12})$$

Die in dieser Arbeit dargestellten Grenzziehverhältnisse wurden in Anlehnung an das Verfahren von SCHMIDT [Schm29] ermittelt.

6.1 Einfluß des Werkzeugwerkstoffs auf das Tiefziehergebnis

Im Rahmen der Versuche wurden Ziehringe und Niederhalter mit rotationssymmetrischer Geometrie gefertigt ($\varnothing 50$ mm und $\varnothing 100$ mm), um den Einfluß des Werkzeugwerkstoffs auf die Grenzziehverhältnisse verschiedener Stahl- und Aluminiumbleche zu untersuchen. Es wurden dabei zwei unterschiedliche Stempeldurchmesser gewählt, bei denen jeweils die Ziehringradien variiert wurden. [Bild 49](#) zeigt beispielhaft Ziehringe für einen Stempeldurchmesser von $d_0 = 100$ mm.

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
• Stempeldurchmesser	$d_0 = 50$ mm	$d_0 = 100$ mm
• Stempelkantenradius	$r_{St} = 9$ mm	$r_{St} = 12$ mm
• Ziehspalt	$u_Z = 1,4$ mm	$u_Z = 1,4$ mm
• Ziehringrundung	$r_M = 5$ mm und 9 mm	$r_M = 4$ mm, 8 mm und 12 mm

Als Werkzeugwerkstoffe kamen Kunststoffe mit besonders günstigen Verschleißigenschaften zum Einsatz. Bei der Versuchsreihe 1 wurden auch gefüllte Werkzeugwerkstoffe (Aluminiumpulver und Quarzsand) sowie niedrigschmelzende Legierungen untersucht.

Die Matrizen und Niederhalter aus den niedrigschmelzenden Legierungen sowie die aus Kunststoffplatten konnten wie herkömmliche Stahlziehringe spanend gefertigt werden. Für die gegossenen Werkzeugkomponenten wurden Negativformen aus einer Silikongießmasse gefertigt, mit deren Hilfe Werkzeuge gegossen werden konnten, ohne daß die Werkzeugaktivflächen spanend nachbearbeitet werden mußten (siehe auch Bild 33).

Um Werkzeuge mit gestrichener Oberfläche herstellen zu können, wurden auf die Form dünne verschleißfeste Oberflächenschichten aufgetragen, die dann mit einer formsteifen und druckbeständigen Gießmasse aus Quarzsand und Polyurethanharz hinterfüllt wurden. Beim Frontgußverfahren wurden zunächst die Kerne gefertigt. In dem anschließenden Bearbeitungsschritt konnten dann die Oberflächen gegossen werden. Bei allen Gießverfahren wurden die Matrizen durch einen Stahlring armiert, so daß die radialen Zugspannungen im Werkzeug die Ziehringe nicht reißen ließen.

Bei dem Kunststoffziehring und -niederhalter aus dem PUR-Plattenmaterial 2 lagen die maximalen Ziehkräfte bei gleichem Ziehverhältnis durch die geringere Reibung im Flansch und an der Ziehkante unter denen des Stahlwerkzeugs (Bild 50). Darüber hinaus konnte die an der Stempelkante übertragbare Kraft gesteigert werden, was auf die geringere Blechdickenabnahme beim anfänglichen Streckziehen zurückgeführt werden kann.

Bild 51 zeigt die Grenzziehverhältnisse, die mit dem Referenzmaterial, einem Kaltarbeitsstahl 1.2379 sowie unterschiedlichen Kunststoffmatrizen erzielt wurden. Die mit Kunststoffwerkzeugen erzielten Grenzziehverhältnisse liegen dabei immer deutlich höher als die mit dem Stahlwerkzeug erzielten. Die elektrolytisch aufgebrachte Zinkschicht des DC05+ZE, die das Verschleißverhalten von Kunststoffen positiv beeinflusst, wirkt sich auch auf das Reibverhalten positiv aus, so daß hier die höchsten Ziehverhältnisse erreicht wurden. Die Stahlbleche ohne verzinkte Oberfläche zeigten geringere Grenzziehverhältnisse bei kleinerer Blechdicke. Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß mit abnehmender Blechdicke die Reibkräfte im Verhältnis zu den Umformkräften zunehmen, so daß die insgesamt zur Umformung notwendige Kraft im Vergleich zu der von der Zarge übertragbaren Kraft zunimmt und es somit früher zu Bodenreißen kommt [Doeg71].

Da das günstigere Reibverhalten der Kunststoffe für diese signifikante Erweiterung der Prozeßgrenzen verantwortlich ist, fällt die Steigerung gerade bei dem dünnen Stahlblech ($s_0 = 0,6 \text{ mm}$), bei dem die Reibkräfte den größten Einfluß auf das Grenzziehverhältnis haben, am deutlichsten aus. Bei dem verzinkten Material, das ohnehin günstige Reibei-

genschaften aufweist, fällt die Steigerung hingegen geringfügig kleiner aus.

Neben den Untersuchungen mit Stahlblechen wurden Versuche mit Aluminiumblechen durchgeführt (Bild 52). Dabei kamen neben Reinaluminium (Al99,5) eine aushärtbare (AlMg0,4Si1,2) sowie eine nichtaushärtbare Aluminiumlegierung (AlMg4,5Mn0,4) zum Einsatz, die beim Automobilbau im sichtbaren Außen- und im Innenbereich für Strukturbauteile verwendet werden. Bei allen Aluminiumwerkstoffen konnte eine Steigerung der Grenzziehverhältnisse durch die Verwendung von Kunststoffwerkzeugen beobachtet werden. Die größten Steigerungen der Ziehverhältnisse konnten bei der Legierung AlMg4,5Mn0,4 beobachtet werden, so daß gerade bei den hieraus gefertigten Strukturbauteilen die Prozeßgrenzen erweitert werden können. Kaltaufschweißungen, die beim Tiefziehen von Aluminiumblechen mit Stahlwerkzeugen eines der Hauptprobleme darstellen, konnten bei der Umformung mit Kunststoffwerkzeugen nicht beobachtet werden, was einen deutlichen technologischen Vorteil dieser Werkzeuge darstellt.

Nachdem gezeigt wurde, daß Kunststoffe als Werkzeugwerkstoffe bei der Umformung von Feinblechen technologische Vorteile im Hinblick auf das Umformergebnis bringen, sollte durch weitere Untersuchungen der Einfluß von Füllstoffen auf das Umformergebnis betrachtet werden. Bild 53 zeigt Grenzziehverhältnisse, die mit speziell angefertigten Werkzeugen ermittelt wurden: eines aus einem Kaltarbeitsstahl, eines aus einer Aluminiumpulver-gefüllten Polyurethanplatte sowie eines aus einer ungefüllten Polyurethanplatte. Es wird deutlich, daß Aluminiumpulver als Füllstoff zwar zu einer Reduktion der Grenzziehverhältnisse führt, die Werte aber immer etwas höher liegen als beim Tiefziehen mit Stahlwerkzeugen.

Bild 54 zeigt den Einfluß von Quarzsand auf die Grenzziehverhältnisse typischer Tiefziehgüten. Es stellte sich heraus, daß sich Quarzsand ungünstig auf das Grenzziehverhältnis der Bleche auswirkt. Während mit dem ungefüllten PUR-Hinterbaumaterial ähnliche Grenzziehverhältnisse wie mit dem Plattenmaterial erzielt werden konnten, sanken die Werte dieses Materials durch Hinzufügen von 66 Gewichtsprozenten Quarzsand auf die des Kaltarbeitsstahls 1.2379.

Kunststoffe konkurrieren im Bereich des Prototypenbaus mit niedrigschmelzenden Legierungen, aus denen ebenfalls Tiefziehwerkzeuge gefertigt werden. Aus diesem Grunde wurden in die Untersuchungen eine Feinzink- sowie eine Zinn-Wismut-Legierung einbezogen. Bild 55 zeigt, daß mit Kunststoffen höhere Grenzziehverhältnisse realisiert werden können als mit metallischen Werkzeugwerkstoffen. Die niedrigschmelzenden Legierungen ließen hierbei geringfügig kleinerer Grenzziehverhältnisse als der Referenzstahl zu.

Da mit zunehmender Ziehteilgröße die Reibung einen immer größeren Einfluß auf das

Tiefziehergebnis hat, wurde der Stempeldurchmesser in weiteren Tiefziehversuchen von $d_0 = 50$ mm auf $d_0 = 100$ mm vergrößert. Bild 56 zeigt die maximalen Stempelkräfte und minimalen Blechdicken des weichen Tiefziehstahls DC05 über dem Ziehverhältnis. Es konnte gezeigt werden, daß, ausgehend vom Ziehverhältnis $\beta_0 = 1,9$, die Ziehkräfte beim Umformen mit Stahl stärker ansteigen als beim Tiefziehen mit Kunststoff (PUR-Platte 2). Darüber hinaus wurde die Blechdicke beim anfänglichen Streckziehen stärker reduziert, was zu früheren Reißern führte. Die günstigeren Reibwerte des Polyurethans beeinflussen somit das Tiefziehen auch in diesem Falle positiv.

Bild 57 und Bild 58 zeigen, wie sich die reduzierte Reibung der PUR-Materialien auf die Grenzziehverhältnisse auswirken. Insbesondere bei dem dünnen Stahlfeinblech (DC05, $s_0 = 0,6$ mm) und bei den Aluminiumlegierungen konnten deutliche Steigerungen der Ziehverhältnisse erzielt werden. Die Grenzziehverhältnisse, die mit der Gel-Coat- sowie der Frontgußmatrize erzielt wurden, sind dabei unwesentlich geringer als die, welche mit dem Plattenmaterial erzielt wurden, da höhere Niederhalterkräfte erforderlich waren, um die Faltenbildung im Flansch zu unterdrücken. Dies ist erforderlich, da beide Materialien mit einem Elastizitätsmodul von nur etwa $E = 650$ MPa eine hohe Nachgiebigkeit aufweisen.

Daß die Grenzziehverhältnisse insbesondere beim Tiefziehen dünner Bleche ansteigen, wenn die Reibung reduziert wird, läßt sich anhand der Formel für die Ziehkräfte zylindrischer Tiefziehteile nach SIEBEL [Sieb56] verdeutlichen:

$$F_{\text{ges}} = F_{\text{id}} + F_{\text{RN}} + F_{\text{RZ}} + F_{\text{rb}} \quad (\text{Gl. 13})$$

Hiernach setzt sich die gesamte zur Umformung benötigte Kraft F_{ges} aus insgesamt vier Komponenten zusammen:

- Der ideellen Umformkraft F_{id} , die für die Umformung des Flansches durch radiale Zug- und tangentielle Druckspannungen erforderlich ist,
- der Reibkomponente F_{RN} , die notwendig ist, um die Reibung im Bereich des Niederhalters zu überwinden,
- der Komponente F_{RZ} aus der Reibung an der Ziehkante sowie
- der Biegekraft F_{rb} für die doppelte Umbiegung an der Ziehkante.

Die einzelnen Kraftkomponenten lassen sich mit folgenden Formeln berechnen (die einzelnen Herleitungen sind zum Beispiel in [Doeg95] detailliert beschrieben):

Ideelle Umformkraft:

$$F_{id} = \pi \times d_0 \times s_0 \times 1,1 \times k_{fm} \times \ln \left[\frac{D}{d_0} \right]. \quad (\text{Gl. 14})$$

Dabei ist k_{fm} die mittlere Fließspannung im Flansch.

Reibung im Flansch:

$$F_{RN} = \frac{\pi}{2} \times \mu_{FI} \times d_0^2 \times \frac{\beta_0^2 - 1}{\beta} \times p_N. \quad (\text{Gl. 15})$$

Reibung an der Ziehkante:

$$F_{RZ} = (F_{id} + F_{RN}) \left(e^{\mu_Z \frac{\pi}{2}} - 1 \right). \quad (\text{Gl. 16})$$

Biegung an der Ziehkante:

$$F_{rb} = \pi \times d_0 \times s_0 \times k_{f1} \times \frac{s_0}{2 \times r_M}. \quad (\text{Gl. 17})$$

Dabei ist k_{f1} die Fließspannung am Flanschinnenrand.

Wenn man anhand dieser Gleichungen die Anteile der Gesamtkraft berechnet, die im Ziehkraftmaximum erforderlich sind, um die Reibung im Flansch und an der Ziehkante zu überwinden

$$F_{\text{Reibung}} = F_{RN} + F_{RZ} \quad (\text{Gl. 18})$$

sowie um das Blech zu plasitifizieren

$$F_{\text{Umformung}} = F_{id} + F_{rb}, \quad (\text{Gl. 19})$$

so erkennt man, daß mit zunehmender Blechdicke der Anteil der Reibkräfte abnimmt. Bild 59 zeigt den Einfluß der Blechdicke auf den Reib- und Umformanteil der Gesamtkraft für zylindrische Näpfe aus dem Tiefziehstahl DC05 unterschiedlicher Blechdicken mit einem Durchmesser von $d_0 = 100$ mm. Ein experimenteller Abgleich der Berechnung erfolgte, indem Näpfe im Anlieferungszustand (3 g/m^2 Anticorit) sowie mit Ziehfolie ($3 \mu\text{m}$ starke Polyethylenfolie) und hochviskosem Ziehöl (3 g/m^2 CLF 420) versehen, umgeformt wurden. Während die Umformung im Anlieferungszustand reibungsbehaftet ist ($\mu = 0,15$), kann die Reibung durch die Ziehfolie auf ein Minimum reduziert werden ($\mu \approx 0,01$).

Bild 60 zeigt den Einfluß der Festigkeit des Blechwerkstoffs (DC05+ZE, ZStE220i+ZE und H340+ZE mit $s_0 = 0,75$ mm) auf den Anteil der Reibkraft an der Gesamtkraft im Ziehkraftmaximum. Es wird sowohl aus den berechneten als auch aus den gemessenen Werten deutlich, daß der Anteil der Reibung an der Gesamtkraft mit abnehmender Festigkeit zu-

nimmt. Sowohl beim Tiefziehen von Näpfen aus dünnen Blechen als auch beim Umformen von Blechen mit geringerer Festigkeit wirken sich daher die geringen Reibwerte der Kunststoffwerkzeuge besonders günstig auf den Tiefziehprozeß aus.

6.2 Einfluß der Blechbeschichtung auf das Umformergebnis

Neben dem Einfluß des Werkzeugwerkstoffs auf die Grenzziehverhältnisse wurde der Einfluß verschiedener organischer Beschichtungen auf das Grenzziehverhältnis (Stempeldurchmesser $d_0 = 50$ mm) sowie auf die maximalen Stempelkräfte untersucht (Stempeldurchmesser $d_0 = 100$ mm). Dabei kamen die Beschichtungssysteme für Stahl- sowie Aluminiumfeinbleche zum Einsatz, die bereits in Abschnitt 5.3 beschrieben wurden.

6.2.1 Oberflächenbeschichtete Stahlfeinbleche

Als Blechwerkstoffe wurden dieselben elektrolytisch verzinkten und organisch beschichteten Feinbleche wie bei der Reibwertermittlung untersucht. Es wurden jeweils zwei Werkzeugwerkstoffe (Stahl 1.2379 und PUR-Plattenmaterial 2) und zwei Schmierzustände (0 und 3 g/m^2 des Schmiermittels Anticorit RP4107) betrachtet.

Bild 61 zeigt die Grenzziehverhältnisse der drei elektrolytisch verzinkten Stahlbleche (DC05+ZE, ZStE280i+ZE sowie H340+ZE). Es konnte gezeigt werden, daß neben einer Steigerung der Schmiermittelmenge auch die Wahl eines Kunststoffwerkstoffes die Grenzziehverhältnisse aller Blechwerkstoffe steigert. Besonders deutlich fallen diese Steigerungen beim DC05+ZE aus. Dies liegt daran, daß mit zunehmender Festigkeit der Einfluß der Reibung auf die zu erzielenden Ziehverhältnisse sinkt, da die Kräfte, die benötigt werden, um das Material zu plastifizieren, größer sind als die Kräfte, welche zur Überwindung der Reibung erforderlich sind.

In dem folgenden Bild 62 sind die Grenzziehverhältnisse der verschiedenen organisch beschichteten Bleche dargestellt. Neben einer Abhängigkeit der erreichbaren Ziehverhältnisse von der Schmiermittelmenge kann festgestellt werden, daß die Grenzziehverhältnisse der schweißbaren Lacksysteme, die Metallpartikel enthalten, beim Ziehen mit Kunststoffwerkzeugen deutlich geringer sind als die, welche mit Stahlwerkzeugen erzielt werden können. Abhilfe schafft jedoch eine Beschichtung solcher Bleche mit einer zusätzlichen Trockenschmierstoffschicht. Am Beispiel der mit Bonazinc 3000 beschichteten Bleche wurde gezeigt, daß eine Trockenschmierstoffschicht mit einer Schichtdicke von ca. $1\text{-}2 \mu\text{m}$ zu einer deutlichen Steigerung der Ziehverhältnisse führt. Sehr gute Ergebnisse wurden

mit der Polyesterbeschichtung beim Tiefziehen mit Kunststoffwerkzeugen erzielt. Die erreichbaren Ziehverhältnisse lagen hierbei im Vergleich zu den anderen Beschichtungen am höchsten.

Neben Grenzziehverhältnissen wurden maximale Stempelkräfte gemessen, um Stahl und Kunststoff als Werkzeugwerkstoffe zu vergleichen. Hierzu wurden rotationssymmetrische Tiefziehwerkzeuge mit einem Durchmesser von $d_0 = 100$ mm und verschiedenen Ziehringradien $r_M = 4$ mm, 8 mm und 12 mm aus Stahl 1.2379 sowie dem PUR-Plattmaterial 2 gefertigt. Die Schmiermittelmenge wurde bei den Versuchen zwischen 0 und 3 g/m^2 variiert. Es wurden hierbei stets Ronden mit dem Durchmesser $D_0 = 190$ mm auf eine Tiefe von $h = 45$ mm gezogen, so daß das Stempelkraftmaximum jeweils überschritten wurde.

Bild 63 zeigt die Stempelkraftmaxima der verschiedenen elektrolytisch verzinkten Stahlbleche über der Schmiermittelmenge für die drei untersuchten Ziehringradien. Es wird deutlich, daß die Stempelkräfte mit zunehmender Schmiermittelmenge oder zunehmendem Ziehringradius abnehmen. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, daß die Stempelkräfte beim Tiefziehen mit Kunststoffziehringen im Vergleich zum Ziehen mit Stahlwerkzeugen niedriger waren. Insbesondere bei der trockenen Umformung ohne Schmierstoff konnte eine starke Reduktion der Kräfte gemessen werden, da auf den Kunststoffwerkzeugen keinerlei Kaltaufschweißungen auftreten können.

Die maximalen Stempelkräfte, die beim Tiefziehen der organisch beschichteten Bleche (DC05+ZE, $s_0 = 0,75$ mm) gemessen wurden, zeigt Bild 64. Wie nach den Reibwertuntersuchungen zu erwarten war, erwies sich das Umformen der schweißbaren Lacksysteme mit Kunststoffwerkzeugen als ungünstig. Die gemessenen Stempelkräfte waren deutlich höher als beim Ziehen mit Stahlwerkzeugen. Vorteile der PUR-Ziehringe hinsichtlich des Kraftbedarfs zeigten sich allerdings bei der Trockenschmierstoff- sowie bei der Polyesterbeschichtung.

Bild 65 zeigt den positiven Einfluß der Trockenschmierstoffe sowohl bei der Umformung mit Kunststoff- als auch mit Stahlwerkzeugen. Es wird deutlich, daß eine Trockenschmierstoffschicht sowohl bei verzinktem als auch bei Bonazinc-beschichtetem Blech eine Reduktion der Stempelkräfte zur Folge hat, die auch durch eine Beölung mit 3 g/m^2 nicht erzielt werden kann. Durch die Trockenschmierstoffe steht somit eine zusätzliche Beschichtung zur Verfügung, mit der schweißbare Lacksysteme, die Metallpartikel enthalten, durch Kunststoffwerkzeuge problemlos umgeformt werden können.

6.2.2 Oberflächenveredelte Aluminiumfeinbleche

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Umformversuche zur Ermittlung von Grenzziehverhältnissen oberflächenveredelter Aluminiumbleche (AlMg_{4,5}Mn_{0,4} und AlMg_{0,4}Si_{1,2}; $s_0 = 1,2$ mm) wurden mit denselben organisch beschichteten Feinblechen wie die Reibwertermittlung durchgeführt. Es wurden, wie bei den beschichteten Stahlblechen, jeweils zwei Werkzeugwerkstoffe (Stahl 1.2379 und PUR-Plattenmaterial 2) und zwei Schmierzustände (0 und 3 g/m² des Schmiermittels Raziol CLF 180) betrachtet.

Bild 66 zeigt, daß sich die Grenzziehverhältnisse der nichtaushärtbaren Aluminiumlegierung AlMn_{4,5}Mn_{0,4} durch die Verwendung von Kunststoff als Werkzeugwerkstoff steigern ließen. Ausnahme hierbei war die schweißbare Dünnschichtlackierung Bonazinc 2004, die in Verbindung mit Kunststoff als Werkzeugwerkstoff bereits schlechtere Reibwerte aufwies als mit dem Kaltarbeitsstahl 1.2379. Besonders hohe Steigerungen ließen sich beim unbeschichteten Aluminium erzielen, da Aluminium in Verbindung mit Kunststoffen nicht zu Kaltaufschweißungen neigt, die ein frühes Reißen beim Ziehen mit Stahl verursachen. Jedoch konnten auch beim Tiefziehen der Bleche, beschichtet mit Trockenschmierstoff, sowie der nicht schweißbaren KTL-Ersatzlackierung deutliche Steigerungen der Grenzziehverhältnisse mit dem PUR-Plattenmaterial 2 erreicht werden.

Ähnliche Ergebnisse wie mit der nichtaushärtbaren Legierung konnten mit der aushärtbaren Legierung AlMg_{0,4}Si_{1,2} erzielt werden (Bild 67). Auch hier wurden beim Ziehen der Bonazinc-beschichteten Bleche mit Kunststoffwerkzeugen geringere Ziehtiefen als mit Stahlwerkzeugen erzielt. Bei allen anderen Lacksystemen ergab sich allerdings durch den Einsatz von Kunststoffwerkzeugen eine Steigerung, die jedoch geringer ausfiel als bei der Legierung AlMg_{4,5}Mn_{0,4}. Beim Tiefziehen der unbeschichteten Bleche zeigte sich außerdem, daß die Legierung AlMg_{0,4}Si_{1,2} eine deutlich geringere Neigung zu Kaltaufschweißungen aufweist als die nichtaushärtbare Legierung.

Die Ergebnisse von Tiefziehversuchen, durchgeführt mit einem rotationssymmetrischen Werkzeug mit einem Stempeldurchmesser $d_0 = 100$ mm, unterschiedlichen Schmiermittelmengen (0 - 3 g/m²) sowie Ziehringradien ($r_M = 4$ mm, 8 mm und 12 mm) sind in Bild 68 und Bild 69 dargestellt.

Aus den beiden Diagrammen geht hervor, daß eine trockene Umformung von unbeschichteten Aluminiumblechen mit Stahl und eine trockene Umformung von Bonazinc-beschichteten Aluminiumblechen mit Kunststoffwerkzeugen nicht möglich war. Während es bei der Umformung der unbeschichteten Bleche zu Kaltaufschweißungen und damit verbunden zu einer Materialanlagerung an der Stahlziehkante kam, die zum Reißen führ-

te, kam es bei den Bonazinc-beschichteten Blechen bei der Umformung mit Kunststoffwerkzeugen zum großflächigen Ablösen der Lackschicht. Es konnten daher mit diesen beiden Kombinationen aus Werkzeug- und Blechwerkstoff keine Gutteile gezogen werden.

Wurden Bonazinc-beschichtete Bleche mit Stahl- beziehungsweise unbeschichtete Bleche mit Kunststoffwerkzeugen umgeformt, konnten Gutteile gezogen werden. Die Ergebnisse der anderen Tiefziehversuche mit Trockenschmierstoff-beschichtetem Blech sowie der KTL-Ersatzlackierung zeigten Vorteile bei der Umformung mit Kunststoffwerkzeugen, da hier die maximalen Stempelkräfte niedriger ausfielen.

6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Umformung von unbeschichteten und oberflächenveredelten Feinblechen mit Kunststoffwerkzeugen zu technologischen Vorteilen führt, da Grenzziehverhältnisse gesteigert beziehungsweise Schmiermittel eingespart werden können.

Allerdings ist zu beachten, daß die Kunststoffe nicht mit Füllstoffen wie Aluminiumpulver oder Quarzsand versehen werden, da diese zu höherer Reibung und somit früherem Versagen der Bleche durch Bodenreißer führen. Außerdem sollten schweißbare Lacksysteme, die Metallpartikel enthalten, mit einer Trockenschmierstoffschicht versehen werden, um eine Verschlechterung der Tiefziehfähigkeit mit Kunststoffwerkzeugen zu vermeiden.

7 Simulation des Tiefziehprozesses mit Kunststoffwerkzeugen

Bei der Auslegung von Tiefziehprozessen entwickelte sich die Finite Elemente Methode (FEM) in den vergangenen Jahren zu einem wirksamen Instrument. Bereits in der Planungsphase kann die Geometrie der Tiefziehwerkzeuge dahingehend analysiert werden, ob bei der Umformung Versagensfälle wie z.B. Falten oder Reißen zu erwarten sind. Somit kann die Geometrie von Tiefziehteilen bereits in einer frühen Phase der Prozeßplanung geändert werden, um schneller Gutteile fertigen zu können [Haug94].

Die Aktivflächen der Tiefziehwerkzeuge werden derzeit in der Regel durch Starrkörperelemente modelliert, so daß die Elastizität der Werkzeuge und der Umformmaschine selten Eingang in die Berechnungen finden. Es gibt jedoch einige Ansätze, bei denen das elastische Verhalten der Werkzeuge berücksichtigt wird. Hierbei wird mit sehr guten Berechnungsergebnissen allerdings nicht die Matrize, sondern der Niederhalter als elastisch verformbarer Körper modelliert [Thom98]. Gerade bei der Umformung von Blechen mit Kunststoffwerkzeugen ist es aber interessant, den Einfluß der Matrizennachgiebigkeit zu berücksichtigen, da der geringe Elastizitätsmodul der Kunststoffwerkstoffe die Qualität der Ziehteile beeinflusst.

Einerseits führt die Nachgiebigkeit der Werkzeuge zu einer gleichmäßigen Verteilung der Flächenpressung im Flanschbereich der Ziehteile, weil dadurch lokale Blechdickenänderungen (z.B. Aufdickungen in den Eckbereichen) ausgeglichen werden. Andererseits können die Radienbereiche von Kunststoffwerkzeugen bei einer ungeeigneten Werkzeuggestaltung nachgeben, was zu Maßabweichungen am Ziehteil führt.

In diesem Kapitel soll daher gezeigt werden, wie sich die FEM als Simulationsverfahren gezielt für die Auslegung von Blechumformprozessen mit Kunststoffwerkzeugen nutzen läßt.

7.1 Das explizit dynamische FEM-System PAM-STAMP

Die Simulationsrechnungen, die im Rahmen dieser Arbeit beschrieben werden, wurden mit dem kommerziellen FEM-System PAM-STAMP durchgeführt. Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Finite Elemente Methode läßt sich wie folgt gliedern:

1. Zerlegung der komplexen Struktur eines Tiefziehwerkzeugs in einzelne Elemente.
2. Formulierung von Verschiebungsansätzen für die Elemente in Abhängigkeit von den Verschiebungen der einzelnen Knoten. Dies erfolgt durch Interpolation der Knotenva-

riablen innerhalb des Elements mit Hilfe sogenannter Formfunktionen. In der Regel werden hierfür Polynomansätze gewählt.

3. Bestimmung der Elementsteifigkeitsmatrizen und der angreifenden Lastvektoren, der sogenannten „rechten Seite“.
4. Zusammensetzen der Gleichungssysteme der einzelnen Elemente zu einem globalen Gleichungssystem.
5. Lösen des Gleichungssystems.

Die Elementsteifigkeitsmatrizen werden von PAM-STAMP mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Arbeiten bestimmt:

$$\int_V \underline{T}_{ij} \delta \underline{u}_{i,j} dV = \int_A \underline{t}_i \delta \underline{u}_i dA. \quad (\text{Gl. 20})$$

Dabei ist \underline{T}_{ij} der Cauchy Spannungstensor, $\underline{u}_{i,j}$ der Gradient der Verschiebungen, \underline{t}_i der Vektor der äußeren Lasten und δ der Variationsoperator. PAM-STAMP wurde ursprünglich für die Crash-Berechnung programmiert und zählt zu den sogenannten dynamisch expliziten Gleichungslösern. Hierbei wird das Prinzip der virtuellen Arbeiten um einen Trägheits- sowie um einen Dämpfungsterm erweitert [Bely77]:

$$\int_V \underline{T}_{ij} \delta \underline{u}_{i,j} dV = \int_A \underline{t}_i \delta \underline{u}_i dA - \int_V \rho \underline{\ddot{u}}_i \delta \underline{u}_i dV. \quad (\text{Gl. 21})$$

Die Dichte des Materials wird dabei durch ρ , die auftretenden Beschleunigungen werden durch $\underline{\ddot{u}}_i$ beschrieben. Dies führt nach der Diskretisierung der Gleichung zu folgendem Gleichungssystem:

$$[\underline{M}] \underline{\ddot{u}}^t + [\underline{C}] \underline{\dot{u}}^t = \{\underline{F}^t\} - \{\underline{I}^t\}, \quad (\text{Gl. 22})$$

wobei $[\underline{M}]$ die Massenmatrix und $[\underline{C}]$ eine künstliche Dämpfungsmatrix darstellen. $\{\underline{F}^t\}$ beschreibt die äußeren und $\{\underline{I}^t\}$ die inneren Kräfte. Für die Verschiebungen ergibt sich durch das explizite zentrale Differenzschema für jeden Zeitschritt

$$\underline{u}^{t+\Delta t} = \underline{u}^t + \Delta t \dot{\underline{u}}^{t+\Delta t/2}, \quad (\text{Gl. 23})$$

wobei deren Geschwindigkeiten in der Mitte jedes Zeitschritts

$$\dot{\underline{u}}^{t+\Delta t/2} = \dot{\underline{u}}^{t-\Delta t/2} + \frac{\Delta t^{t+\Delta t} + \Delta t^t}{2} \underline{\ddot{u}}^t \quad (\text{Gl. 24})$$

betragen.

Da der zentrale Differenzalgorithmus nur bedingt stabil ist, muß bei diesem Ansatz für jeden Zeitschritt

$$\Delta t \leq \frac{L}{c} \approx \frac{L}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (\text{Gl. 25})$$

gelten [Tekk98]. Hierbei ist L die charakteristische Länge des Elements, c die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls innerhalb des Elements, E der Elastizitätsmodul und ρ die Dichte des Materials [Schw91].

Durch die Beschreibung von Blechumformprozessen mit Hilfe von dynamisch expliziten Gleichungssystemen lassen sich auch komplexe Umformprozesse in relativ kurzer Zeit berechnen. Der Algorithmus ist sehr schnell, da keine Gleichgewichtsbedingungen am Ende der einzelnen Zeitschritte erfüllt werden müssen. Dies ist in der Blechumformung von besonderem Vorteil, da die Beschreibung der Kontaktbedingungen aufgrund der großen Oberflächen der Halbzeuge sehr komplex ist. Allerdings ergeben sich auch Nachteile aus der explizit dynamischen Beschreibung des Tiefziehprozesses:

- Da der zentrale Differenzalgorithmus nur bedingt stabil ist, müssen entweder sehr hohe Dichtewerte für das Material gewählt werden oder die Umformgeschwindigkeit muß im Vergleich zur realen Geschwindigkeit stark erhöht werden, um die Zeitschritte nicht zu klein werden zu lassen und akzeptable Rechenzeiten zu gewährleisten.
- Die Berechnung der Rückfederung nach der Entlastung des Teils beim Öffnen des Werkzeugs beziehungsweise nach dem Beschnitt des Teils führt bis heute nicht zu befriedigenden Ergebnissen, da lokale Spannungen nicht mit genügender Genauigkeit berechnet werden können [Schw91, Roll94, Tekk98, Schu99].

Nach der kurzen Beschreibung des dynamisch expliziten Codes des Systems PAM-STAMP sollen im folgenden Abschnitt die Elementtypen beschrieben werden, die zur Berechnung von Umformprozessen mit Kunststoffwerkzeugen eingesetzt wurden.

7.2 Elemente für die Simulation von Tiefziehprozessen mit Kunststoffwerkzeugen

In der Blechumformung werden in der Regel Membran- oder Schalenelemente für die Diskretisierung des Blechs benutzt. Der Grund hierfür ist die sehr große Oberfläche des Blechs im Vergleich zur geringen Dicke des Materials. Während Membranelemente nur bei Umformoperationen erfolgreich angewendet werden können, bei denen die Biegeradien die zehnfache Blechdicke nicht unterschreiten, können mit Schalenelementen fast alle Tiefziehvorgänge erfolgreich berechnet werden [Tekk98]. Der Grund liegt darin, daß

Membranelemente nur Kräfte in der Ebene aber keine Biegemomente berücksichtigen können, wie sie zum Beispiel an Ziehkanten auftreten. Diesem Nachteil wird durch den Einsatz von Schalenelementen begegnet, bei denen Normalenspannungen jedoch meist vernachlässigt werden.

Im Falle der Simulation mit starren Werkzeugen werden Starrkörperelemente als Kontaktflächen gewählt, welche die Werkzeugaktivflächen modellieren (Bild 70, links). Im Falle der Berechnung von Blechumformprozessen mit Kunststoffwerkzeugen müssen statt dieser 3D-Flächenelemente Volumenelemente eingesetzt werden. Dies erfordert eine feinere Elementierung, da die Kontaktfläche des Werkzeugs durch die an der Oberfläche befindlichen Segmente der Volumenelemente gebildet wird (Bild 70, rechts). Im Falle der hier vorgestellten Arbeiten wurden Tetraederelemente für die Diskretisierung der Matrizen gewählt. Die Beschreibung des Kontakts erfolgt bei PAM-STAMP durch einen sogenannten Penalty-Algorithmus, bei dem eine Durchdringung der Werkzeugkontaktflächen durch eine Reaktionskraft auf dem Werkstück „bestraft“ wird. Die Beschreibung der Reibung erfolgt mit dem Coulomb'schen Reibgesetz.

Neben der Auswahl geeigneter Elementtypen ist die Wahl eines geeigneten Stoffgesetzes die Voraussetzung für eine erfolgreiche Simulationsrechnung. Da das Materialverhalten der hier untersuchten Blechwerkstoffe (DC05 und AlMg4,5Mn0,4) mit den Hill'schen Anisotropiekoeffizienten [Hill48] und der Krupkowsky'schen Verfestigungsregel ausreichend genau beschrieben wird, soll in dem folgenden Abschnitt lediglich auf das Materialgesetz der Kunststoffe eingegangen werden.

7.3 Beschreibung des Materialverhaltens von Kunststoffwerkzeugen

Da weder bei den Verschleißuntersuchungen noch bei den Umformversuchen mit dem härtesten Stahlblech H340+ZE irreversible plastische Verformungen an den am stärksten belasteten Bereichen, den Ziehkanten, gemessen werden konnten, wurde für die Beschreibung des Materialverhaltens der Werkzeuge ein linear elastisches Materialgesetz angenommen. In diesem Fall läßt sich der Spannungstensor in einer einfachen Form als

$$\underline{\sigma} = s \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{11} & s_{21} & s_{13} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 26})$$

oder

$$\sigma_{ij} = s \delta_{ij} + s_{ij} \quad (\text{Gl. 27})$$

darstellen, wobei $s = 1/3 \sigma_{ii}$ und $\delta_{ij} = 0$ für $i \neq j$ und $\delta_{ij} = 1$ für $i = j$. Der erste Term wird da-

bei als der symmetrische Kugeltensor bezeichnet, der zweite als der Spannungsdeviator. Entsprechend läßt sich der Dehnungstensor $\underline{\underline{\varepsilon}}$ in einen kugelsymmetrischen Anteil und einen Dehnungsdeviator aufspalten:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = e \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{12} & e_{22} & e_{23} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 28})$$

oder

$\varepsilon_{ij} = e \delta_{ij} + e_{ij}$. Der Dehnungsdeviator e_{ij} beschreibt dabei die Gestaltänderung, e die Volumenänderung des Materials.

Für den Fall eines linear elastischen Materialverhaltens, das im folgenden für die Matrixwerkstoffe angenommen werden soll, lassen sich die Spannungen beziehungsweise Dehnungen mit folgenden Gleichungen berechnen

$$s = 3 K e \quad (\text{Gl. 29})$$

und

$$s_{ij} = 2 G e_{ij}. \quad (\text{Gl. 30})$$

Für den Schubmodul G gilt:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (\text{Gl. 31})$$

Der Kompressionsmodul K , der bei den untersuchten Kunststoffen von besonderer Bedeutung ist, da Polyurethane ein gummielastisches Verhalten und somit eine geringe Kompressibilität aufweisen, errechnet sich wie folgt:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (\text{Gl. 32})$$

Die linear abhängigen elastischen Materialkennwerte E und ν beziehungsweise G und K wurden im Zugversuch ermittelt.

7.4 Elastische Kennwerte von Kunststoffwerkstoffen aus dem Zugversuch

Die wichtigsten mechanischen Materialeigenschaften der Kunststoffwerkstoffe wurden im einachsigen Zugversuch nach ISO 527-1 ermittelt [ISO527]. Der Vorteil des Zugversuchs gegenüber dem Druckversuch liegt darin, daß die Querdehnungen aufgrund der Länge des Meßbereichs mit 80 mm beim Zugversuch größer sind als beim Druckversuch, bei dem die Meßlänge lediglich 25 mm beträgt [ISO604]. Somit kann die Querdehnung der

Probe im Zugversuch genauer bestimmt werden als im Druckversuch. Bei allen Proben wurde isotropes Materialverhalten, das heißt gleiches Materialverhalten der Werkstoffe in allen Raumrichtungen, angenommen. Diese Annahme ist gerechtfertigt, weil sich bei der Aushärtung der untersuchten PUR-Werkstoffe keine Vorzugsrichtung ausbildet [Uhli98]. Diese Annahme trifft auch bei den gefüllten Proben zu, da als Füllstoffe keine Fasern, sondern globulare Partikel (Quarzsand) gewählt wurden.

Neben dem Elastizitätsmodul E und der Querkontraktionszahl ν wurden die Bruchdehnung ε_B und die Zugfestigkeit σ_B ermittelt. Der Elastizitätsmodul E errechnet sich hierbei wie folgt:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad (\text{Gl. 33})$$

wobei σ_1 die gemessene Spannung bei einer Dehnung von $\varepsilon_1 = 0,0005$ und σ_2 die Spannung bei einer Dehnung von $\varepsilon_2 = 0,0025$ ist. Die Querkontraktionszahl ν ergibt sich aus

$$\nu = - \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}, \quad (\text{Gl. 34})$$

wobei ε die Dehnung in Längsrichtung zur Probe und ε_n die Dehnung quer zur Probe darstellt.

In Bild 71 sind die Ergebnisse der Zugversuche mit den verschleißbeständigsten der untersuchten Kunststoffwerkstoffe dargestellt. Aus den Diagrammen wird deutlich, daß sowohl das PUR-Frontguß- als auch das PUR-Gel-Coat-Material einen sehr geringen Elastizitätsmodul haben, was zur elastischen Deformation des Werkzeugs führen kann. Da die Querkontraktionszahlen beider Materialien mit $\nu = 0,46$ (Frontguß) und $\nu = 0,42$ (Gel-Coat) jedoch sehr hoch liegen, sind beide Materialien als nahezu inkompressibel ($\nu = 0,5$) anzusehen. Höhere Elastizitätsmoduln und geringere Querkontraktionszahlen wiesen das Plattenmaterial und das Quarzsand-gefüllte Hinterfüllungsmaterial auf, so daß bei Tiefziehwerkzeugen aus diesen Materialien geringere Deformationen zu erwarten sind.

Auch im Hinblick auf das Bruchverhalten konnten Ähnlichkeiten von Frontguß- und Gel-Coat-Material festgestellt werden. Beide Materialien zeichneten sich durch eine hohe Duktilität bei geringen Festigkeitswerten aus. Das Plattenmaterial wies eine höhere Festigkeit aber eine geringere Duktilität auf. Die geringsten Werte hinsichtlich Festigkeit und Dehnungsvermögen unter Zugbeanspruchung konnten mit der Quarzsand-gefüllten Probe gemessen werden. Da dieses Material jedoch einen sehr hohen Elastizitätsmodul hat, sollte man es für Hinterbauten von Tiefziehwerkzeugen bevorzugt einsetzen. Um die Schwächen hinsichtlich der Zugfestigkeit zu kompensieren, sind konstruktive Maßnahmen

erforderlich. Eine Armierung durch Stahlringe kann radiale Zugspannungen abtragen, so daß der Werkzeughinterbau nur durch Druckspannungen belastet wird, die erfahrungsgemäß erst bei weit höheren Werten zum Versagen führen als Zugspannungen.

Der Anstieg des Elastizitätsmoduls sowie der Abfall der Querkontraktionszahl, der Bruchdehnung sowie der Zugfestigkeit hängt in starkem Maße von der Menge der beigemengten Füllstoffe ab. Bild 72 zeigt den Einfluß der Füllstoffmenge auf die mechanischen Eigenschaften. Da sich die Quarzsandpartikel, die in einer Polyurethanmatrix eingelagert sind, aufgrund ihrer sehr hohen Steifigkeit kaum elastisch verformen, behindern sie die Querdehnung der Probe und tragen so zum Abfall der Querkontraktionszahl bei. Gleichzeitig haben die Partikel jedoch auch eine Kerbwirkung, so daß es zur Spannungskonzentration in ihrer unmittelbaren Umgebung kommt, was zu einer Reduktion der Zugfestigkeit und der Duktilität führt.

Auf der Basis der in diesem Abschnitt beschriebenen elastischen Kennwerte sollten nun Tiefziehprozesse mit elastischen Matrizen simuliert werden.

7.5 Elastische Deformation der Ziehkante

Durch den Vergleich von Finite Elemente Berechnungen und experimentellen Untersuchungen sollte überprüft werden, ob es ausreicht, das elastische Verhalten der Kunststoffwerkzeuge durch ein linear elastisches Stoffgesetz zu beschreiben. Darüber hinaus sollte ein Vergleich der verschiedenen Materialien und Fertigungsverfahren hinsichtlich der zu erzielenden Maßgenauigkeit erfolgen.

Um diese Ziel zu erreichen, wurden vier Kunststoffmatrizen gefertigt und entsprechende Finite Elemente Modelle aufgestellt:

1. Gefräst aus Plattenmaterial,
2. Vollguß,
3. Frontguß mit einer Frontschichtdicke von 4 mm,
4. Gel-Coat mit einer Oberflächenschichtdicke von 1 mm.

Bild 73 zeigt das Simulationsmodell des Tiefziehens bei einem quadratischen Teil aus der Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn0,4 ($s_0 = 1,0$ mm) mit den Abmessungen 40 x 40 mm, einer Ziehtiefe von $h = 25$ mm, einem Eckenradius von $r_E = 10$ mm sowie einem Ziehringradius von $r_M = 5$ mm. Die Kunststoffmatrizen wurden aus den eingangs beschriebenen Tetraederelementen modelliert, deren Oberflächensegmente als Kontaktflächen dienen. Aufgrund der Symmetrie brauchte man nur ein Viertel des Werkzeugs zu berechnen.

Im Falle der hier beschriebenen Simulationen wurde jeweils mit einer Umformgeschwindigkeit von $v_Z = 10 \text{ ms}^{-1}$ gerechnet. Die Massen der kleinsten Tetraederelemente der Kunststoffe wurden so skaliert, daß die Zeitschrittlänge nicht durch die Werkzeugelemente limitiert wurde, sondern von der kleinsten Elementlänge des Blechs abhängen, dessen Dichte bei der Simulation nicht verändert wurde. Dieses Vorgehen ist gerechtfertigt durch die Tatsache, daß die Werkzeugelemente im Vergleich zu den Elementen, die das Blech diskretisieren, nur kleine Verschiebungen von wenigen Zehntelmillimetern erfahren und weniger als 10 Prozent der Elemente von der Skalierung betroffen waren.

Die Simulationsergebnisse sind in Bild 74 und Bild 75 dargestellt. Das erste der beiden Bilder zeigt die Knotenverschiebungen der vier untersuchten Matrizen bei Endziehtiefe. Das zweite Bild zeigt die Deformation der Ziehkanten entlang eines radialen Schnitts durch das Werkzeug an der am stärksten beanspruchten Stelle, der Ziehteilecke.

Aus beiden Bildern wird deutlich, daß die Deformationen, die an der Vollguß- sowie an der Frontgußmatrize aufgrund der geringen Steifigkeit des Materials auftreten, nicht akzeptabel sind. Frontgußmatrizen würden sich daher nur für Umformvorgänge eignen, bei denen keine hohen lokalen Flächenpressungen auftreten, wie dies zum Beispiel bei der Fertigung flachgewölbter Bauteile der Fall ist. Eine Verringerung der Schichtdicke ist leider nicht möglich, da die hohe Viskosität des flüssigen Materials dies nicht zuläßt. Zwar könnten mit anderen Materialien, die zum Beispiel durch Füllstoffe versteift sind, bessere Ergebnisse erzielt werden, dies hätte jedoch höheren Verschleiß und höhere Reibwerte zur Folge.

Günstigere Ergebnisse wurden mit dem Plattenmaterial sowie dem Gel-Coat erzielt. Bei beiden Matrizen traten nur geringe Verformungen auf. Die Verformungen an der Gel-Coat-Matrize waren dabei sogar geringer als an der aus Plattenmaterial gefertigten. Dies liegt daran, daß der sehr steife Hinterbau bei der Gel-Coat-Matrize kaum nachgibt, so daß nur eine Deformation der dünnen (1 mm) Oberflächenschicht auftritt.

Bild 76 zeigt radiale Schnittlinien von Tiefziehteilen, die mit verschiedenen Kunststoffmatrizen sowie einer als starr anzusehenden Stahlmatrize gezogen wurden. Die gemessenen Radienerweiterungen, die hierbei auftreten, stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der Simulation überein. Es konnte gezeigt werden, daß hinsichtlich der gemessenen Radien an der Ziehkante kein Unterschied zwischen der Stahlmatrize sowie den Ziehringen, gefertigt aus Plattenmaterial und mit Gel-Coat-Oberfläche, besteht. Hingegen tritt im Vergleich zu dem mit der Stahlmatrize gezogenen Teil eine Radienerweiterung von $\Delta r_M = 0,3 \text{ mm}$ bei der Frontguß- und sogar von $\Delta r_M = 0,7 \text{ mm}$ bei der Vollgußmatrize auf. Dies stimmt, vernachlässigt man die Rückfederung, die mit der expliziten FEM nur ungenau berechnet werden kann, sehr gut mit den Simulationsergebnissen überein.

Neben einem Einfluß auf die Maßhaltigkeit von Ziehteilen hat die Elastizität von Kunststoffwerkzeugen auch einen positiven Einfluß auf den Tiefziehprozeß, da lokale Blechdickenschwankungen kompensiert werden und somit eine gleichmäßigere Verteilung der Flächenpressung im Flanschbereich des Ziehteil erreicht wird.

7.6 Einfluß der Werkzeugnachgiebigkeit auf das Tiefziehergebnis

Um den positiven Einfluß der Werkzeugnachgiebigkeit auf den Tiefziehprozeß zu belegen, wurden rechteckige Ziehteile (220 x 110 mm, DC05, $s_0 = 0,8$ mm) mit einem Stahl- sowie einem Kunststoffziehring umgeformt. Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurden Finite Elemente Berechnungen der beiden Prozesse durchgeführt. Auch hier wurde mit einer Umformgeschwindigkeit von $v_Z = 10 \text{ ms}^{-1}$ und einer Dichteskalierung gerechnet, um die Zeitschritte nicht zu kurz werden zu lassen und akzeptable Rechenzeiten zu erreichen.

Bild 77 zeigt die berechneten Kontaktnormalspannungen unter dem Niederhalter beim Ziehen mit starrer Stahl- sowie elastischer Kunststoffmatrize. Es wird deutlich, daß unter dem Niederhalter des Kunststoffwerkzeugs eine gleichmäßigere Flächenpressung erreicht wird als im Flanschbereich des starren Stahlwerkzeugs. Während im Eckbereich des Stahlwerkzeugs hohe und im Bereich der langen geraden Seite geringe Flächenpressungen auftreten, konnten diese durch Verwendung einer Kunststoffmatrize gleichmäßig verteilt werden. In der Praxis kann dies zu einer Verkürzung der Einarbeitungszeit neuer Werkzeuge führen, da sich das Werkzeug an Blechdickenänderungen durch elastische Verformung anpassen kann. Somit müssen die Eckbereiche von Kunststofftiefziehwerkzeugen nicht wie bei Stahlwerkzeugen in manueller Arbeit an die Blechaufdickung angepaßt werden. Darüber hinaus wurde gezeigt, daß die maximalen Normalspannungen auf dem Niederhalter des Werkzeugs mit Kunststoffmatrize gerade im Bereich der langen geraden Seite deutlich gleichmäßiger ausfallen. Somit wird hier eine bessere Ausstreckung des Materials realisiert, was zu einem verbesserten Rückfederungsverhalten führt.

Die gleichmäßige Flächenpressung führt zu einer geringeren Belastung des Materials in den kritischen Eckbereichen, in denen bei einer Überbeanspruchung des Blechs Bodenreißer auftreten. Bild 78 zeigt die berechneten Blechdickenänderungen an den Teilen, die mit Stahl- und mit Kunststoffmatrize simuliert wurden. Es konnte gezeigt werden, daß die Verringerung der Blechdicke im Bereich des Bodens bei der Stahlmatrize deutlich höher ausfällt als bei der Polyurethanmatrize. Die positiven Auswirkungen des nachgiebigen Verhaltens der Kunststoffmatrize auf die Blechdickenverteilung konnte auch in experimentellen Untersuchungen nachgewiesen werden. Bild 79 zeigt Blechdickenverläufe in

den Ecken rechteckiger Teile, die mit Stahl- und Kunststoffmatrize gezogen wurden. Wie bei der Simulation konnte auch im Experiment gezeigt werden, daß die Blechdicke beim Ziehen mit einem Kunststoffwerkzeug weniger stark abnimmt als beim Ziehen mit einem Stahlwerkzeug.

Neben der Beanspruchung des Blechs in Dickenrichtung wird durch das Ziehen mit Kunststoffwerkzeugen auch die Beanspruchung der Oberfläche reduziert. Bild 80 zeigt die Oberflächen in der Ecke von Ziehteilen, gezogen mit Stahl und mit Kunststoff. Während das linke Teil (Stahlziehring) eine deutliche Einglättung der Oberfläche im Bereich der Ecke sowie der Ziehkante aufweist, hat sich die Oberfläche des rechten Teils (Kunststoffziehring) kaum verändert.

Neben besserer Oberflächenqualität und höherer Blechdicke an der Stempelkante konnte gezeigt werden, daß sich auch der Flanscheinzug durch das Ziehen mit Kunststoffwerkzeugen verbessert. Bild 81 zeigt die gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Flanschkonturen beim Ziehen mit starrer und mit nachgiebiger Matrize. Es wird deutlich, daß die hohen Kontaktspannungen in der Ziehteilecke bei der starren Matrize zu einem erschwerten Einfließen des Flansches in diesem Bereich führen. Im Bereich der langen geraden Seiten wird der Flanscheinzug durch die gleichmäßige Verteilung der Flächenpressung beim Ziehen mit der Kunststoffmatrize behindert. Dies ist deshalb positiv, weil eine höherer Austreckung des Blechs in diesem Bereich der Rückfederung entgegenwirkt.

7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, daß FEM-Berechnungen des Tiefziehens mit Kunststoffwerkzeugen sehr gut mit experimentellen Untersuchungen übereinstimmen. Dabei ist es ausreichend, ein linear elastisches Stoffgesetz sowie Tetraederelemente für die Modellierung der elastischen Werkzeugkomponenten zu verwenden. Um die Zeitschrittlänge nicht zu kurz und die Rechenzeiten zu lang werden zu lassen, ist es allerdings erforderlich, neben der Ziehgeschwindigkeit auch die Dichte des Matrizenmaterials um drei Größenordnungen zu erhöhen. Dadurch wird gewährleistet, daß die Länge der einzelnen Zeitschritte nicht durch die elastischen Werkzeugkomponenten, die nur geringe Deformationen erfahren, sondern durch das Blech bestimmt werden. Mit Hilfe der Simulation können dann sowohl die positiven als auch die negativen Einflüsse der Werkzeugnachgiebigkeit auf den Tiefziehprozeß vorhergesagt werden. Maßabweichungen durch Vergrößerungen von Radien können genauso berechnet werden wie die Auswirkung der Elastizität auf die Verteilung der Flächenpressung im Flansch und die daraus resultierenden Blechdickenverläufe.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens für Kunststoffwerkzeuge von großer Bedeutung für die Maßhaltigkeit der gezogenen Teile ist. Es konnte nachgewiesen werden, daß das Gel-Coat-Verfahren hinsichtlich der Steifigkeit der Werkzeuge den anderen Verfahren überlegen ist. Lediglich mit Werkzeugen aus Plattenmaterial konnten ähnlich geringe Deformationen erzielt werden.

8 Anwendungspotential von Kunststoffen im Werkzeugbau

In diesem Kapitel soll das Anwendungspotential der Kunststoff- und Galvanoschalenwerkzeuge gezeigt werden. Die bereits beschriebenen Untersuchungen haben belegt, daß Kunststoffwerkzeuge insbesondere bei der Umformung von Leichtmetallen und beschichteten Blechen eingesetzt werden sollten, Galvanoschalen hingegen für die Umformung unbeschichteter und höherfester Stahlbleche.

8.1 Umformung von Aluminiumblechen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, daß sich Kunststoffwerkzeuge insbesondere für die Umformung von Aluminiumblechen eignen. Daher wurde ein Tiefziehwerkzeug, mit dem ein Ventildeckel aus Aluminiumfeinblech (AlMg4,5Mn0,4; $s_0 = 1,2$ mm) gefertigt wird, mit der Finiten Elemente Methode ausgelegt, gefertigt und im Dauereinsatz erprobt. Nach der Konstruktion des Tiefziehteils, dessen Hauptabmessungen in [Bild 82](#) dargestellt sind, erfolgte die Konstruktion der Werkzeugkomponenten mit dem 3D-CAD-System Pro/Engineer. Ausgehend von der Teilegeometrie konnte ein Stempel konstruiert werden, der aus Plattenmaterial gefräst wurde (siehe [Bild 5](#)). Nach der Konstruktion des Stempels konnte die CAD-Darstellung der Matrize erfolgen. Hierbei wurde bereits die gewählte Blechdicke von $s_0 = 1,2$ mm berücksichtigt, so daß ein entsprechender Ziehspalt entstand. Zuletzt mußte noch der Matrizenradius ($r_M = 8$ mm) an die Matrize modelliert werden. Als Niederhalter wurde ein einfacher Brennzuschnitt aus einem Werkzeugstahl C45 gewählt, da der Flanschbereich des Teils eben ist.

8.1.1 Werkzeugauslegung mit FEM

Nachdem die Konstruktion des Tiefziehwerkzeugs erfolgt war, sollte eine Auswahl des am besten geeigneten Fertigungsverfahrens für die Matrize erfolgen. Hierzu wurden Finite Elemente Berechnungen mit unterschiedlichen elastischen Matrizen durchgeführt. Mit den Berechnungen sollte herausgefunden werden, bei welchem Fertigungsverfahren die geringsten elastischen Werkzeugdeformationen auftreten. Insgesamt wurden dazu fünf Berechnungen durchgeführt:

- Eine konventionelle Berechnung mit **starrem Werkzeug**, modelliert aus Starrkörperelementen als Referenz,
- eine Berechnung des Deformationsverhaltens beim Tiefziehen mit einer Matrize, gefräst aus **Plattenmaterial** ([Bild 83](#) links),

- eine Simulation mit einer Matrize aus dem Quarzsand-gefüllten **Hinterbaumaterial**, um die Deformation des Werkzeugkörpers bei den Matrizen gefertigt im
- **Frontgußverfahren** (5 mm, Bild 83 rechts) und
- im **Gel-Coat-Verfahren** (2 mm) zu ermitteln.

Während die Matrizen aus Plattenmaterial und aus Quarzsand-gefülltem PUR-Hinterbaumaterial mit insgesamt jeweils 63.000 Tetraederelementen vollständig vernetzt wurden, sind bei der Frontguß- sowie der Gel-Coat-Matrize nur die Werkzeugoberflächenschichten vernetzt worden. Die Unterseiten dieser Schichten wurden durch Randbedingungen an jeglicher Verschiebung gehindert. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da bereits im Abschnitt 7.4 gezeigt werden konnte, daß die Verschiebungen, die an den Hinterbauten mit hohen Elastizitätsmoduln auftreten, klein sind im Vergleich zu den Verschiebungen an den Oberflächenschichten mit den um den Faktor zwanzig geringeren E-Moduln. Darüber hinaus konnte auf diese Weise die Anzahl der Elemente (163.000 Elemente für das Frontguß- sowie 50.000 für das Gel-Coat-Modell) gering gehalten werden, um die Rechenzeiten nicht zu lang werden zu lassen.

In Bild 84 sind die Ergebnisse der Finite Elemente Berechnungen mit den unterschiedlichen Matrizen dargestellt. Man sieht die Knotenverschiebungen an den Matrizen am Ende des Tiefziehprozesses. Dabei schaut man direkt von oben in die Öffnung der Matrize hinein. Aus den Diagrammen wird deutlich, daß die Gel-Coat-Matrize in weit geringerem Maße durch den Umformprozeß verformt wird als die anderen Matrizen aus Plattenmaterial oder hergestellt im Frontgußverfahren. Allerdings kann man dem Diagramm entnehmen, daß sich auch die Matrize aus dem Hinterbaumaterial verformt. Diese Deformation kann allerdings durch konstruktive Maßnahmen, wie dem Eingießen einer Armierung (siehe Bild 8), verringert werden, da es sich wie bei der Matrize aus Plattenmaterial um Verschiebungen infolge der radialen Druck- und tangentialen Zugspannungen handelt und weniger um eine Deformation der Radien.

Nachteilig bei der Simulation des Tiefziehprozesses mit nachgiebigen Werkzeugen sind die langen Rechenzeiten, die sich aus der großen Anzahl von Tetraederelementen für die Diskretisierung der Matrizen ergeben (Bild 85). Die große Anzahl von Elementen ist erforderlich, weil sehr fein vernetzt werden muß, um einerseits eine große Anzahl von Kontaktflächen in den Radienbereichen zu erzielen und die Sekantenfehler, die bei einer zu groben Vernetzung in gekrümmten Bereichen auftreten, möglichst klein zu halten; andererseits muß beachtet werden, daß bei den Volumenelementen ein Kantenverhältnis von 1:4 nicht überschritten wird, um die Berechnung nicht ungenau werden zu lassen. Hieraus resultierten neben einem höheren Aufwand für die Netzgenerierung beträchtliche Rechen-

zeiten, die im Falle der Gel-Coat-Matrize zu Rechenzeiten führten, die um den Faktor 2,6 über denen lagen, die für die konventionellen Berechnung mit Werkzeugen aus Starrkörperelementen benötigt wurden. Da die Rechengeschwindigkeit moderner Prozessoren stetig steigt, wird die Berechnung von Umformprozessen mit elastischen Werkzeugen und Umformmaschinen in naher Zukunft zum Stand der Technik werden [Schu99].

Nachdem mit Hilfe der Finiten Elemente Simulation für die Herstellung der Matrize das Gel-Coat-Verfahren ausgewählt wurde, konnten das Werkzeug gefertigt (siehe Bilder 6 bis 8) und Umformversuche durchgeführt werden.

8.1.2 Versuchsergebnisse

Im Rahmen von Umformversuchen sollten die Berechnungsgenauigkeit überprüft und die Verschleißbeständigkeit der Matrize untersucht werden. Bild 86 zeigt berechnete und gemessene Prozeßgrößen aus den fünf Berechnungen sowie aus den experimentellen Untersuchungen. Hieraus wird deutlich, daß eine hohe Steifigkeit des Werkzeugs zu einer größeren Blechdickenabnahme in den Stempelecken und einer geringeren Blechdickenzunahme im Flansch führt. Im Falle der Gel-Coat-Matrize konnte darüber hinaus die gute Übereinstimmung von Berechnung und Experiment nachgewiesen werden.

Dauerversuche mit dem Kunststoffwerkzeug zeigten die sehr gute Verschleißbeständigkeit des Gel-Coats. Bild 87 zeigt das Tiefziehwerkzeug, nachdem 500 Teile umgeformt wurden. Auch nach dieser großen Anzahl von Teilen konnte kein Verschleiß am Werkzeug festgestellt werden, was durch das Vermessen des ersten sowie des 500sten Teils überprüft wurde (Bild 88). Insgesamt wurden die Teile entlang von drei Schnittlinien vermessen. Dabei konnte einerseits gezeigt werden, daß die Nachgiebigkeit des Werkzeugs keinen Einfluß auf die Teilegeometrie hatte und daß andererseits kein Werkzeugverschleiß auftrat.

Die sehr gute Eignung von Kunststoffwerkzeugen für die Umformung organisch beschichteter Bleche zeigt Bild 89. Es kam durch die Umformung zu keinerlei sichtbaren Beschädigungen der Werkstückoberflächen.

8.2 Warmumformung von Magnesium-Feinblechen

Um das Potential von Kunststoffwerkzeugen auch bei der Umformung von Magnesiumblechen zu zeigen, die zwar eine sehr geringe Dichte aufweisen ($\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$), aber erst bei einer Temperatur von $T = 225 \text{ °C}$ optimal tiefziehbar sind [Doeg98], wurde eine Matrize aus einem Aluminium-gefüllten Epoxidharz gefertigt, das eine Temperaturbeständigkeit von mehr als 250 °C aufweist. Bild 90 zeigt dieses Werkzeug, eingebaut in eine einfachwirkende hydraulische Tiefziehpresse mit Verdrängerziehkissen. Um das Magnesiumblech (AZ31, $s_0 = 1,0 \text{ mm}$) auf die notwendige Temperatur von 225 °C zu erwärmen, wurden der Niederhalter durch Heizpatronen auf $T_N = 225 \text{ °C}$ und der Stempel auf $T_S = 100 \text{ °C}$ erhitzt [Fran99].

Das in Bild 91 gezeigte Teil aus Magnesiumblech konnte problemlos gezogen werden. Es wies eine um 75 % geringere Masse als das aus Stahlblech gezogene Teil und eine um 30 % geringere Masse als die Aluminiumkomponente auf. Da der Werkzeugwerkstoff mit Aluminiumpulver gefüllt war, ist hierbei mit einem nur als befriedigend einzustufenden Verschleißwiderstand zu rechnen. Dennoch steht hiermit eine Möglichkeit für die Prototypenfertigung von Magnesiumblechkomponenten bei erhöhten Temperaturen zur Verfügung.

8.3 Galvanoschalen

Anhand von zwei Tiefziehwerkzeugen, einem Versuchs- und einem Praxiswerkzeug, soll in den beiden folgenden Abschnitten das Potential dieser Werkzeugtechnologie aufgezeigt werden.

8.3.1 Versuchswerkzeug

Im Rahmen dieser Arbeit konnte bereits das Potential von Galvanoschalen hinsichtlich ihres sehr guten Verschleißverhaltens gezeigt werden. Da das Verschleißverhalten dieses Werkstoffs besser ist als das von unlegiertem und ungehärtetem Grauguß (GG25), eignen sich solche Werkzeuge insbesondere für die Fertigung kleiner und mittlerer Serien von Blechteilen aus unbeschichteten oder höherfesten Werkstoffen.

Bild 92 zeigt Tiefziehteile, gezogen aus dem höherfesten, kaltgewalzten Tiefziehstahl H340, dem austenitischen Edelstahl X5CrNi18-8 mit Blechdicken von jeweils $s_0 = 1 \text{ mm}$ sowie einem Titanblech mit einer Blechdicke von $s_0 = 0,8 \text{ mm}$. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, daß sich Galvanoschalen für die Umformung organisch beschichteter Bleche eignen. Bild 92 zeigt darüber hinaus ein organisch beschichtetes Aluminiumblech (AlMg4,5Mn0,4; $s_0 = 1,2 \text{ mm}$), das mit der schweißbaren Dünnschichtversiegelung Bona-

zinc 2004 beschichtet ist und ohne sichtbare Oberflächenschäden umgeformt werden konnte.

8.3.2 Praxiswerkzeug

Untersuchungen in dem Preßwerk eines Automobilherstellers mit einem Praxiswerkzeug, mit dem ein Doppelteil für eine Türverstärkung gezogen wird, haben gezeigt, daß mittlere Serien problemlos mit Galvanoschalen gefertigt werden können. Das Serienwerkzeug besteht aus einem Kunststoffstempel, gefertigt aus dem in dieser Arbeit beschriebenen PUR-Plattenmaterial 1, einem Niederhalter, gefertigt aus einem PUR-Material im Frontgußverfahren sowie aus einer Galvanoschalenmatrize (Bild 93).

In Bild 94 sind zwei Teile abgebildet, die mit diesem Werkzeug erfolgreich abgepreßt werden konnten. Bei dem unbeschichteten Blech (DC04, $s_0 = 0,75$ mm) handelt es sich um das 10.000ste Teil, das mit dem Werkzeug umgeformt wurde, sowie um ein Teil, das aus einem organisch beschichteten Blech (DC05+ZE, $s_0 = 0,75$ mm, schweißbare KTL-Ersatzlackierung Zincroplex Black) gezogen wurde.

Die Praxisversuche bestätigen somit die Ergebnisse, die in den Verschleißuntersuchungen sowohl anhand des Stempelmaterials (PUR-Plattenmaterial 1) als auch anhand des Matrizenwerkstoffs (Galvanoschale „weich“, HRC 25) erzielt wurden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Verschleißuntersuchungen an Kunststoffprüfkörpern zeigen, daß es möglich ist, Werkzeuge aus Kunststoffen zu fertigen, mit denen bis zu 50.000 Teile gezogen werden können. Die Kosten für den Werkzeugbau bei kleinen und mittleren Stückzahlen können dadurch beträchtlich gesenkt werden. Diese Kunststoffwerkzeuge haben im Gegensatz zu den heute üblichen Stahl- oder Graugußwerkzeugen eine Lebensdauer, die der zu fertigenden Anzahl von Teilen angepaßt ist. Beim Einsatz von Kunststoffwerkzeugen ist zu beachten, daß der umzuformende Blechwerkstoff maßgeblichen Einfluß auf den Verschleiß hat. Oberflächenveredelte Bleche, die zum Beispiel elektrolytisch verzinkt oder organisch beschichtet sind, erwiesen sich als besonders geeignet, da hierbei nur ein minimaler Verschleiß auftritt. Für die Umformung unbeschichteter Stahlbleche insbesondere höherfester Güte bietet es sich hingegen an, Galvanowerkzeuge anzufertigen. Der Fertigungsaufwand ist zwar höher, es können jedoch gerade bei diesen Blechwerkstoffen beträchtliche Standzeiten erzielt werden.

Neben einem guten Verschleißverhalten weisen die untersuchten Kunststoffe auch ein sehr gutes Reibverhalten auf. Die Reibwerte, die mit Kunststoffen erzielt werden, sind deutlich geringer als die, welche mit Stahlwerkzeugen erzielt werden. Die einzige Ausnahme stellen organisch beschichtete Bleche dar, die Metallpartikel enthalten und zu erhöhten Reibwerten führen. Durch eine zusätzliche Trockenschmierstoffschicht können hierbei die Reibwerte jedoch auf ein Minimum gesenkt und es kann auf flüssige Schmiermittel verzichtet werden. Besonders vorteilhaft erweisen sich Kunststoffe für die Aluminiumblechumformung, da hierbei keine Neigung zu Kaltaufschweißungen auf den Werkzeugen festgestellt werden konnte.

Es konnte gezeigt werden, daß die Ergebnisse von FEM-Berechnungen des Tiefziehens mit Kunststoffwerkzeugen sehr gut mit experimentellen Untersuchungen übereinstimmen. Dabei ist es ausreichend, ein linear elastisches Stoffgesetz sowie Tetraederelemente zu verwenden. Die Nachgiebigkeit der Kunststoffe führt zu einer gleichmäßigen Verteilung der Flächenpressung im Flansch, was den Aufwand für das Eintuschieren von Kunststoffwerkzeugen überflüssig macht. Darüber hinaus können mit Hilfe der Simulation Deformationen der Werkzeuge vorhergesagt werden. Dadurch ist es möglich, ein geeignetes Herstellungsverfahren für die Matrizen auszuwählen. Als nachteilig erwiesen sich das aufwendige Vorbereiten des FE-Modells sowie die langen Rechenzeiten, die bei der Simulation des Tiefziehens mit Kunststoffwerkzeugen erforderlich sind. Verbesserte Simulationsprogramme und insbesondere schnellere und parallel arbeitende Prozessoren werden die erforderlichen Rechenzeiten künftig reduzieren.

Anhand eines Versuchswerkzeugs aus Kunststoff konnte gezeigt werden, daß trotz der Elastizität des Werkzeugs maßhaltige Teile aus einer Aluminiumlegierung gezogen werden können und daß auch nach fünfhundert Tiefziehoperationen kein Werkzeugverschleiß auftritt.

Darüber hinaus konnte demonstriert werden, daß sich Kunststoffwerkzeuge bei geeigneter Werkstoffauswahl auch für die Umformung von Magnesiumblechen bei erhöhten Temperaturen eignen ($T = 225\text{ °C}$).

Tiefziehversuche mit Galvanoschalenwerkzeugen haben gezeigt, daß diese Werkzeuge ebenfalls für die Fertigung mittlerer Serien geeignet sind. Die Stärken dieser Technologie liegen insbesondere im Bereich der Umformung unbeschichteter sowie höherfester Blechwerkstoffe.

Die positiven Ergebnisse insbesondere bei der Umformung von Aluminium- und organisch beschichteten Blechen hinsichtlich des Verschleißes und der Reibeigenschaften machen den Einsatz von Kunststoffwerkzeugen für die Fertigung kleiner und mittlerer Serien sinnvoll. Hierbei könnten Schmiermittel oder aber auch Ziehstufen eingespart werden und die Prozeßsicherheit kann erhöht werden. Leistungsfähige mechanische Fügeverfahren machen die Weiterverarbeitung von Blechteilen mit nichtschweißbaren organischen Beschichtungen möglich.

In der Zukunft ist damit zu rechnen, daß herkömmliche Stahl- und Graugußwerkzeuge durch Kunststoff- und Galvanotiefziehwerkzeuge abgelöst werden, wenn es darum geht, kleine und mittlere Serien kostengünstig zu fertigen. Neben wirtschaftlichen Vorteilen ergeben sich aus den geringen Reibwerten und der geringen Adhäsionsneigung von Kunststoffwerkzeugen dabei auch technologische Vorteile. Insbesondere bei der Verarbeitung von Aluminium und organisch beschichteten Blechen bieten sich Kunststoffwerkzeuge als alternative Werkzeugtechnologie an.

10 Bilder und Tabellen

Werkzeugkosten für eine Karosserie, bestehend aus etwa 400 Blechteilen: ca. 300 Mio. DM

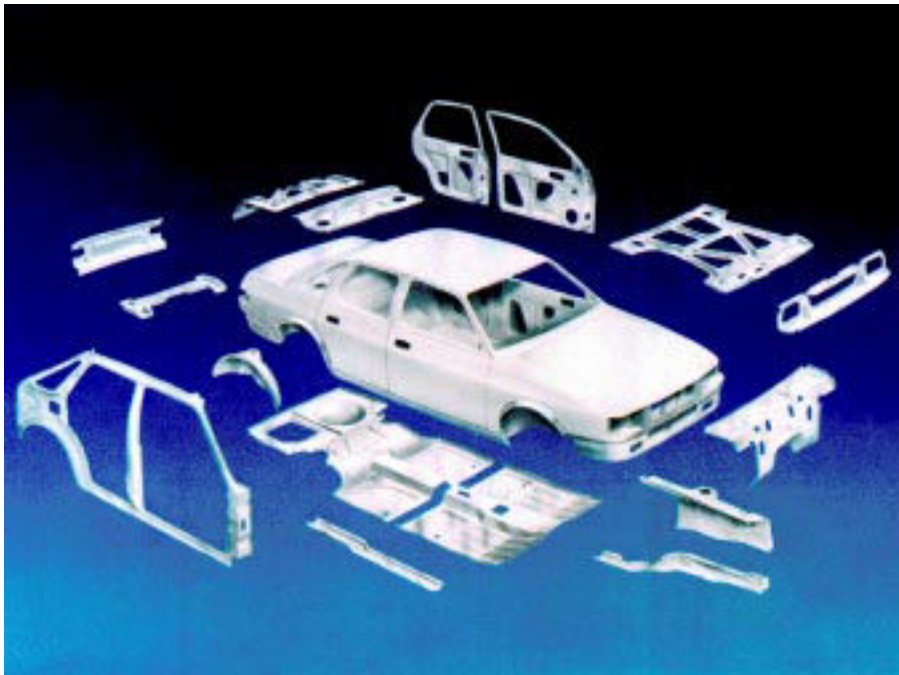


Bild 1: Blechteile einer Automobilkarosserie (Quelle: Soudronic)

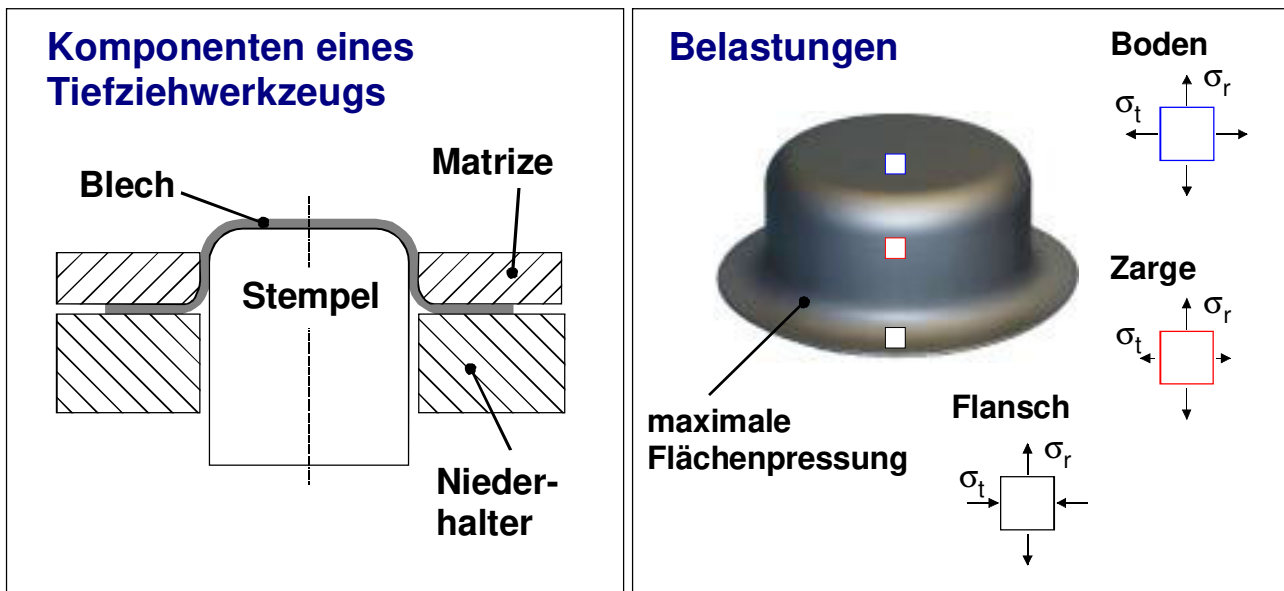


Bild 2: Prinzipieller Aufbau eines Tiefziehwerkzeugs und Belastungen des Teils durch Spannungen und Flächenpressungen

1. Platine einlegen

2. Druckaufbau

3. Fertigformen

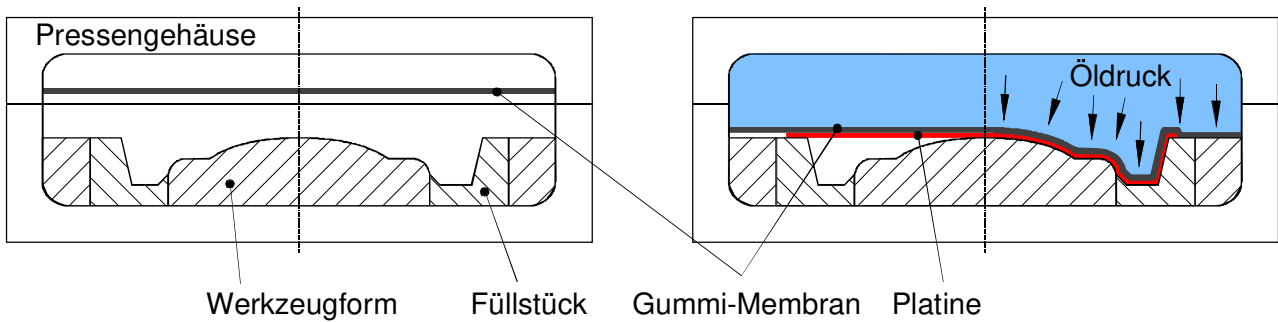


Bild 3: Fluidzell Ziehtechnik [Mind92]

1. Platine einlegen

2. Druck aufbauen und Platine vorrecken

3. Fertigziehen

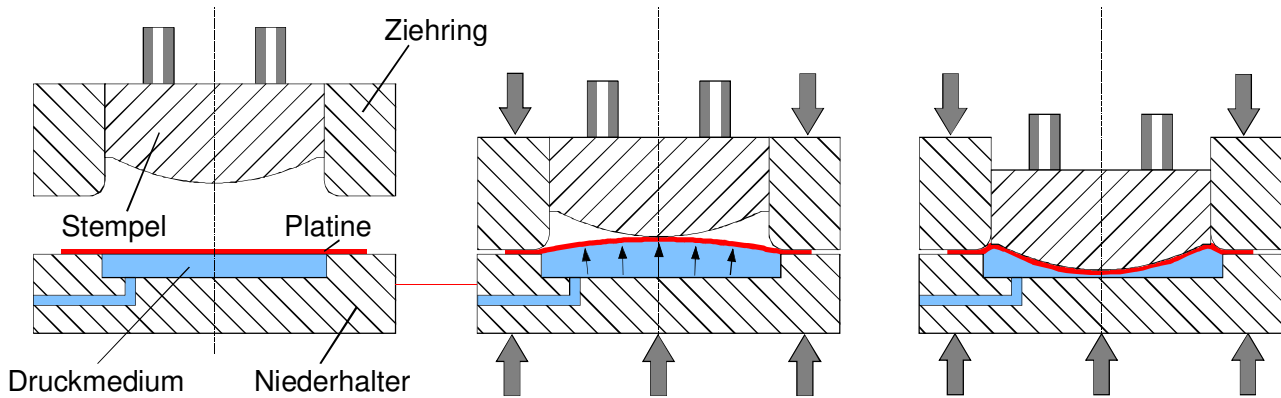


Bild 4: Hydromechanisches Tiefziehen (nach SMG) [Jänc99]

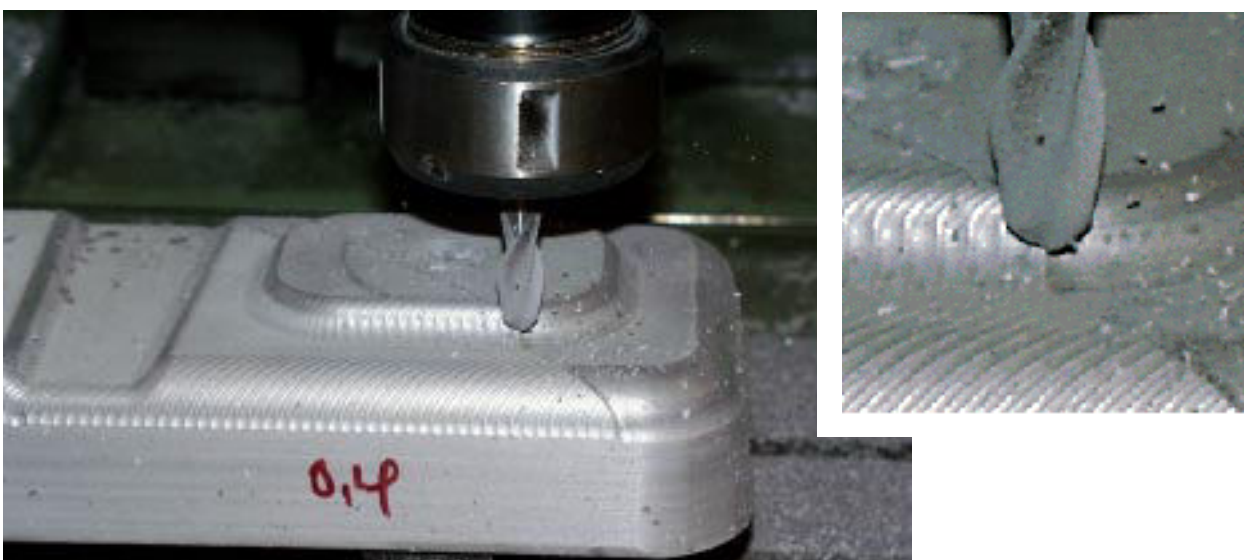


Bild 5: Herstellung von Kunststoffwerkzeugen: Fräsen eines PUR-Stempels

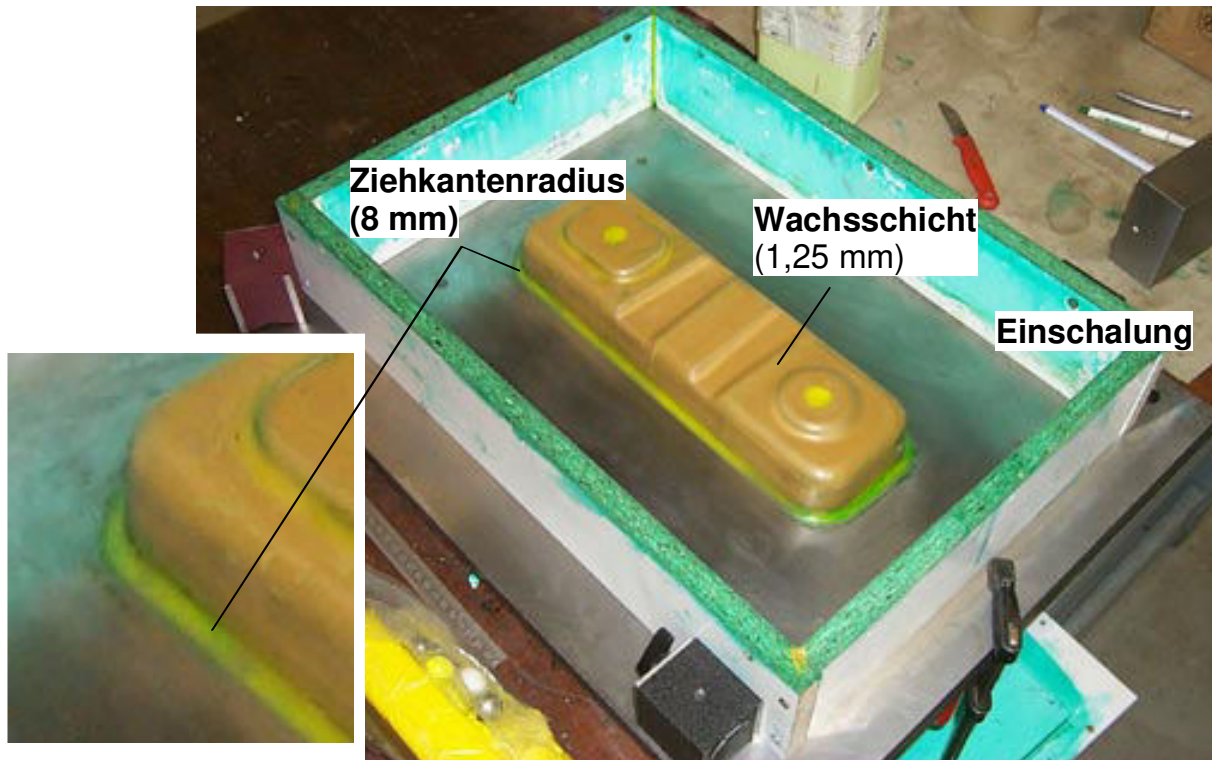


Bild 6: Herstellung eines Kunststoffwerkzeugs: Vorbereiten der Gießform

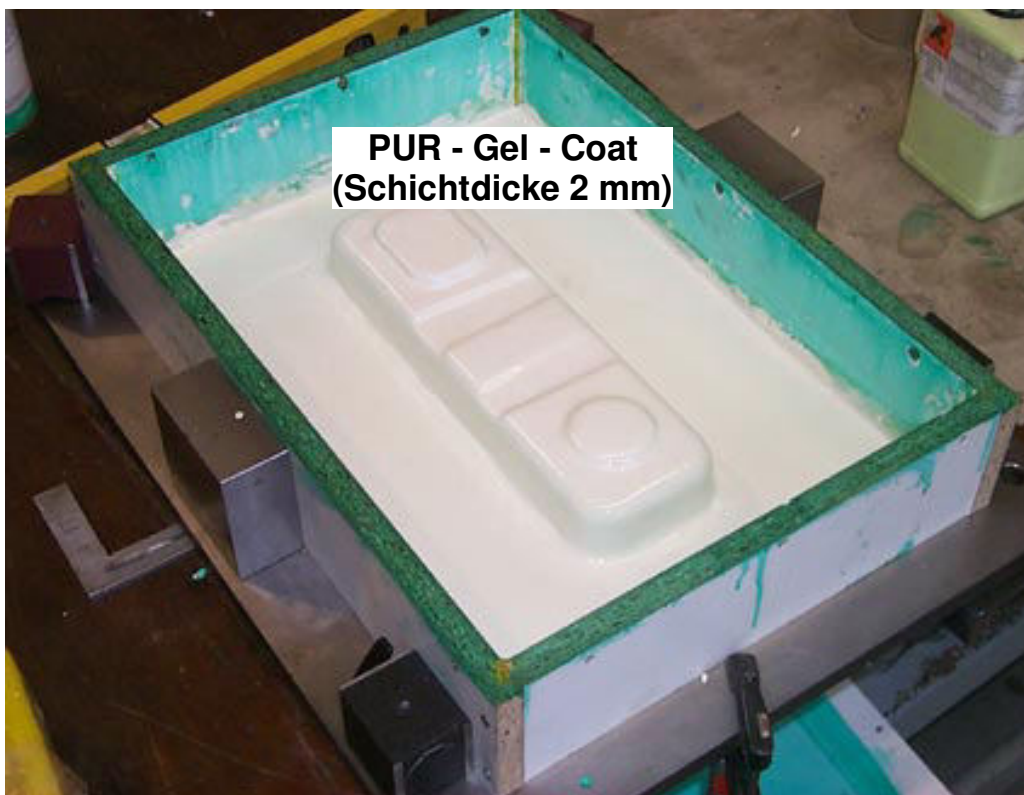


Bild 7: Herstellung von Kunststoffmatrizen: Auftragen eines ca. 2 mm dicken PUR-Gel-Coats

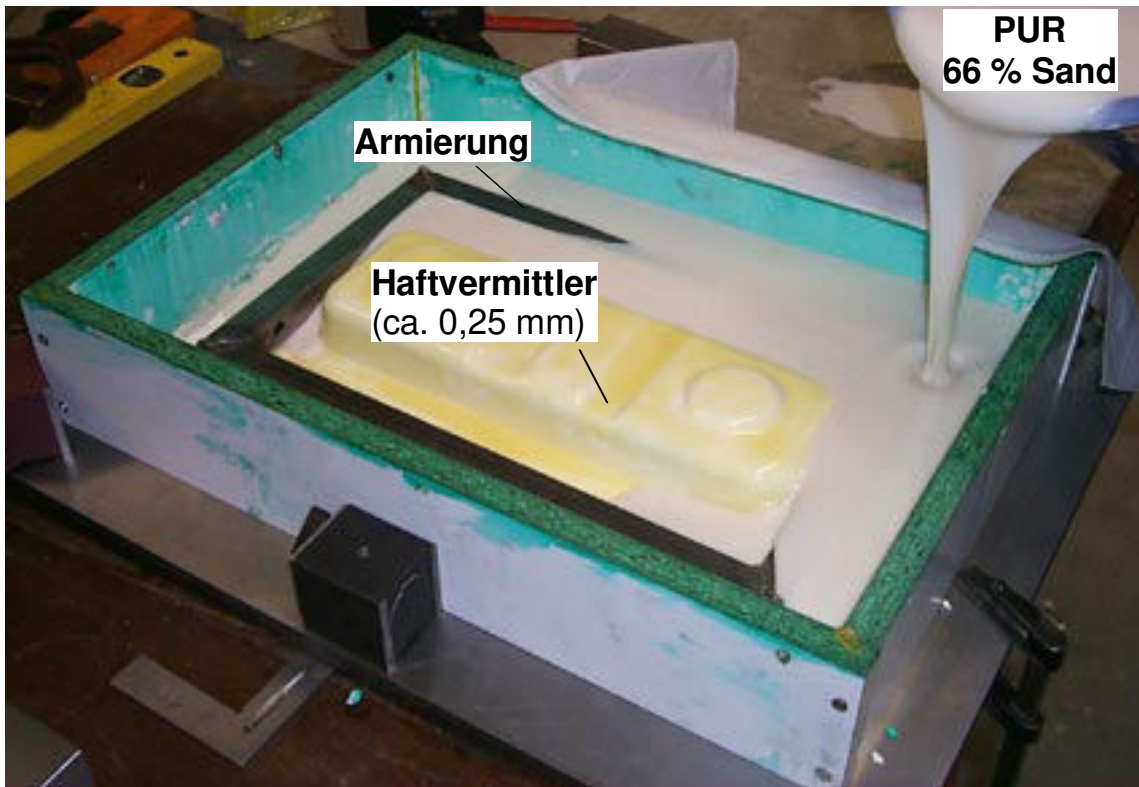


Bild 8: Hinterfüllen des Werkzeugs mit einem druckfesten PUR-Quarzsandgemisch

Frontgußtechnik

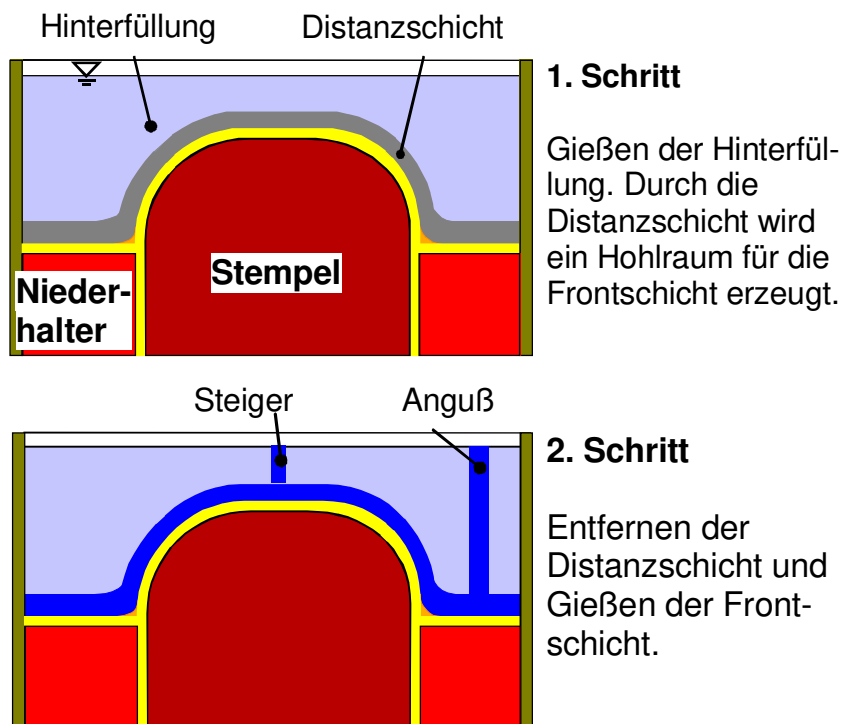


Bild 9: Herstellung von Tiefziehwerkzeugen im Frontgußverfahren

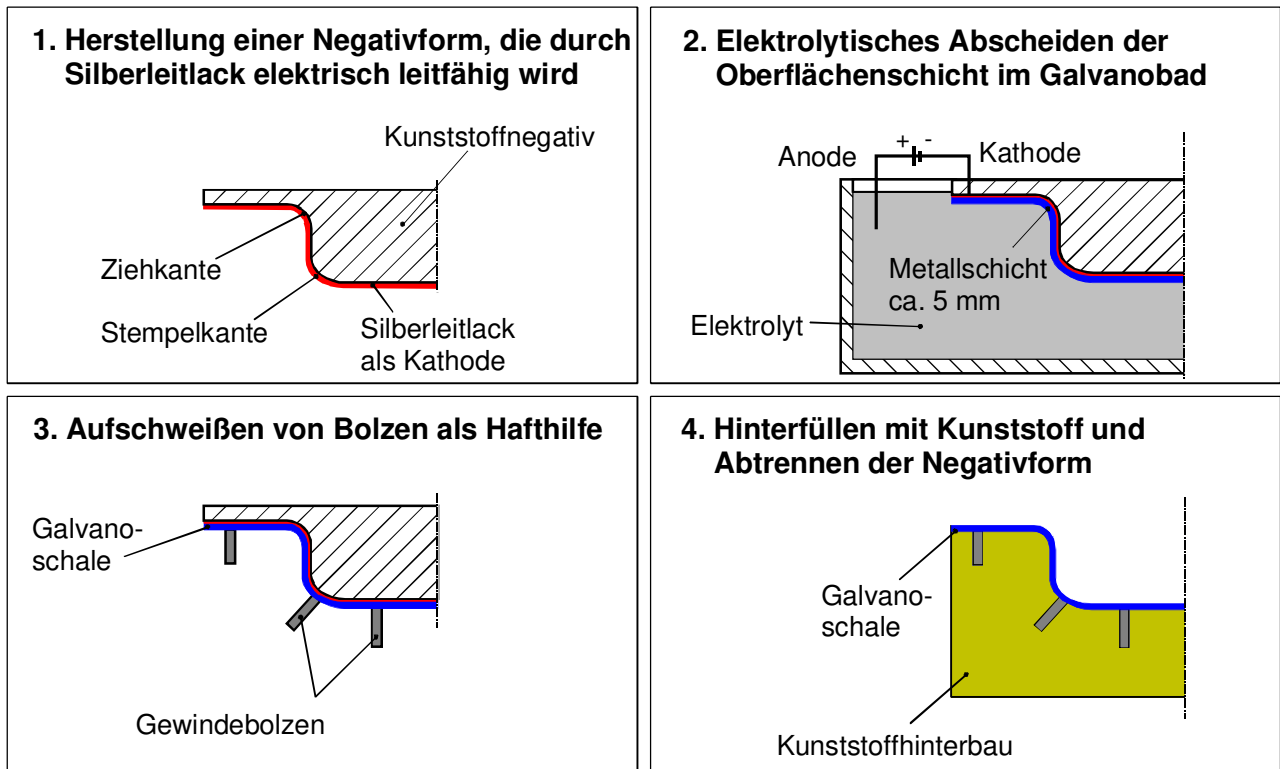


Bild 10: Herstellung von Galvanoschalen

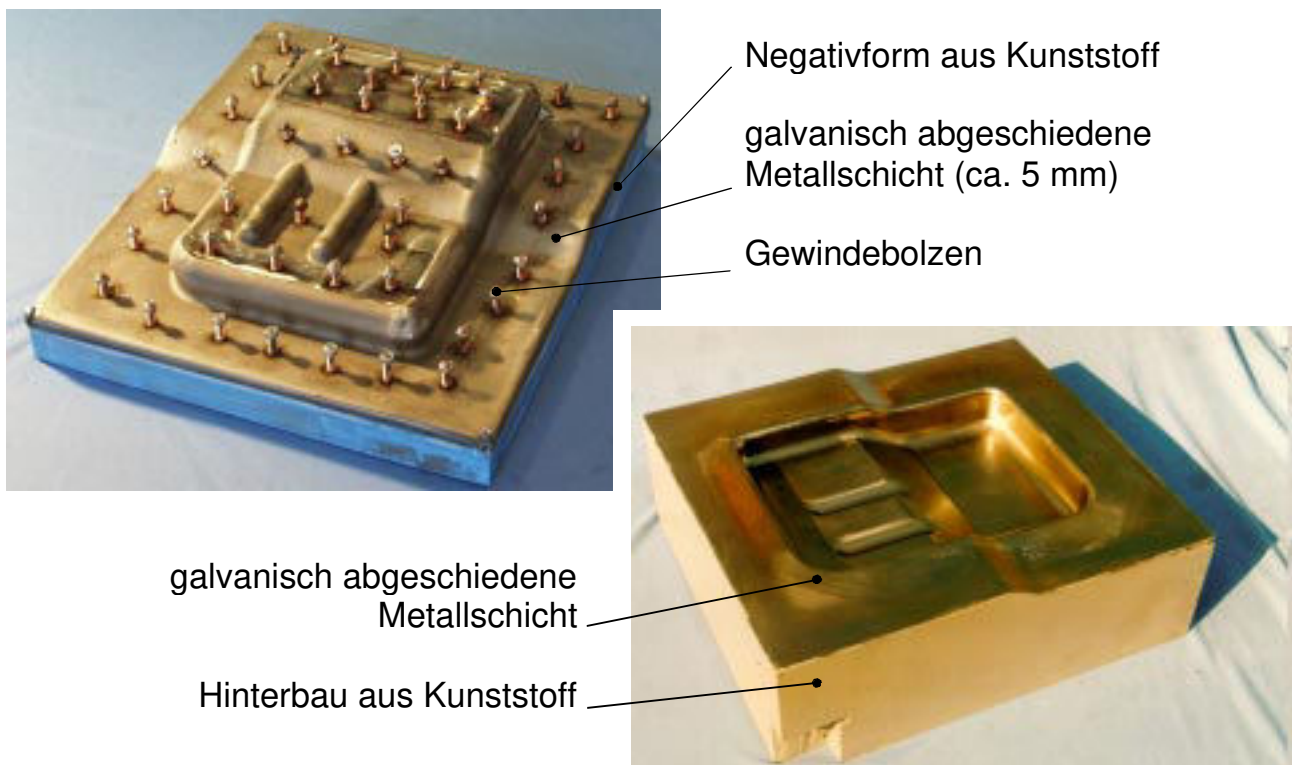


Bild 11: Galvanoschale und fertiges Galvanotiefziehwerkzeug

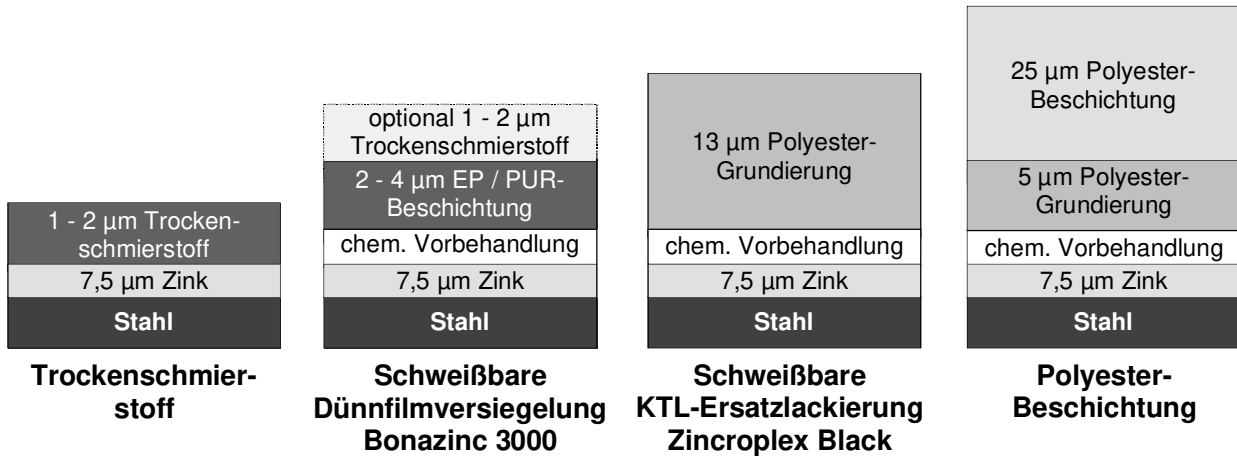


Bild 12: Aufbau von organischen Beschichtungssystemen für Stahlfeinbleche (nach: Salzgitter AG)

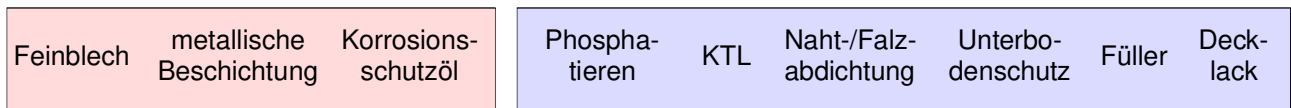


Blechhersteller

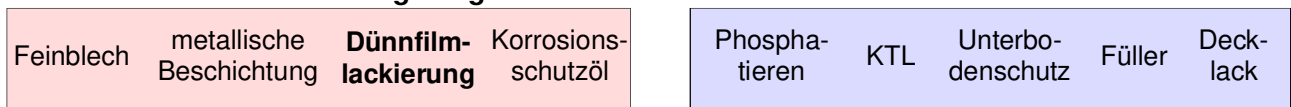


Lackiererei

Konventionell



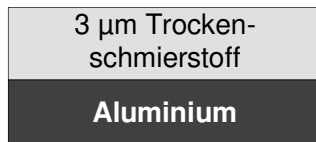
schweißbare Dünnschichtversiegelung



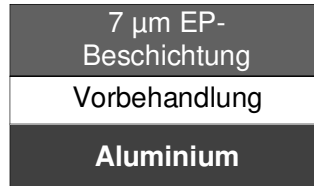
KTL-Ersatzlackierung



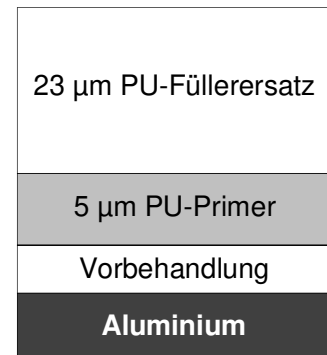
Bild 13: Verkürzung der Prozeßkette durch den Einsatz von beschichteten Feinblechen (nach: Salzgitter AG)



Trockenschmierstoff



Schweißbare Dünnsfilmlackierung Bonazinc 2004



KTL-Ersatzlackierung

Vorbehandlung:

- Bonazinc 2004: AlMg_{0,4}Si_{1,2} No Rinse Chromatierung
- Bonazinc 2004: AlMg_{4,5}Mn_{0,4} Anodische Sperschicht mit No Rinse Ti/Zr – Vorbehandlung
- KTL - Ersatzlackierung: No Rinse Ti/Zr - Vorbehandlung

Bild 14: Aufbau organischer Beschichtungssysteme für Aluminiumfeinbleche (Quelle: Alcan Deutschland)

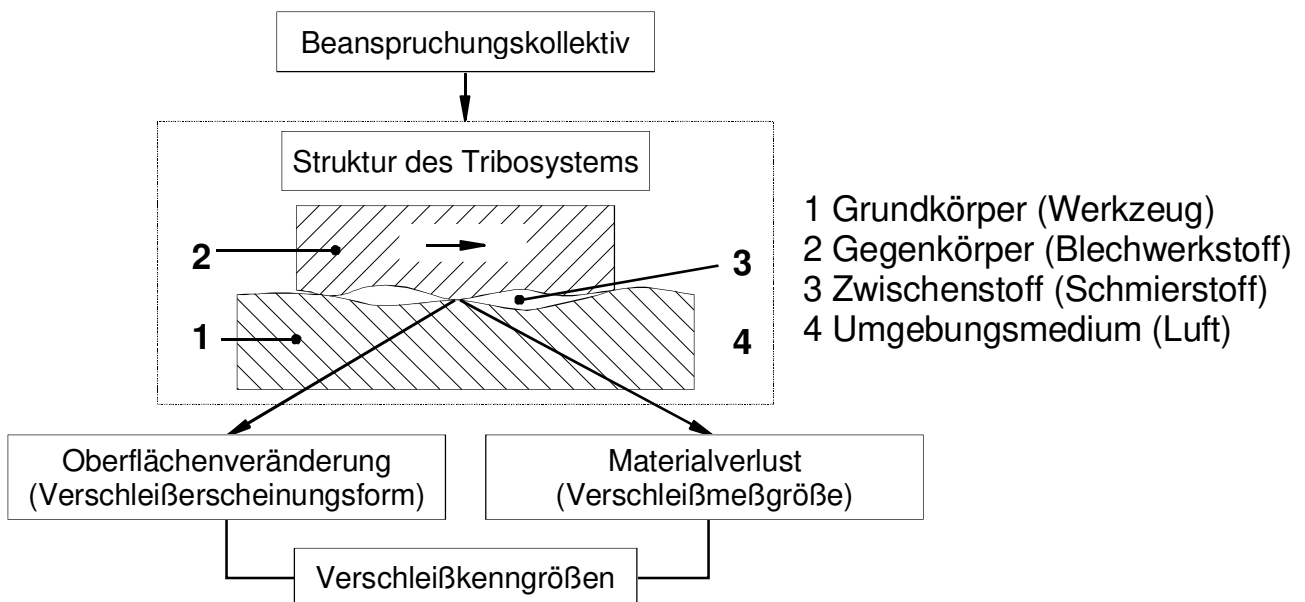


Bild 15: Tribologisches System nach DIN 50320

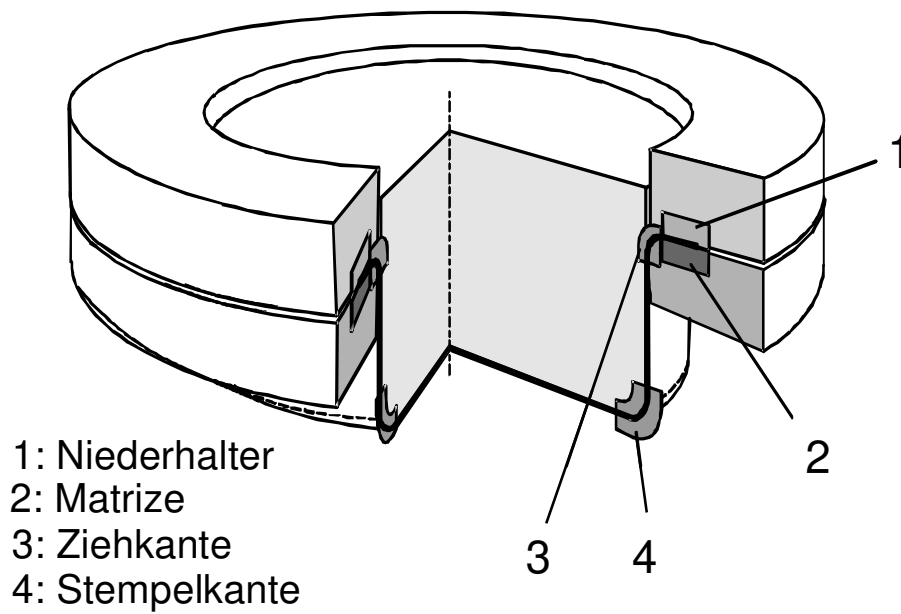


Bild 16: Reibungszonen an einem Tiefziehwerkzeug

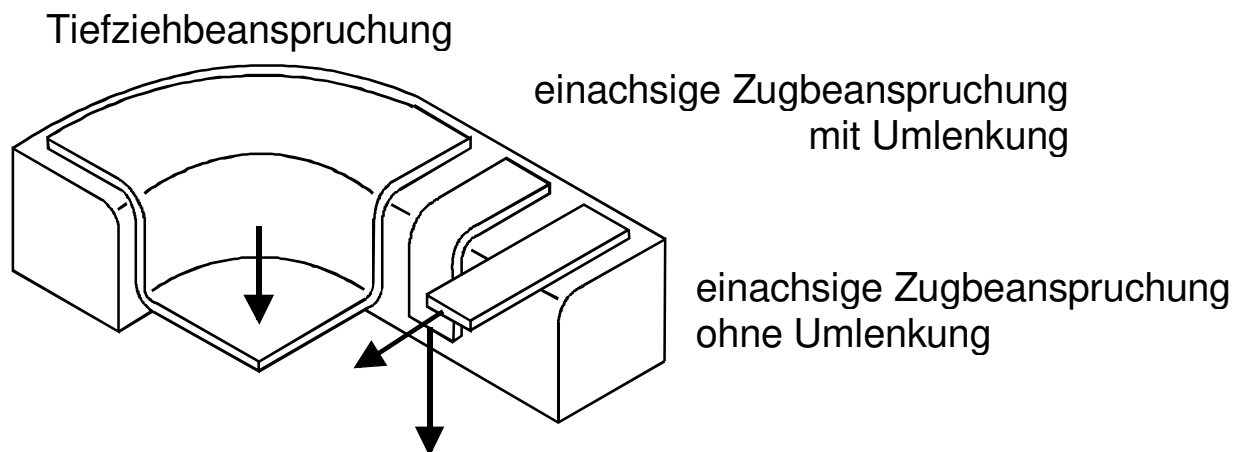


Bild 17: Beanspruchung beim Tiefziehen nach [Blüm79]

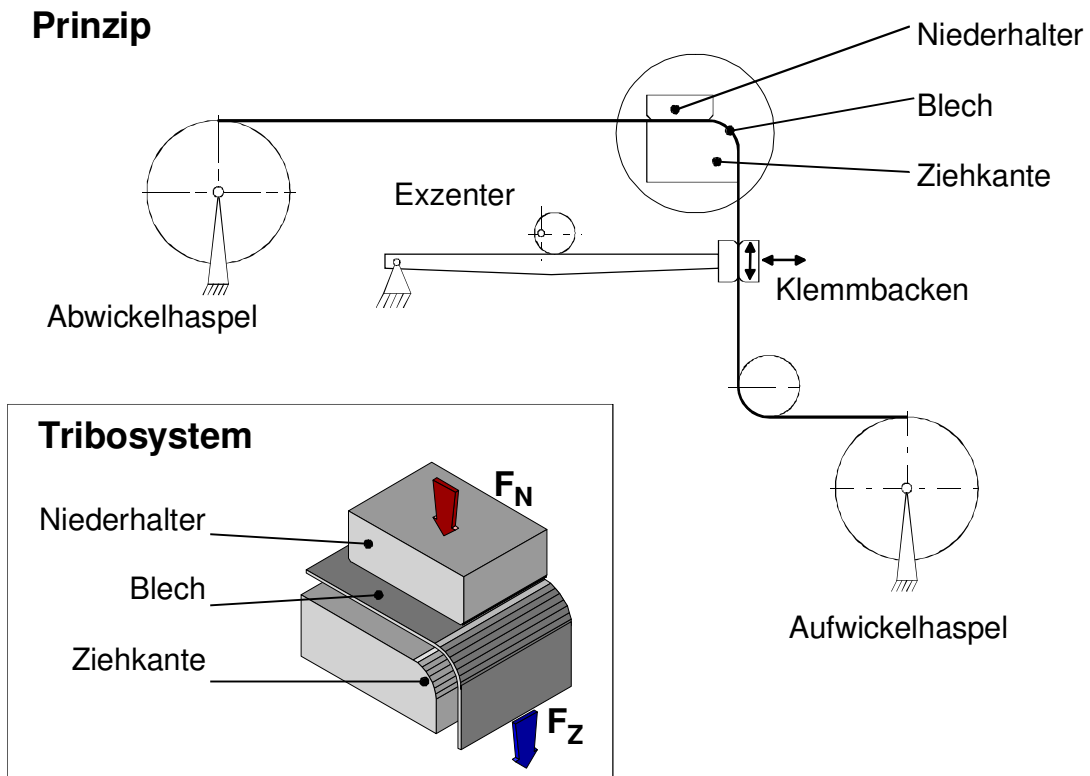


Bild 18: Verschleißprüfstand von [Wosk82]

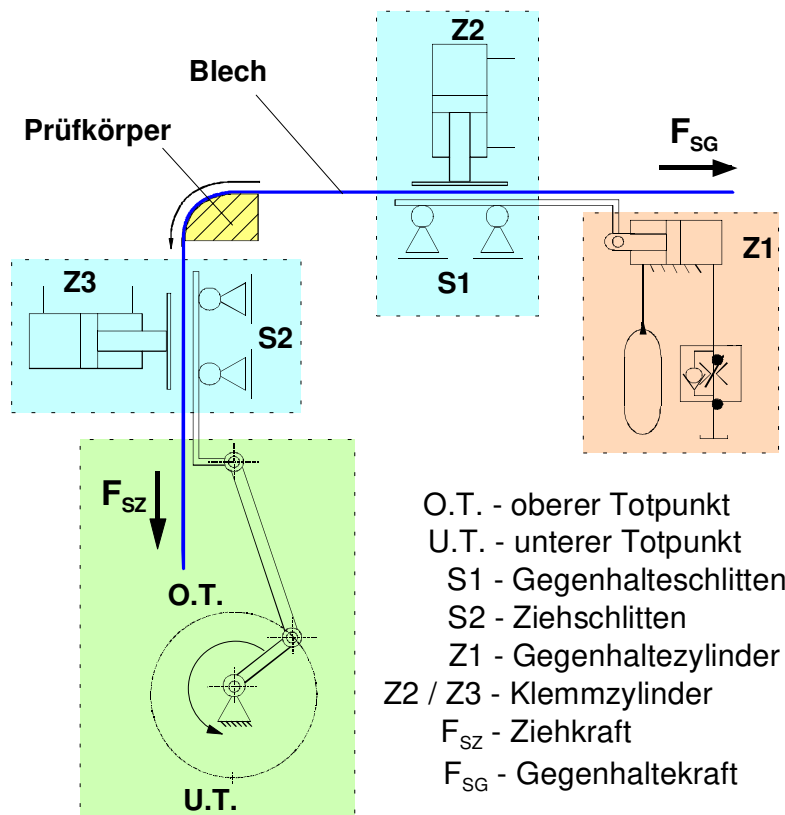


Bild 19: Prinzip des Verschleißprüfstands von [Schu97]

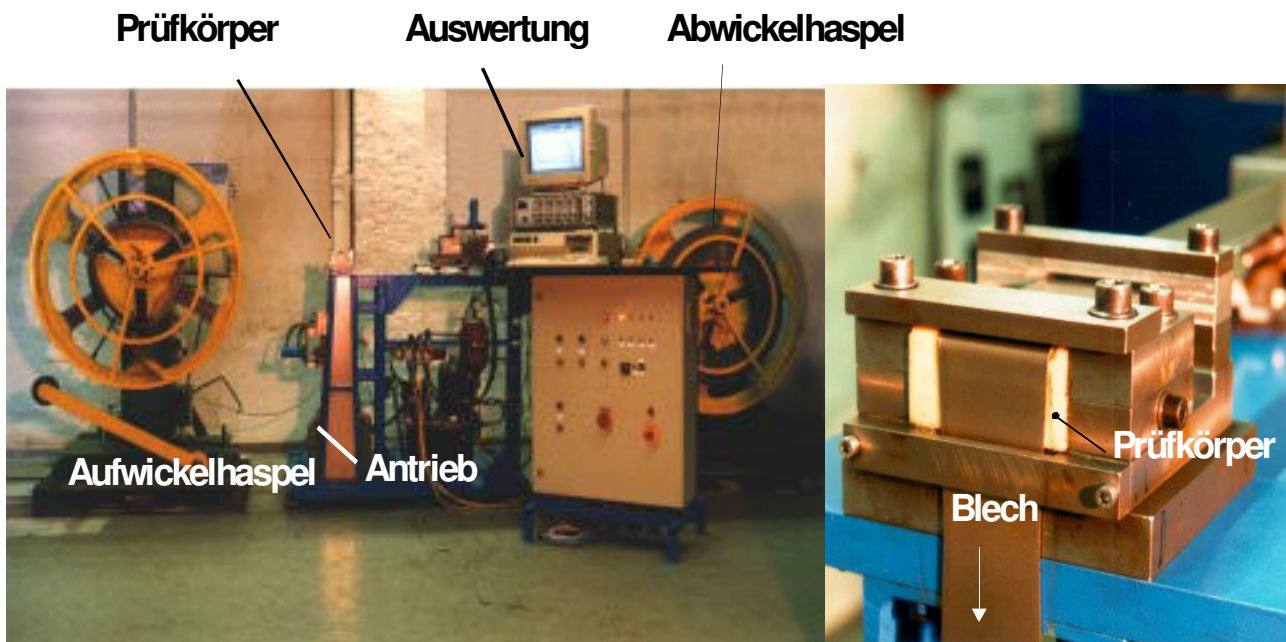


Bild 20: Verschleißprüfstand von [Schu97]

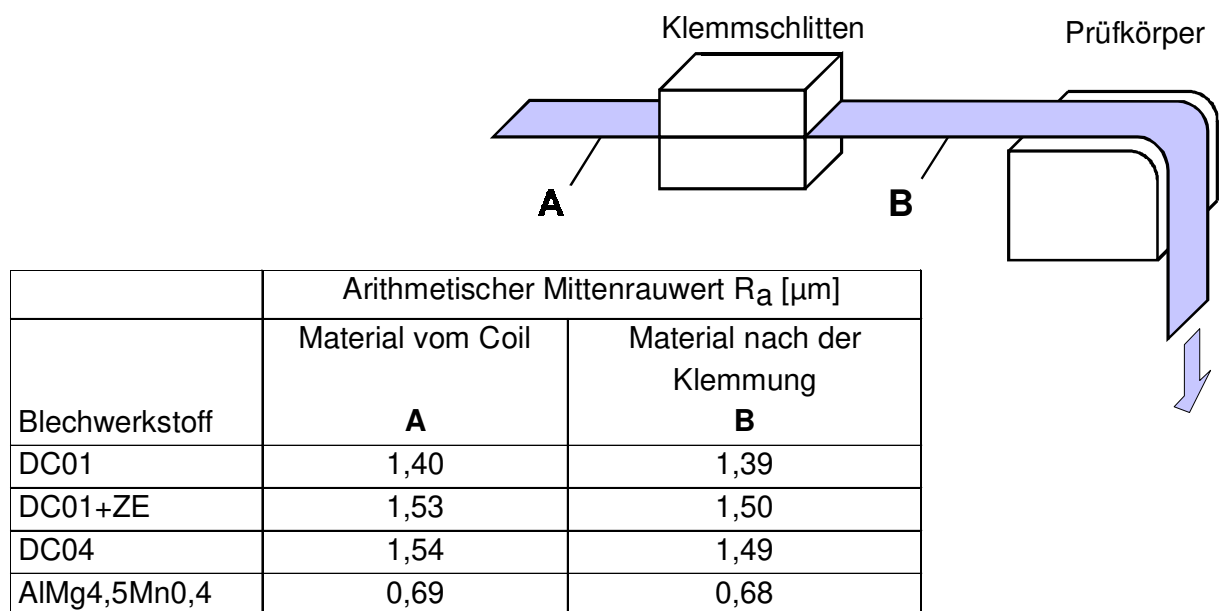


Bild 21: Einfluß der Klemmung auf die Rauheit des Blechs

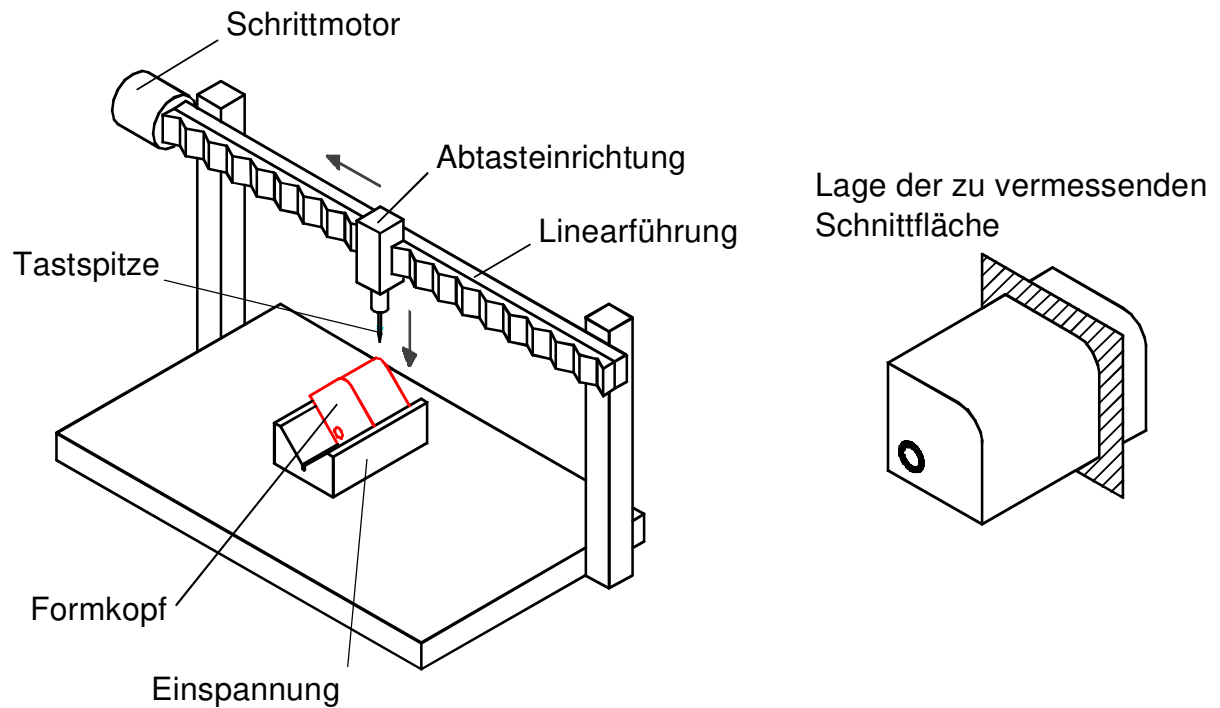


Bild 22: Messen der Prüfkörperkontur

Vor der Verschleiß- untersuchung	Verschleiß- meßgröße	Nach der Verschleiß- untersuchung
	Radienerweiterung R5 (blue circle) R 10 (red circle)	
	Volumenverlust bezogen auf die Probenbreite $\Delta V / b = 15 \text{ mm}^3/\text{mm}$	
	Umfangsänderung $\Delta U = 2 \text{ mm}$	

Bild 23: Verschleißkriterien und Verschleißmeßgrößen

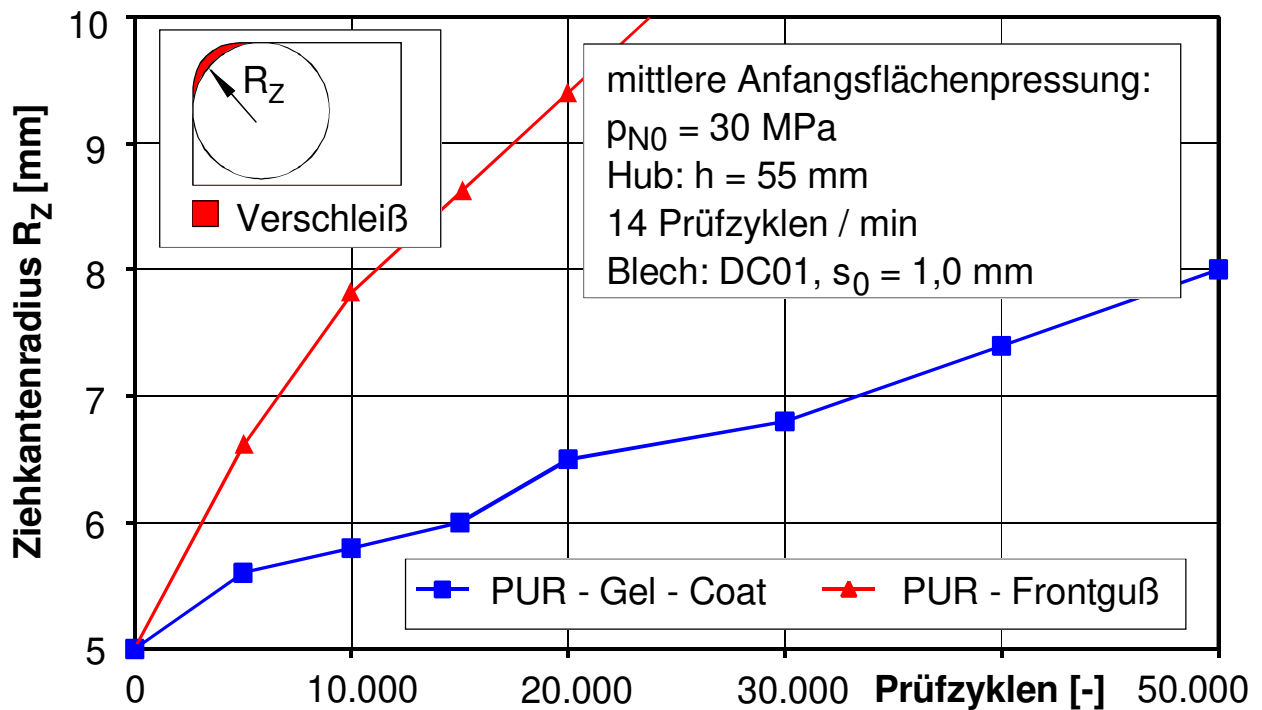


Bild 24: Verschleißverhalten von Frontguß- und Gel-Coat-Prüfkörpern

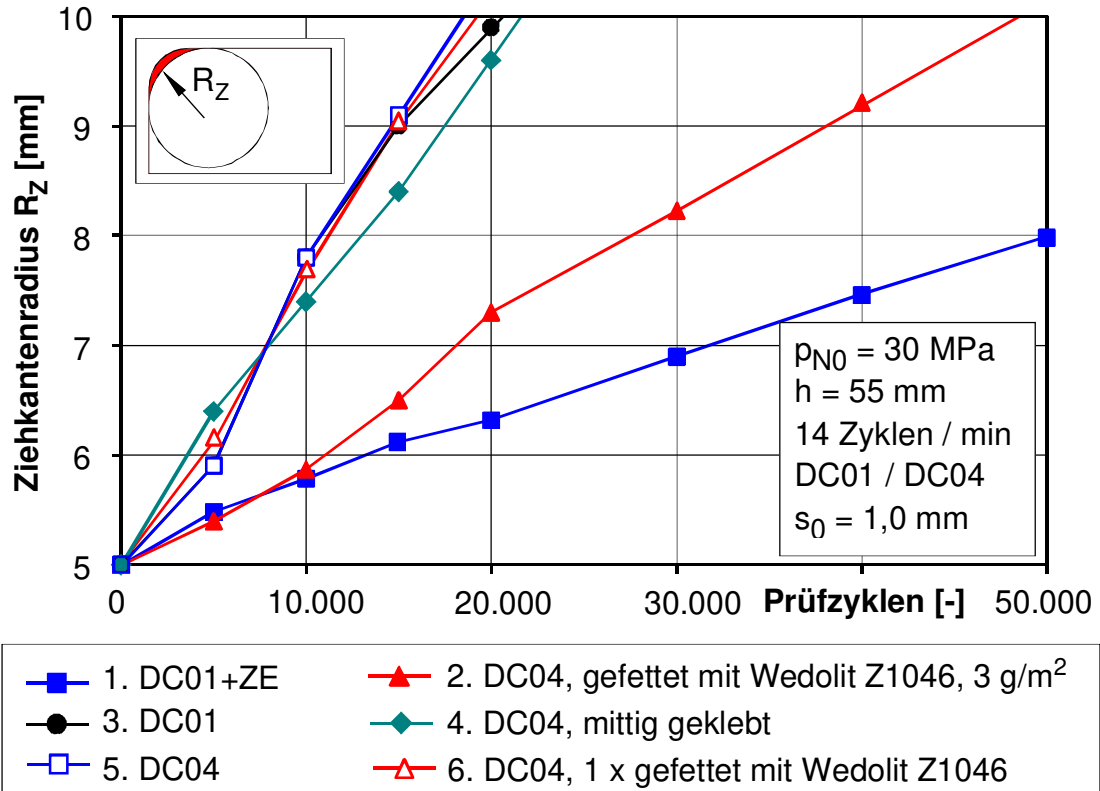


Bild 25: Verschleißverhalten der PUR - Platte 1

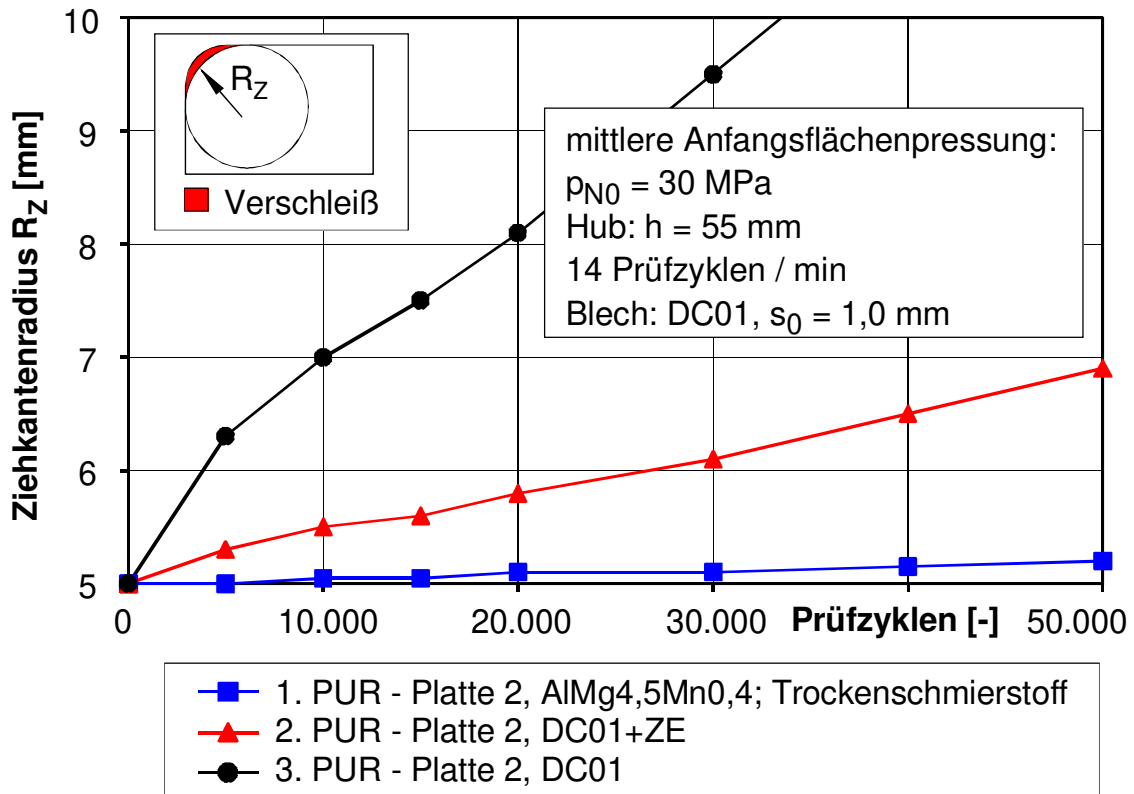
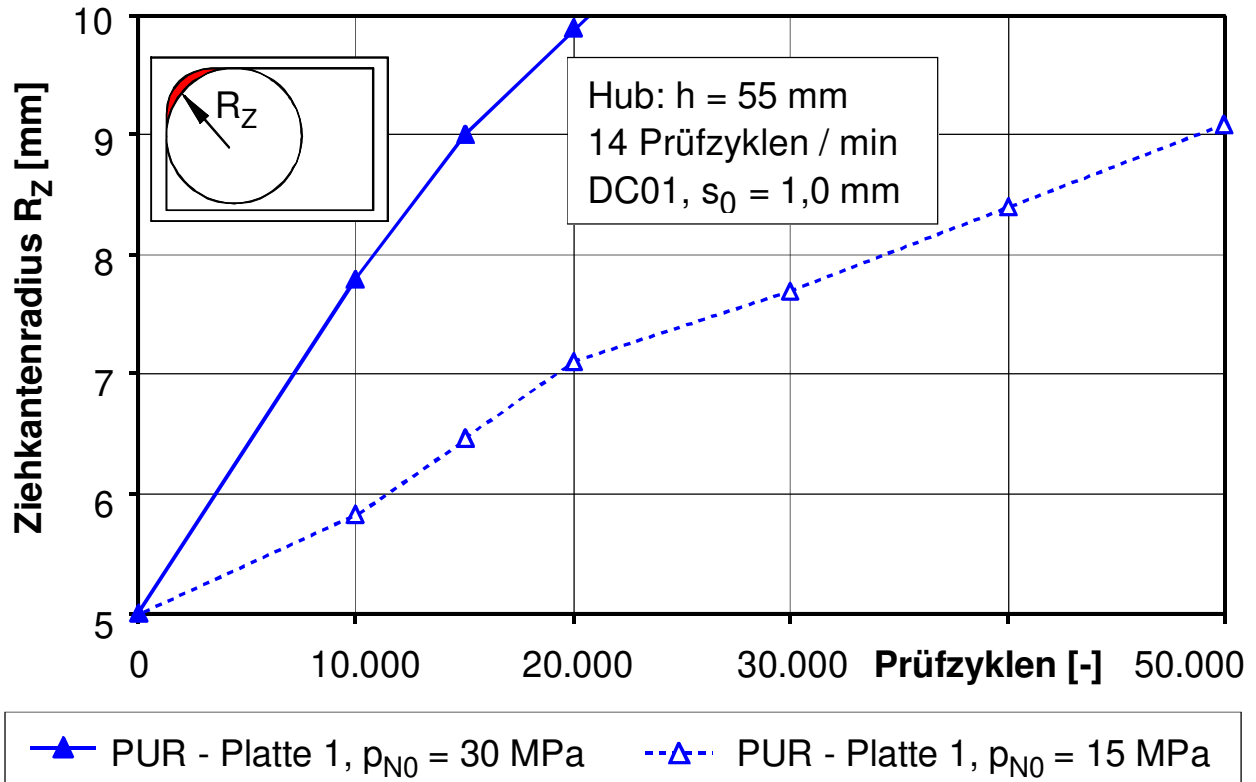


Bild 26: Verschleißverhalten der PUR – Platte 2

Bild 27: Abhängigkeit des Verschleißes von der mittleren Anfangsflächenpressung p_{N0}

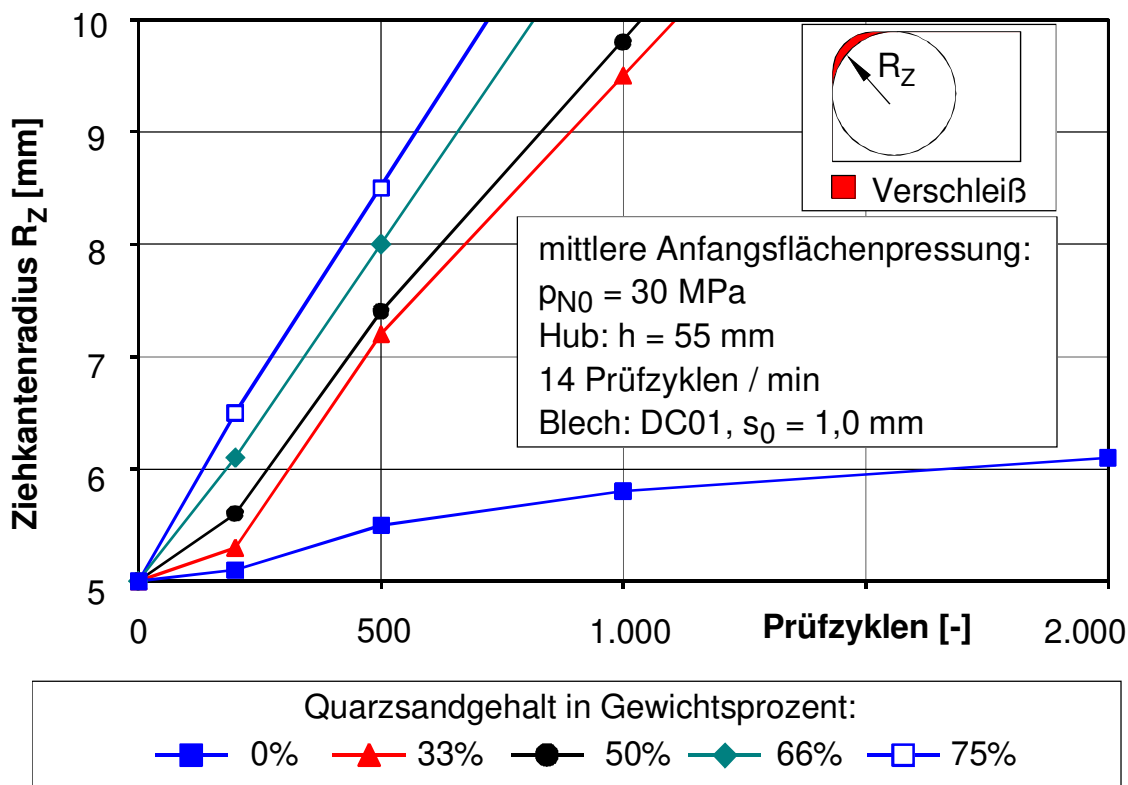


Bild 28: Abhängigkeit des Verschleißverhaltens vom Füllstoffanteil

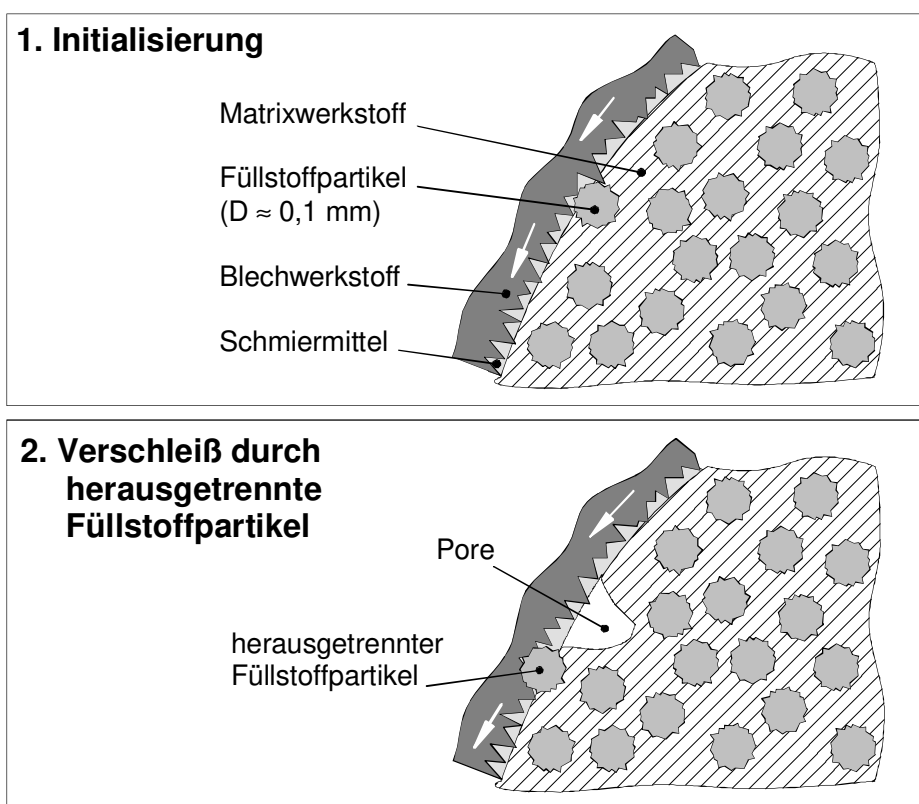


Bild 29: Verschleißinitialisierung und -fortschritt durch Füllstoffe

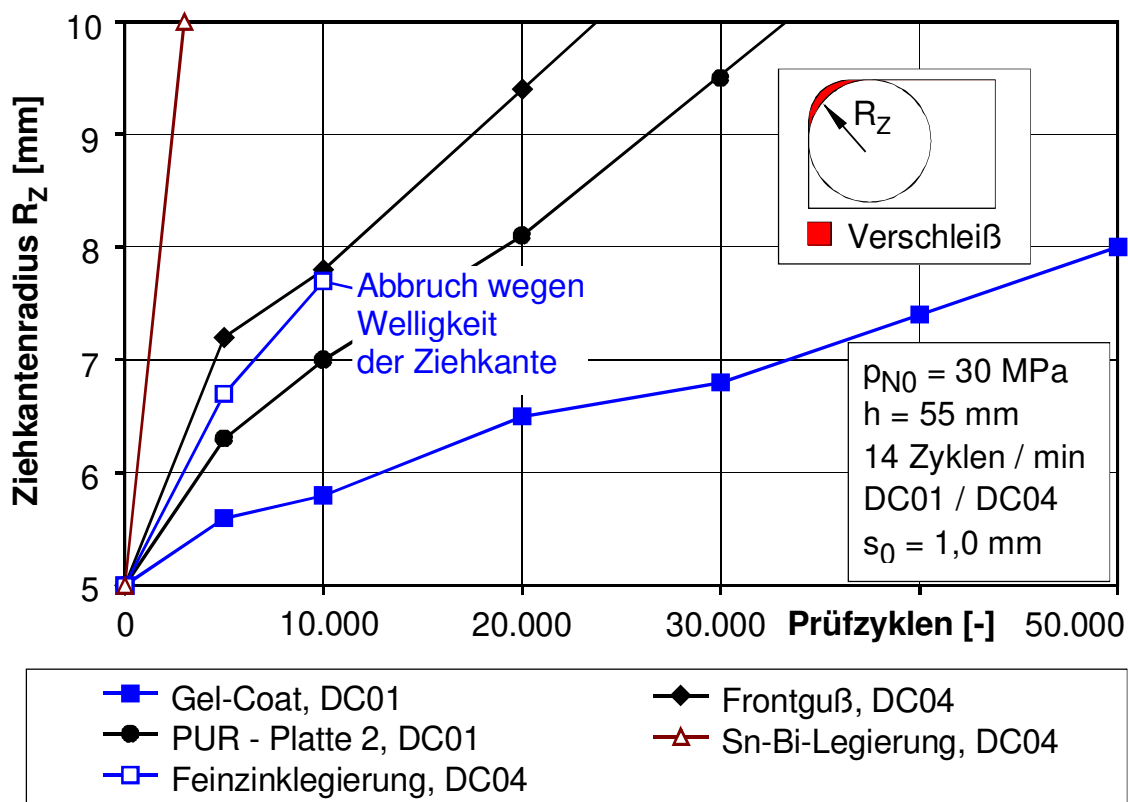


Bild 30: Verschleiß von Kunststoffen im Vergleich zu niedrigschmelzenden Legierungen

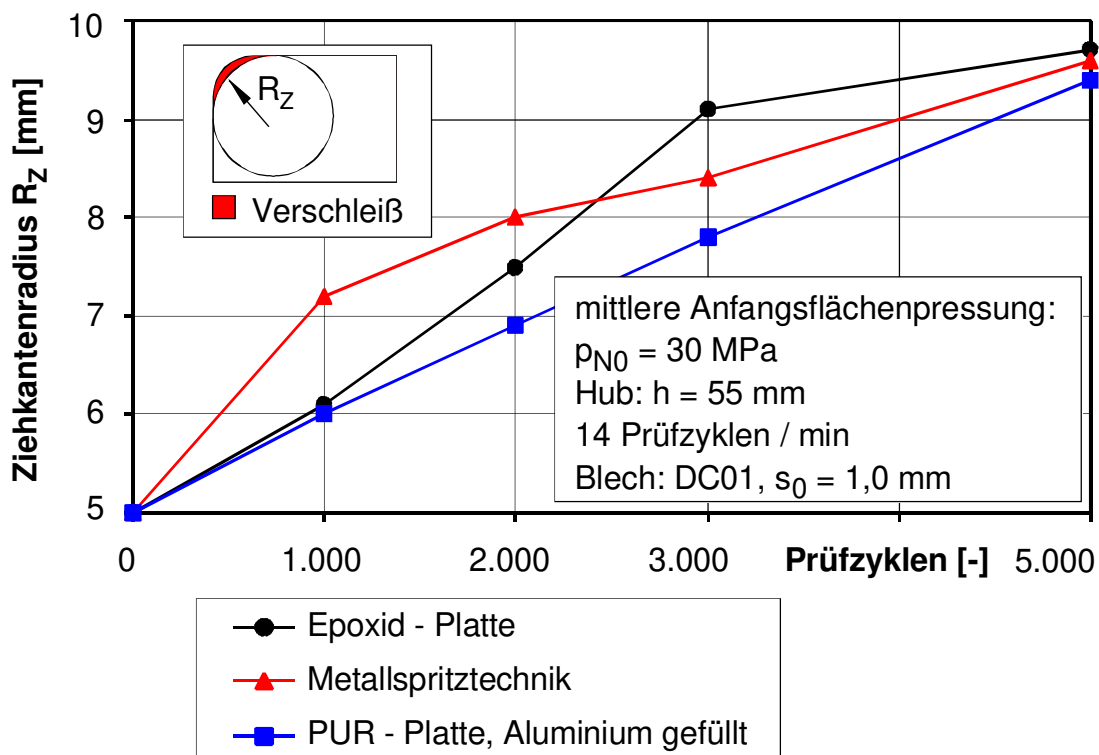


Bild 31: Verschleißverhalten weiterer Probenkörper

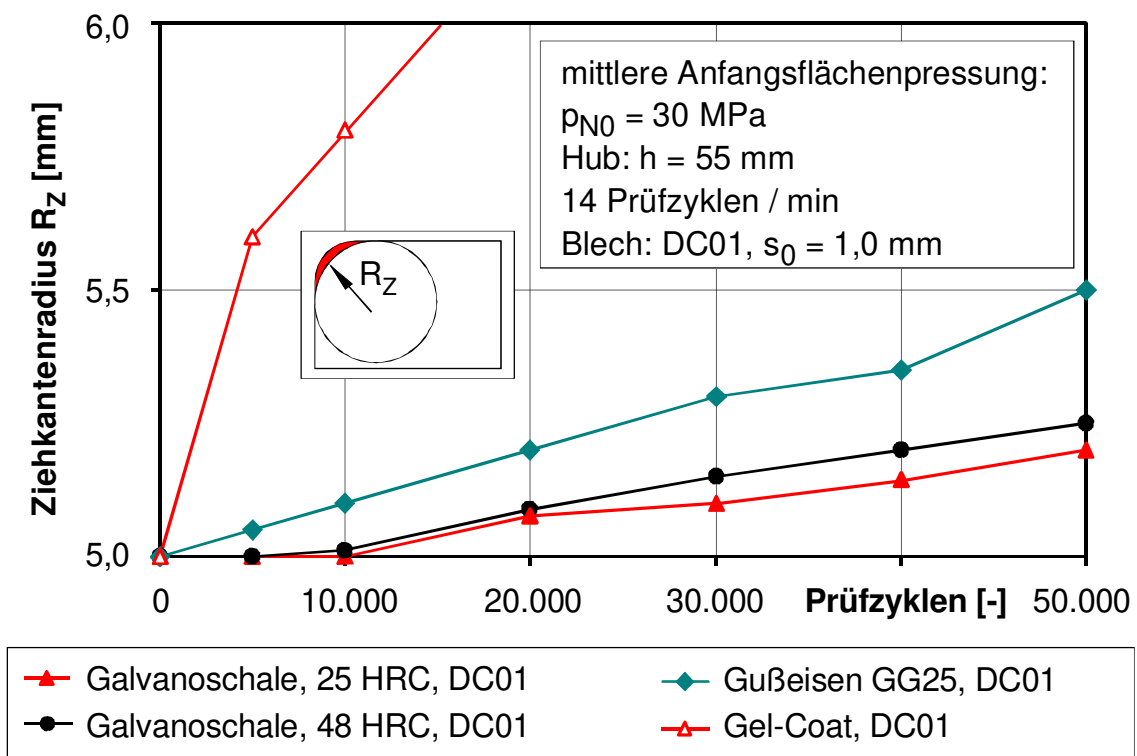


Bild 32: Verschleißverhalten von Galvanoschalen im Vergleich zu Kunststoff und Grauguß

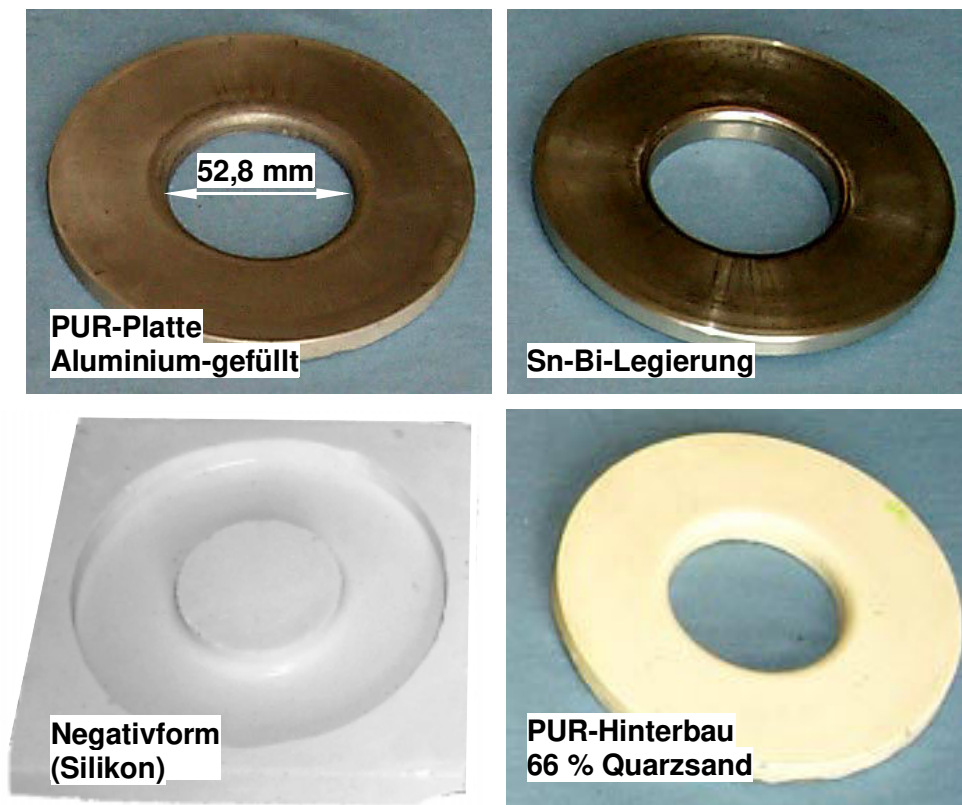


Bild 33: Ziehringe für Verschleißuntersuchungen

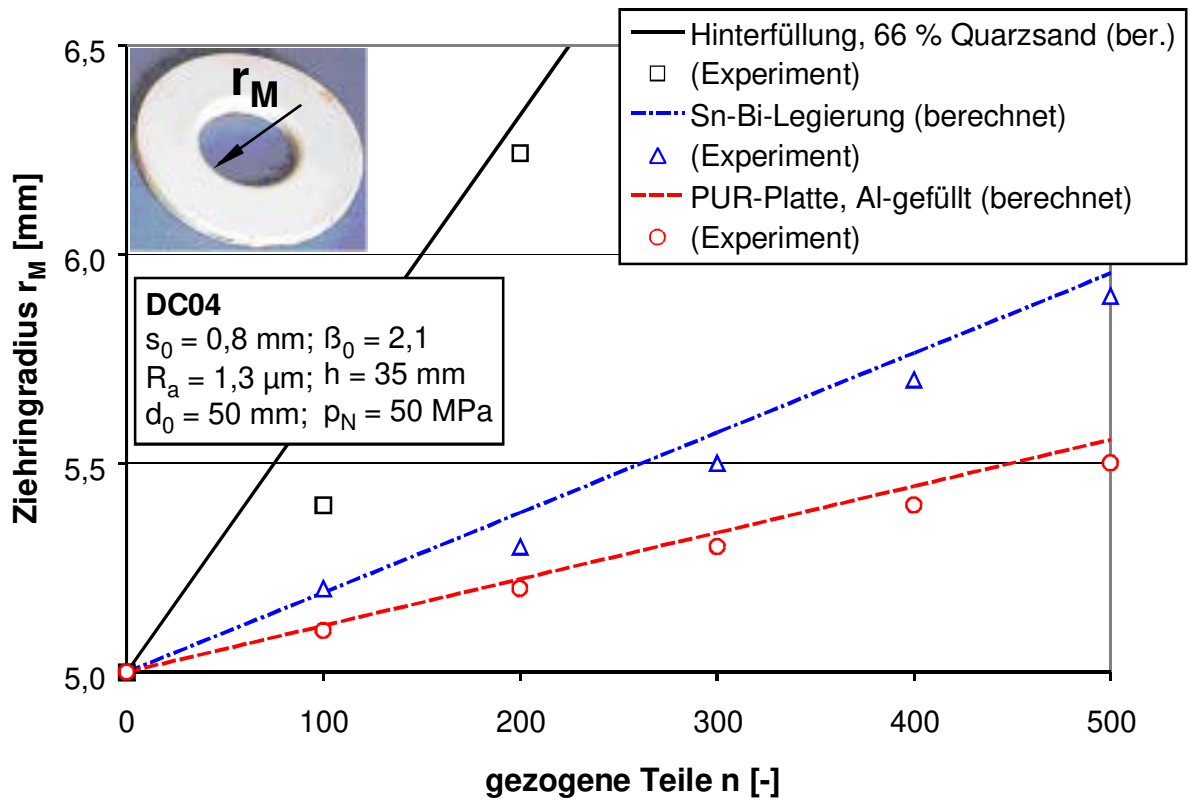


Bild 34: Verschleiß an Ziehringen

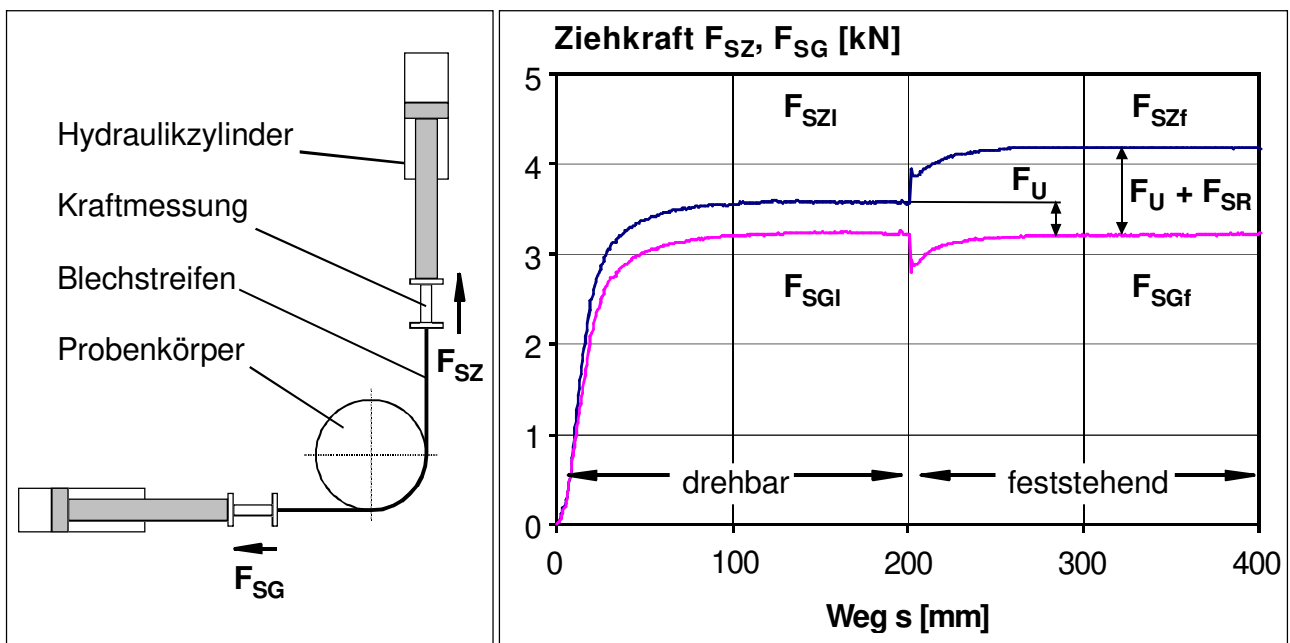


Bild 35: Streifenziehversuch mit Umlenkung nach WITTHÜSER [Witt80]

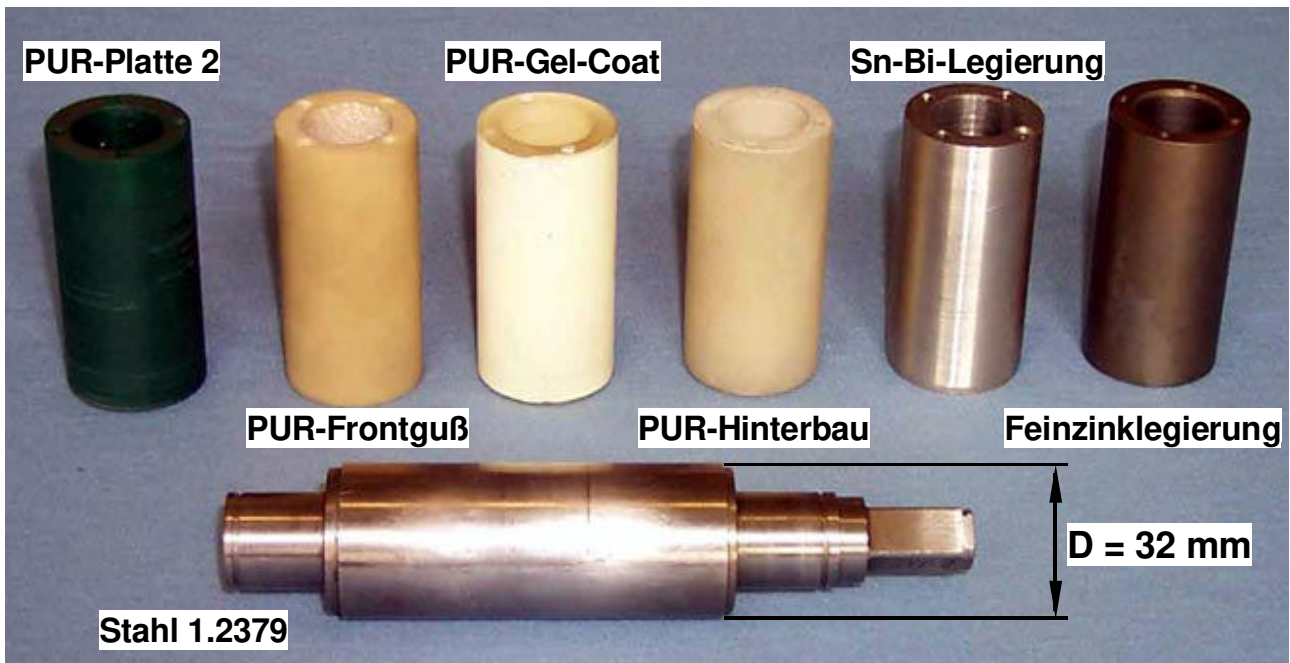


Bild 36: Probenkörper für Reibwertuntersuchungen aus unterschiedlichen Materialien

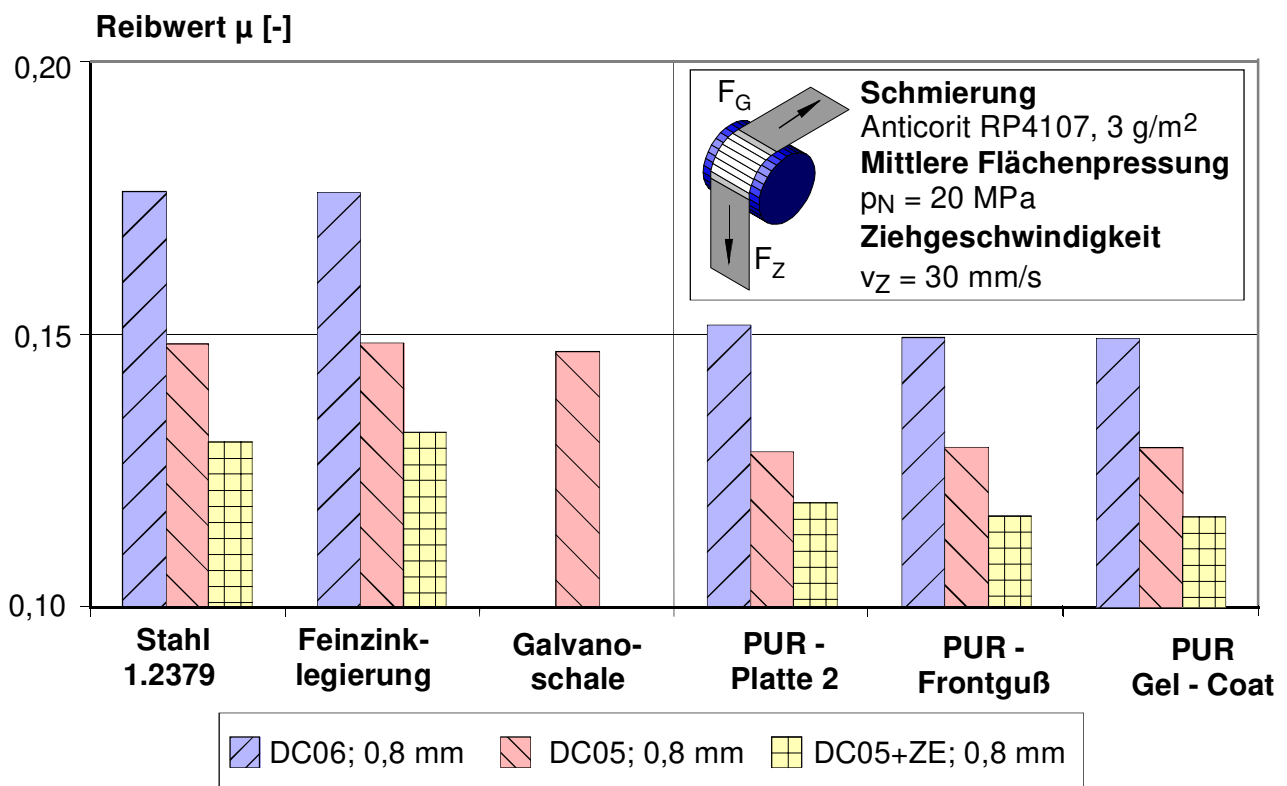


Bild 37: Reibwerte von Stahlblechen mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen

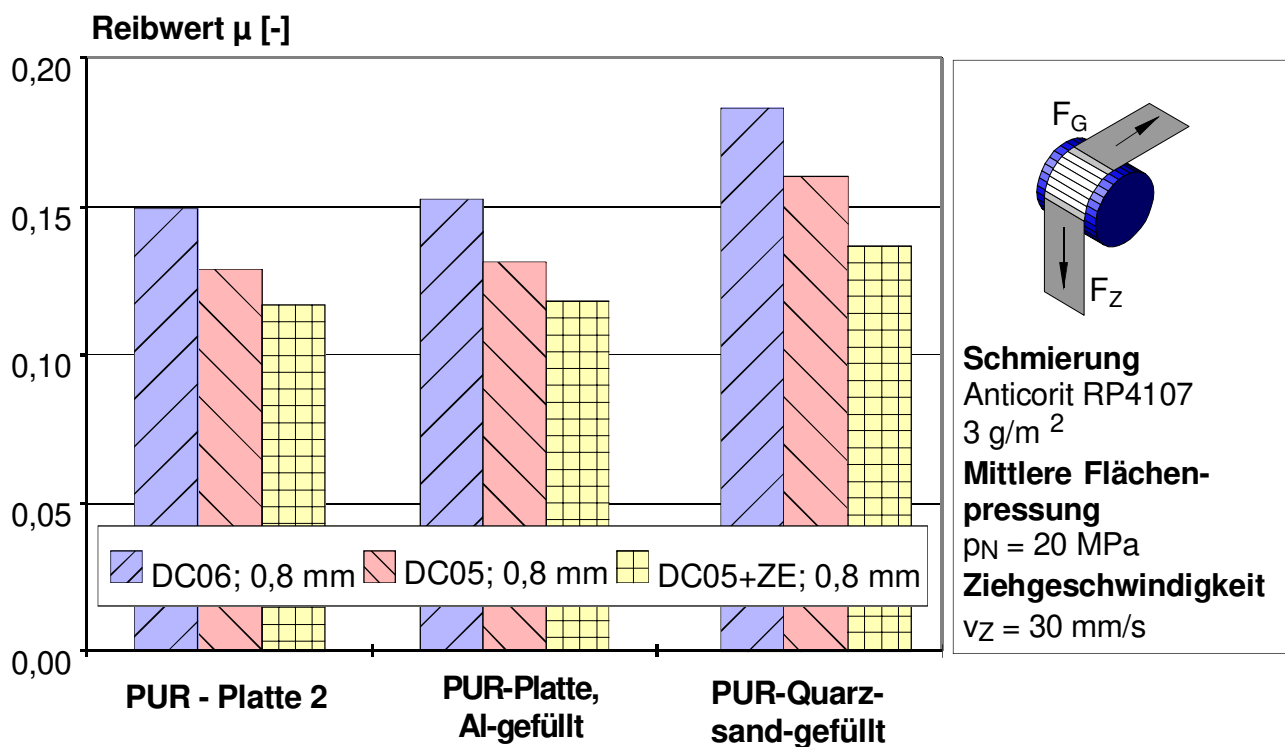


Bild 38: Einfluß von Füllstoffen auf das Reibverhalten von Polyurethan

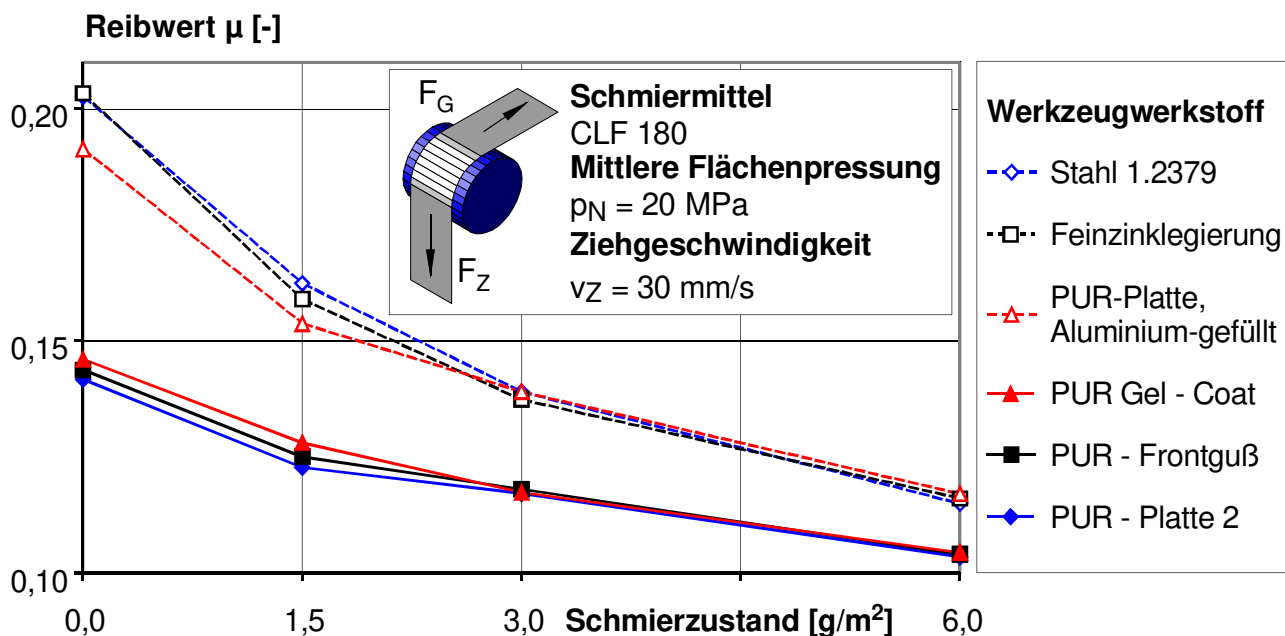


Bild 39: Reibwerte von Aluminium Al99,5 ($s_0 = 1,0$ mm) aus dem Streifenziehversuch mit Umlenkung

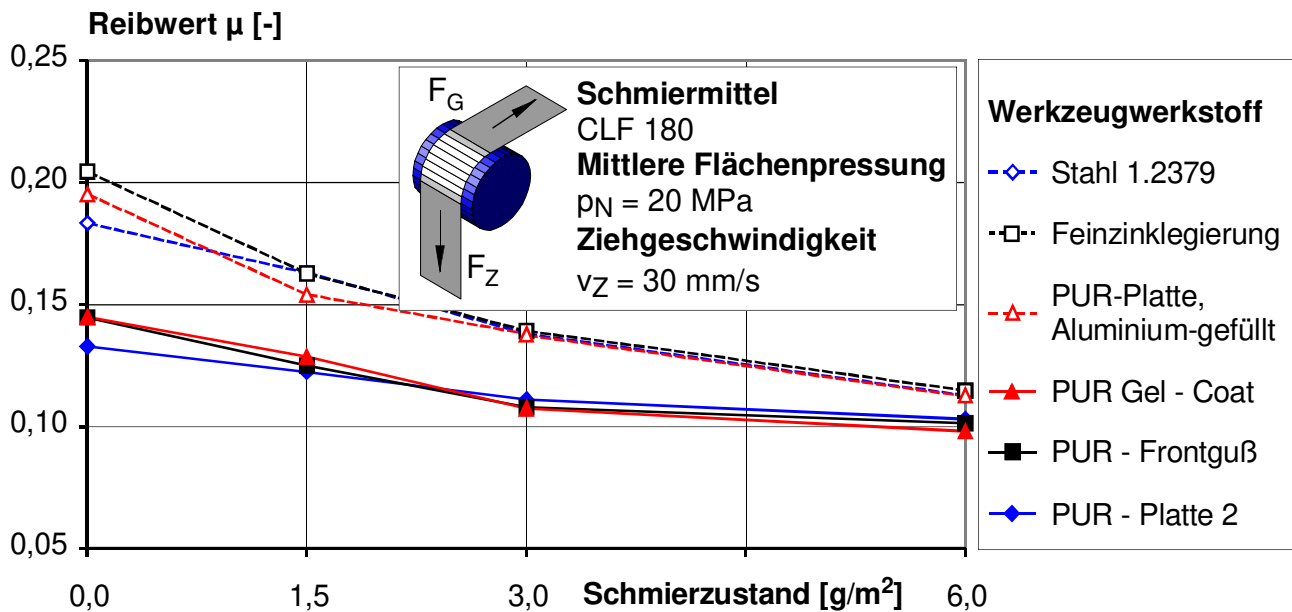


Bild 40: Reibwerte von Aluminium AlMg_{0,4}Si_{1,2} ($s_0 = 1,0 \text{ mm}$) aus dem Streifenziehversuch mit Umlenkung

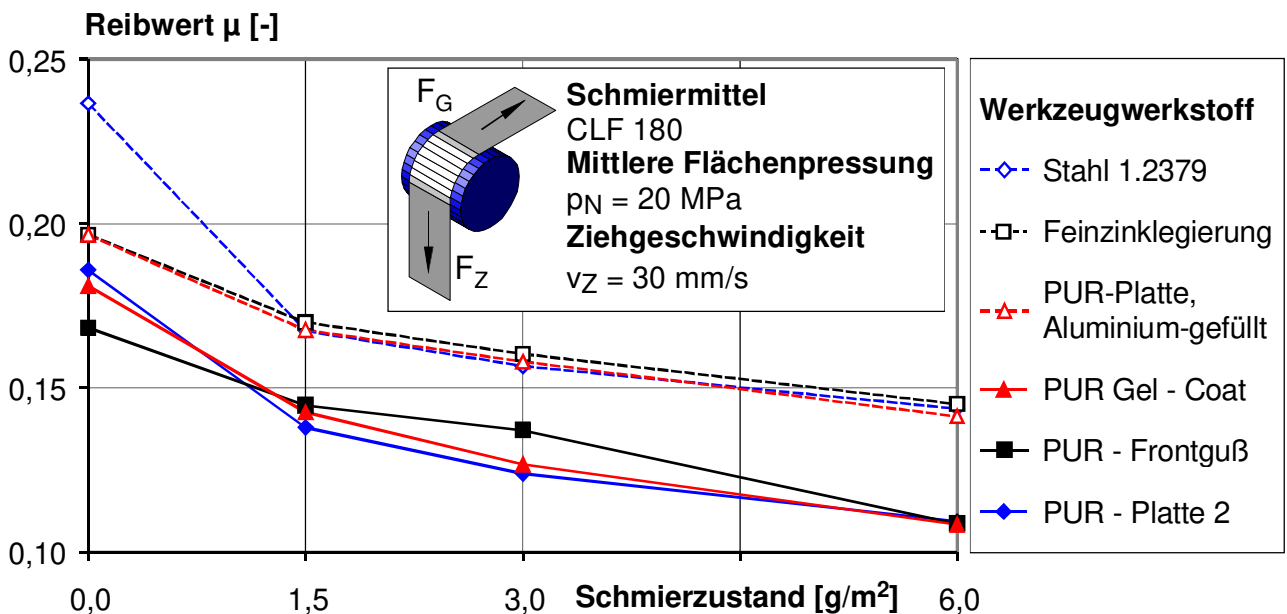


Bild 41: Reibwerte von Aluminium AlMg_{4,5}Mn_{0,4} ($s_0 = 1,0 \text{ mm}$) aus dem Streifenziehversuch mit Umlenkung

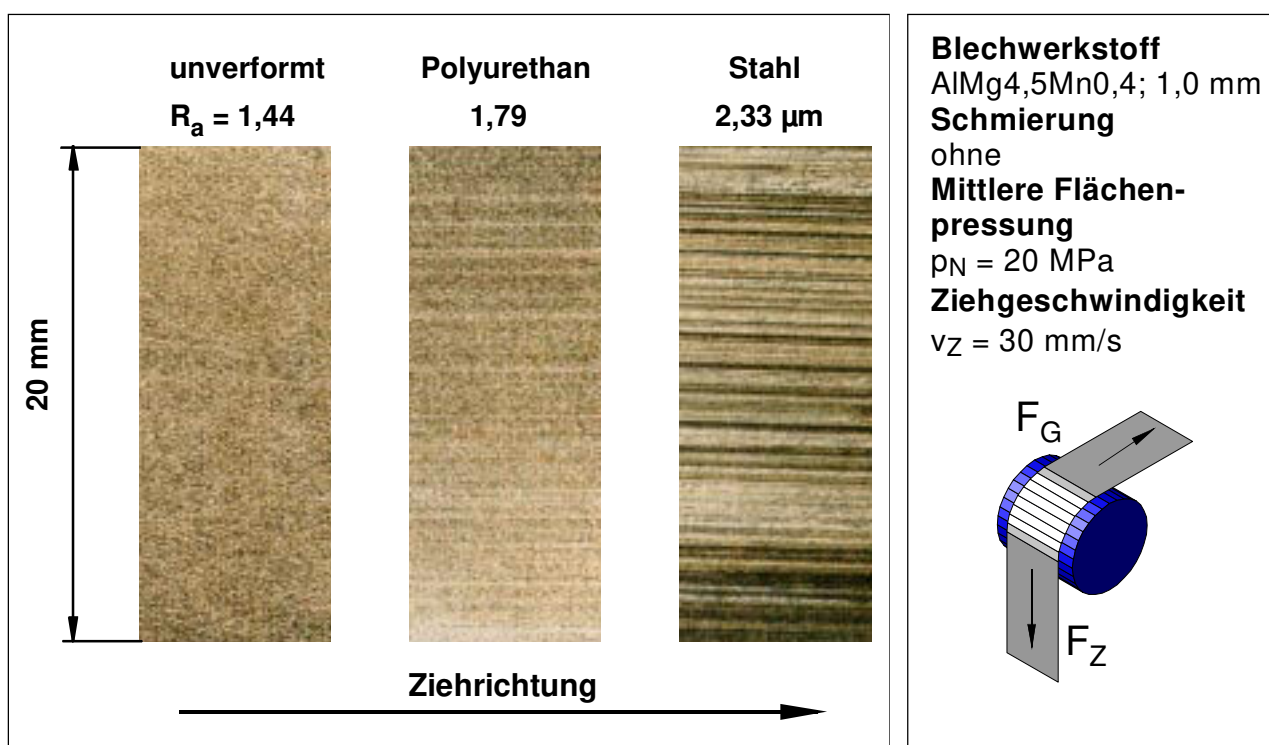


Bild 42: Vergleich der Blechoberfläche von AlMg4,5Mn0,4 nach dem Streifenziehen über eine Polyurethan- und eine Stahlprobe bei trockener Reibung

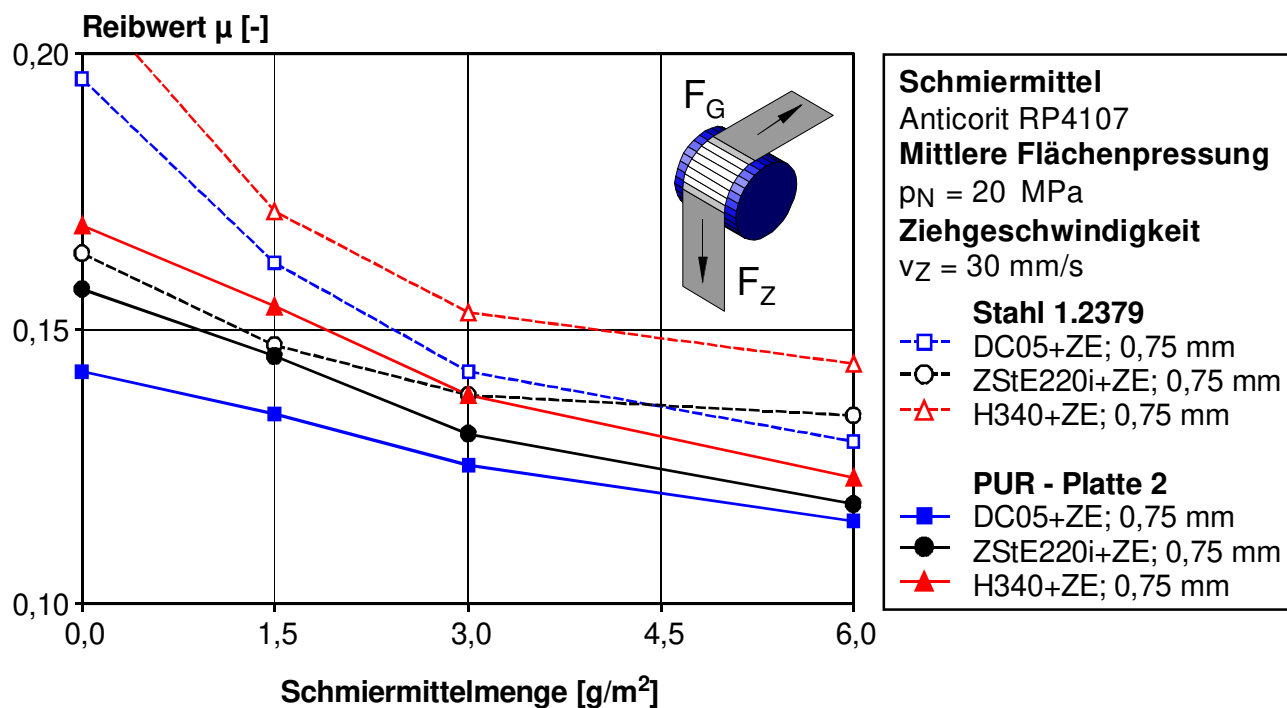


Bild 43: Reibverhalten elektrolytisch verzinkter Stahlbleche

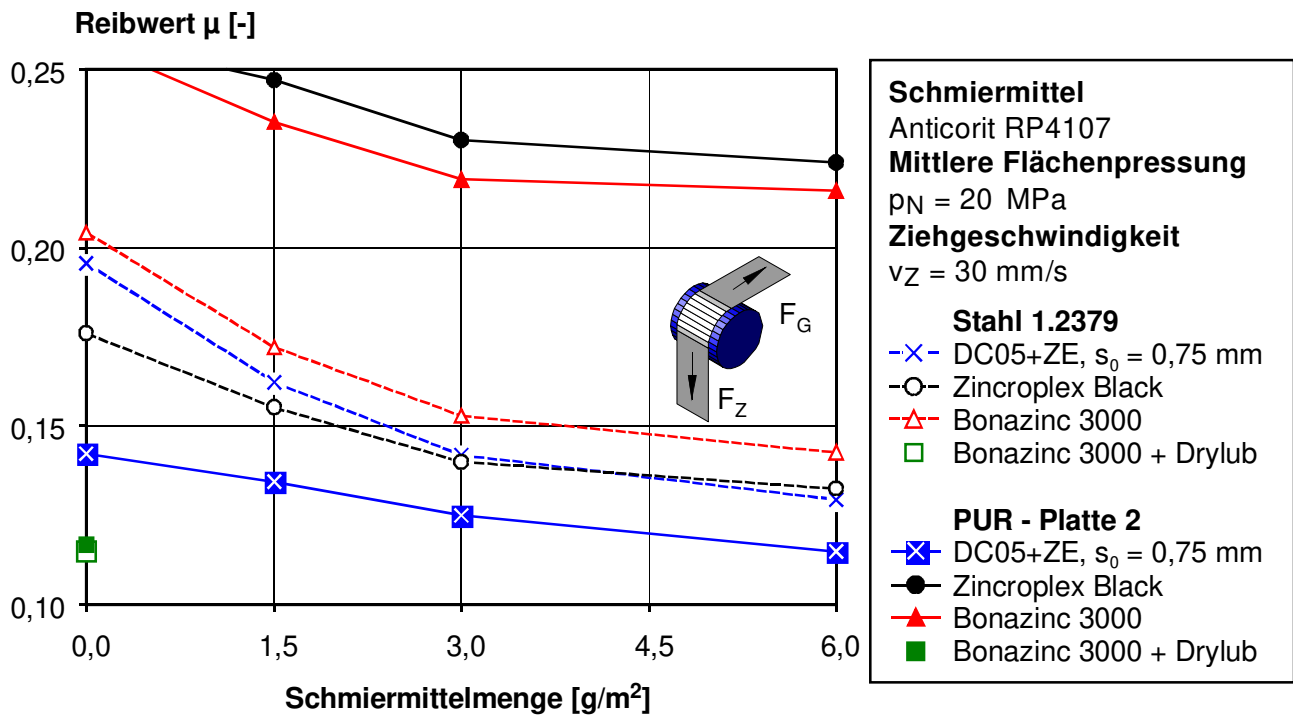
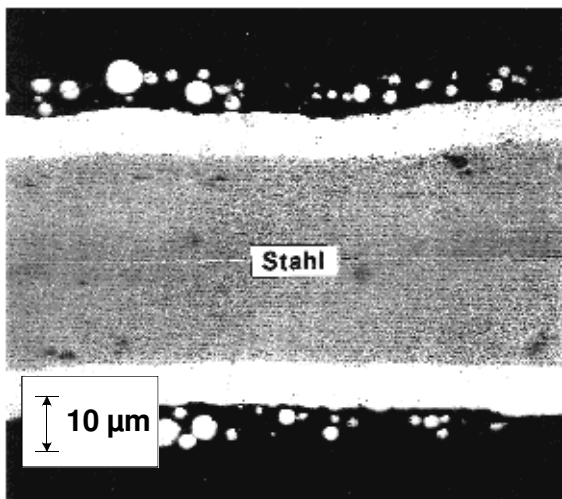


Bild 44: Reibverhalten schweißbarer organisch beschichteter Stahlfeinbleche

Schichtaufbau im Querschliff



Elektronenraster- mikroskopie

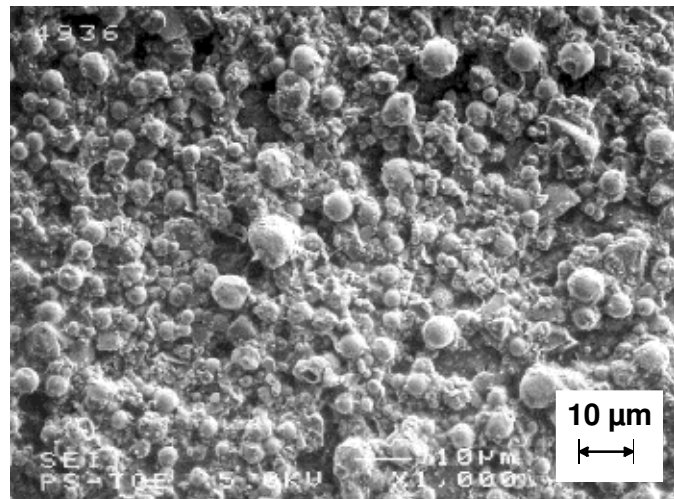


Bild 45: Organische Dünnschichtlackierung Bonazinc 3000 (Quelle: Salzgitter AG)

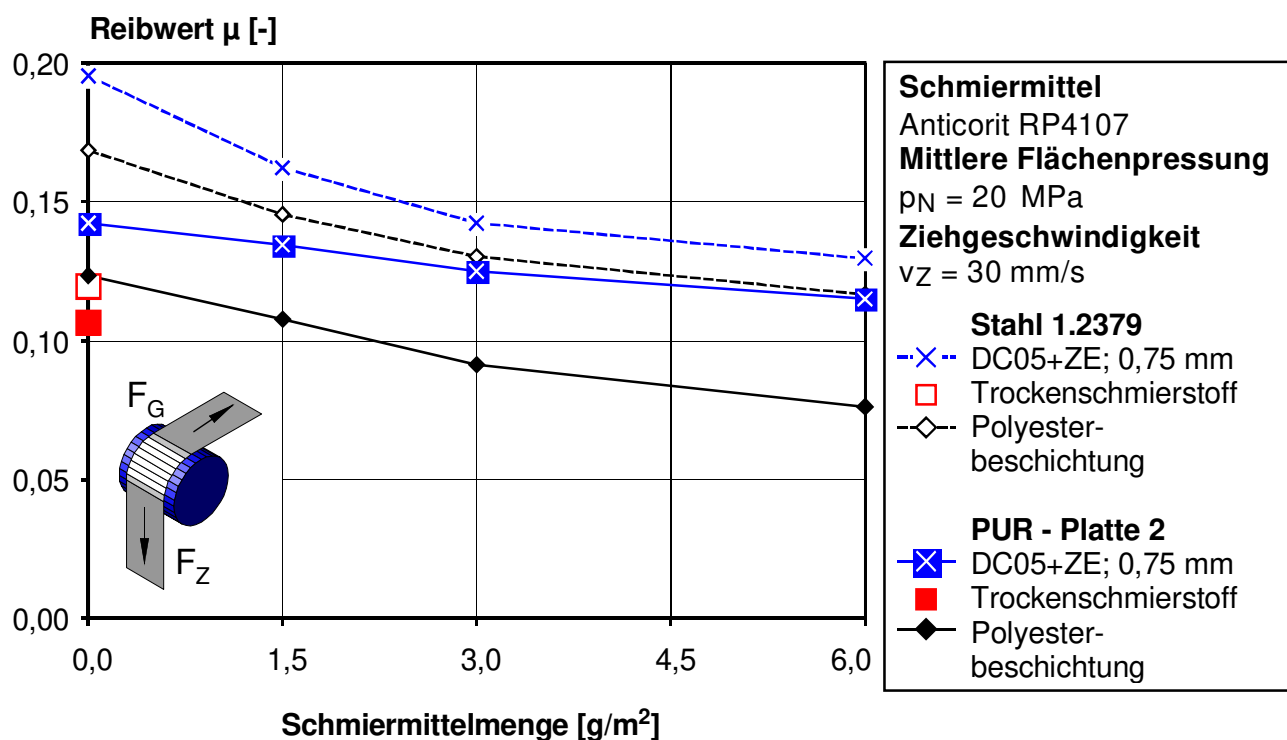


Bild 46: Reibwerte organisch beschichteter Stahlfeinbleche

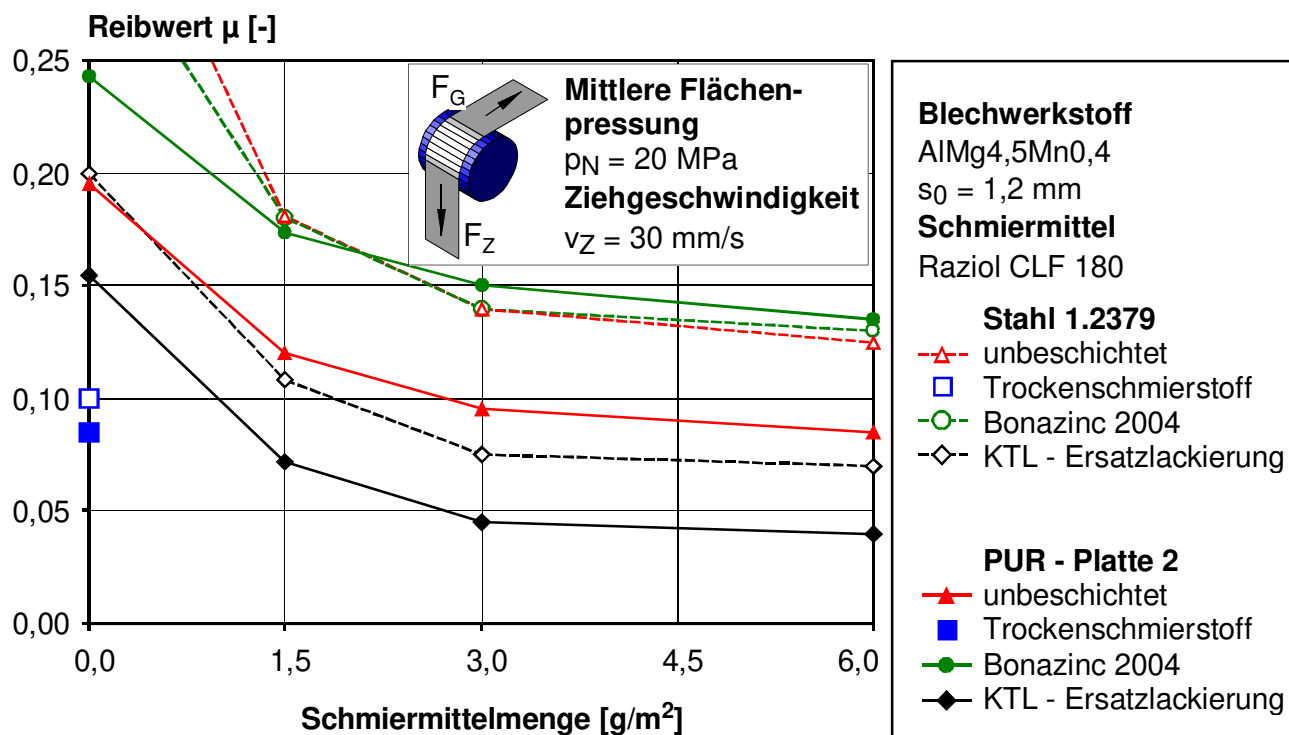


Bild 47: Einfluß von Werkzeugwerkstoff, Beschichtung und Schmiermittelmenge auf den Reibkoeffizienten (AlMg4,5Mn0,4)

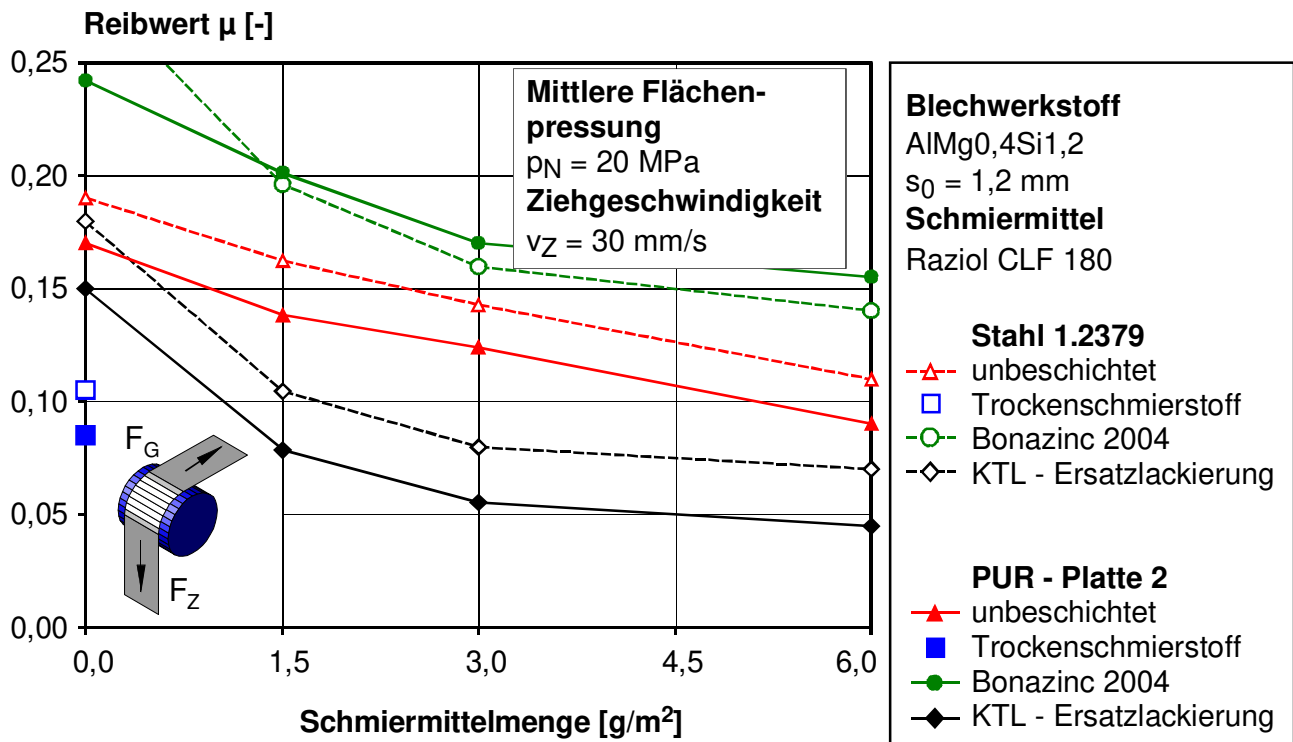


Bild 48: Einfluß von Werkzeugwerkstoff, Beschichtung und Schmiermittelmenge auf den Reibkoeffizienten (AlMg0,4Si1,2)

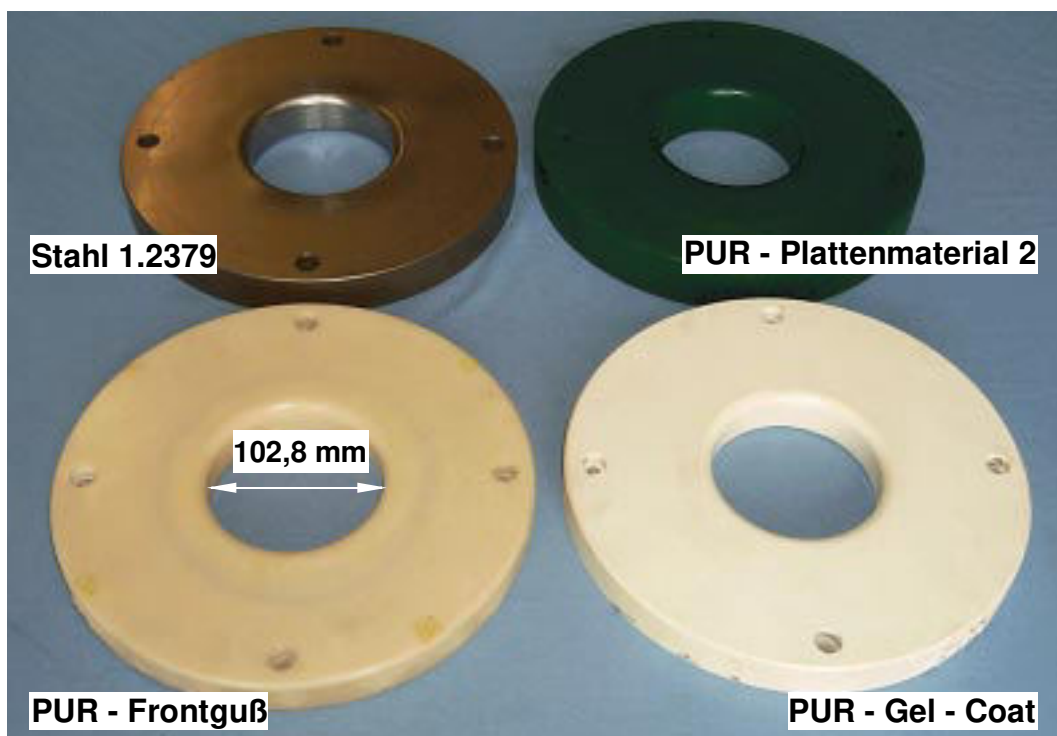


Bild 49: Ziehringe für Stempeldurchmesser $d_0 = 100 \text{ mm}$, gefertigt aus unterschiedlichen Materialien

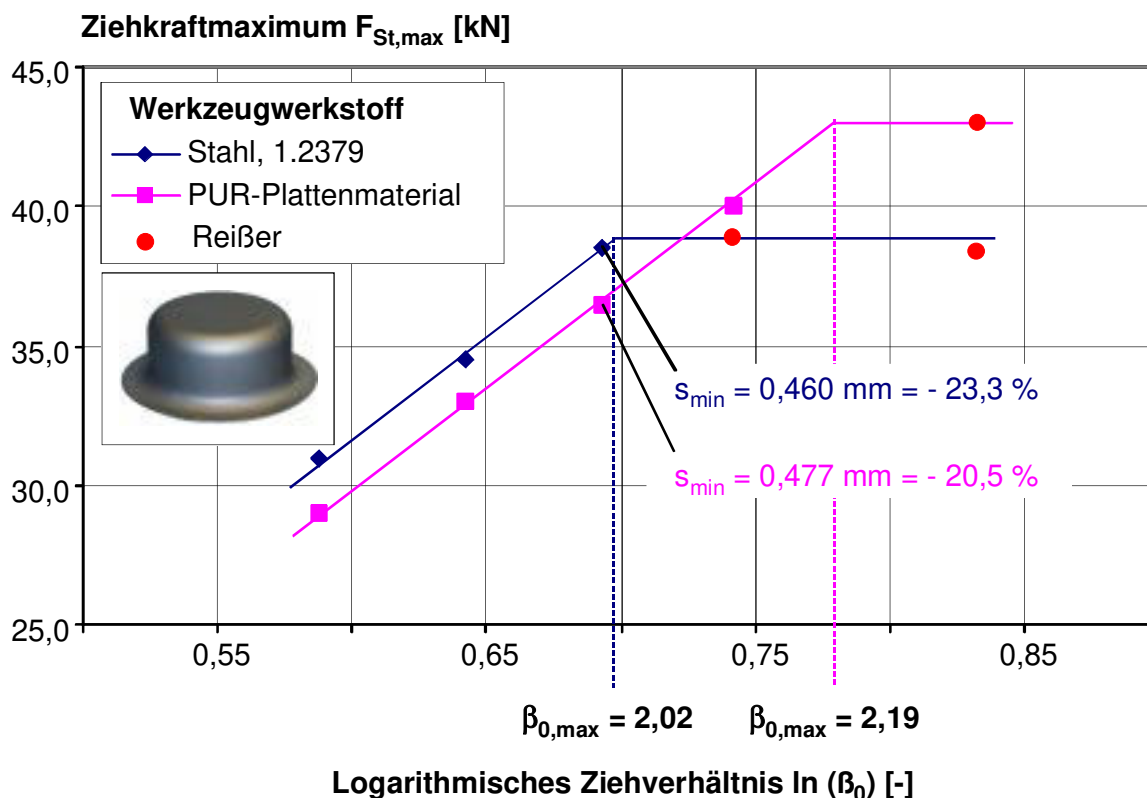


Bild 50: Ermittlung von Grenzziehverhältnisse in Anlehnung an SCHMIDT [Schm29]

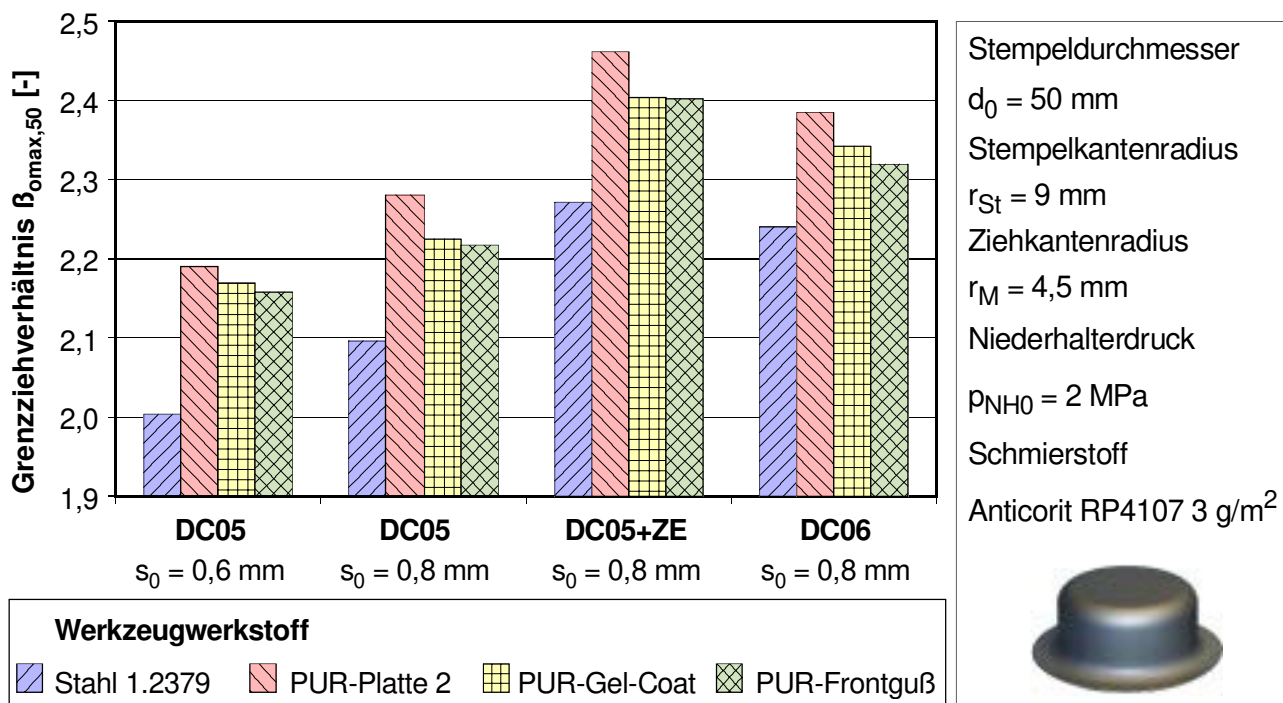


Bild 51: Grenzziehverhältnisse weicher Tiefziehstähle, ermittelt mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen

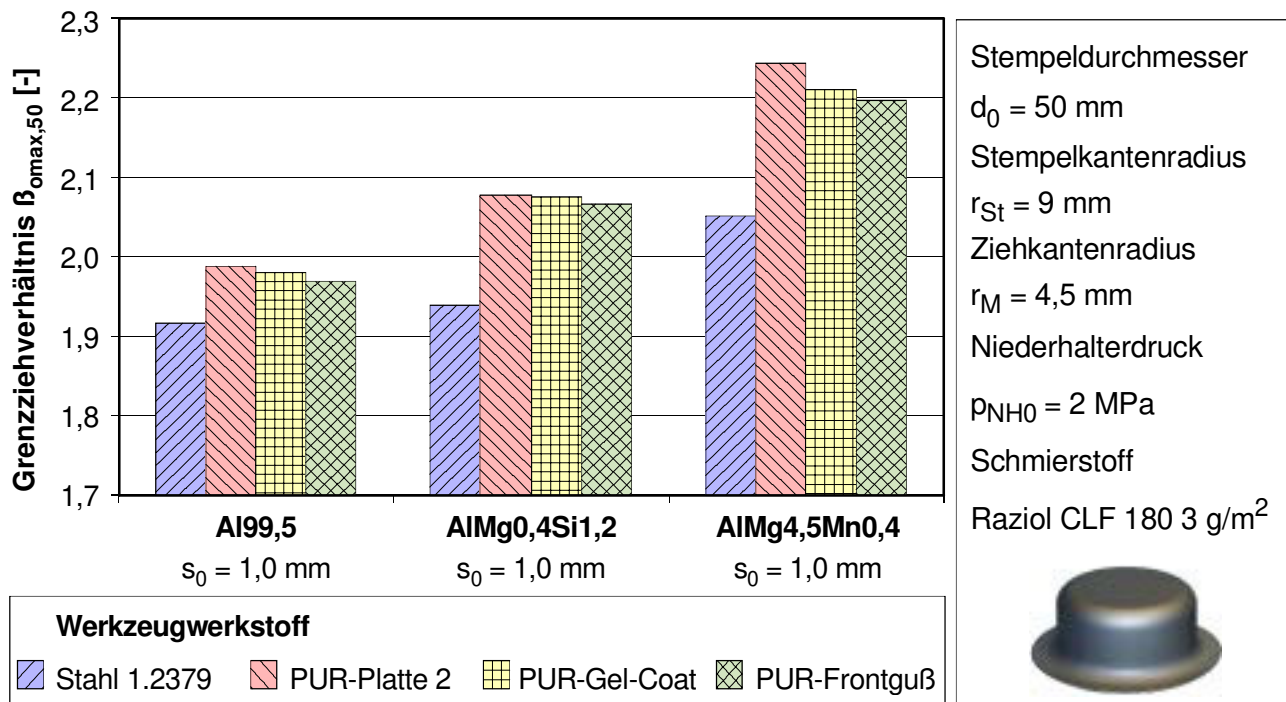


Bild 52: Grenzziehverhältnisse von Aluminiumlegierungen, ermittelt mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen

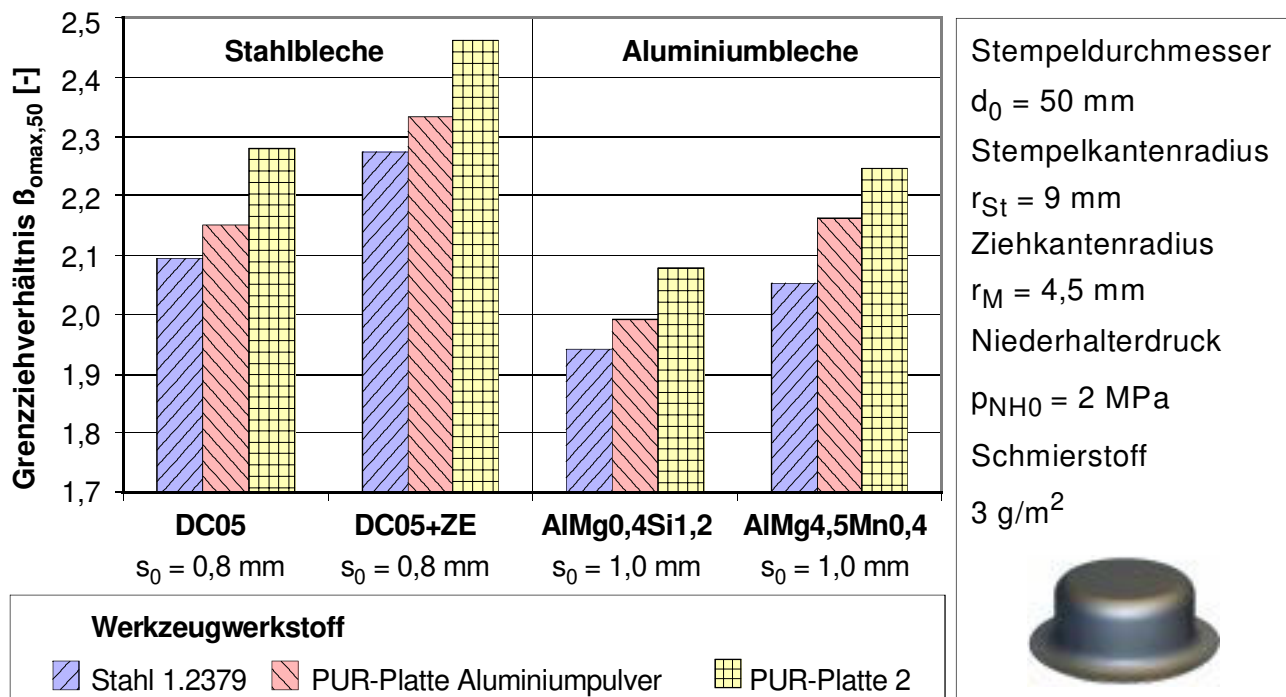


Bild 53: Einfluß von Aluminiumpulver als Füllstoff auf die Grenzziehverhältnisse weicher Tiefziehstähle und Aluminiumbleche

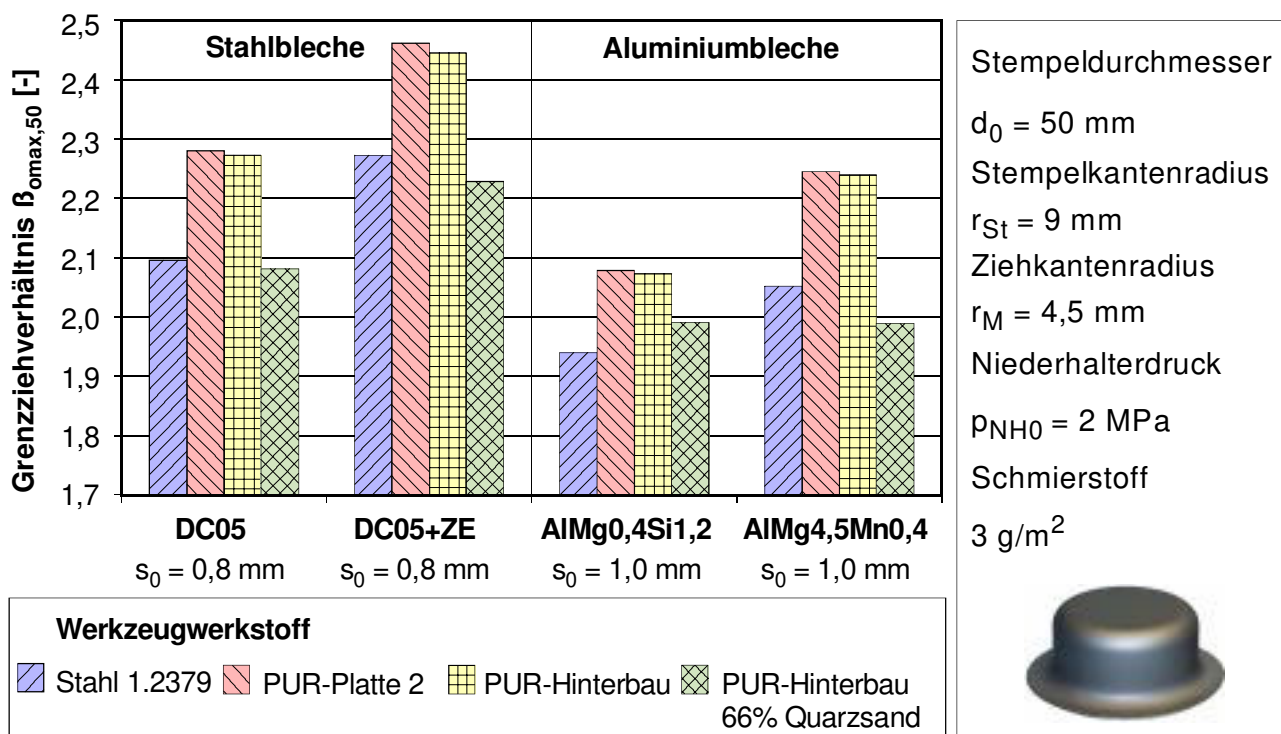


Bild 54: Einfluß von Quarzsand als Füllstoff auf die Grenzziehverhältnisse weicher Tiefziehstähle und Aluminiumbleche

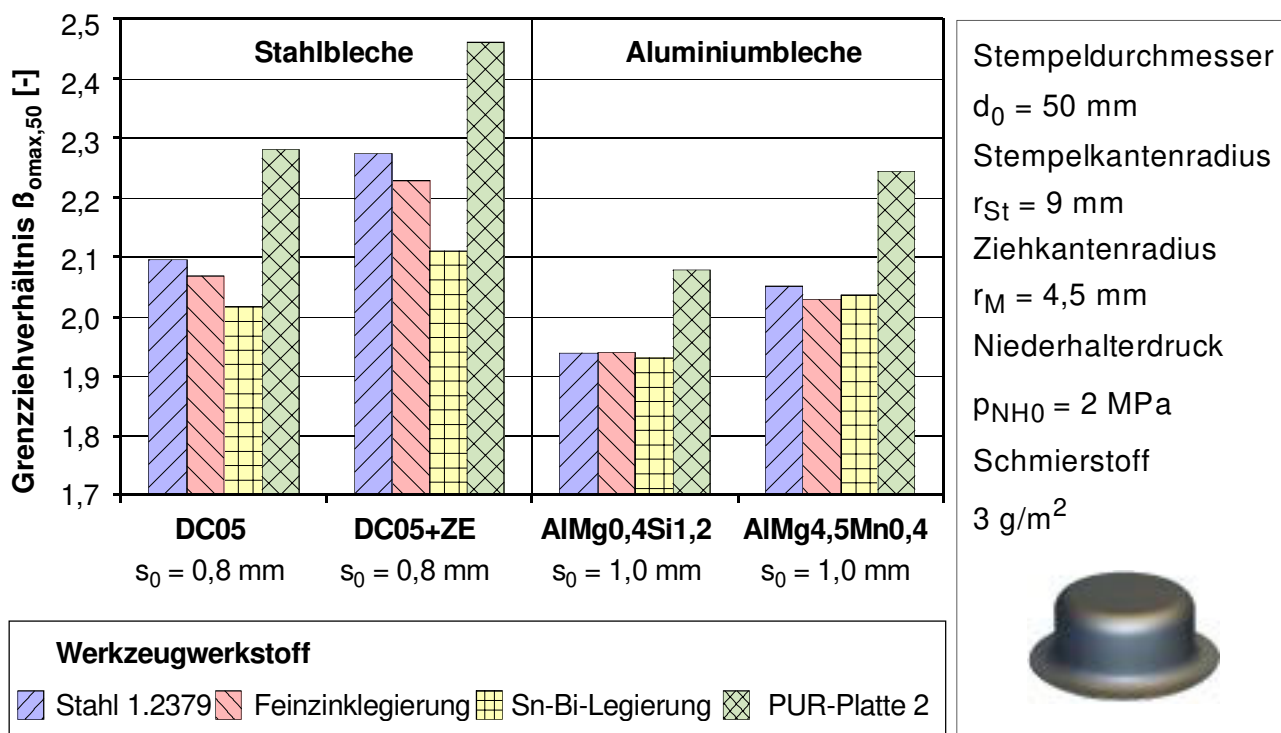


Bild 55: Grenzziehverhältnisse von Tiefziehstählen und Aluminiumlegierungen, erzielt mit niedrigschmelzenden Legierungen als Werkzeugwerkstoff

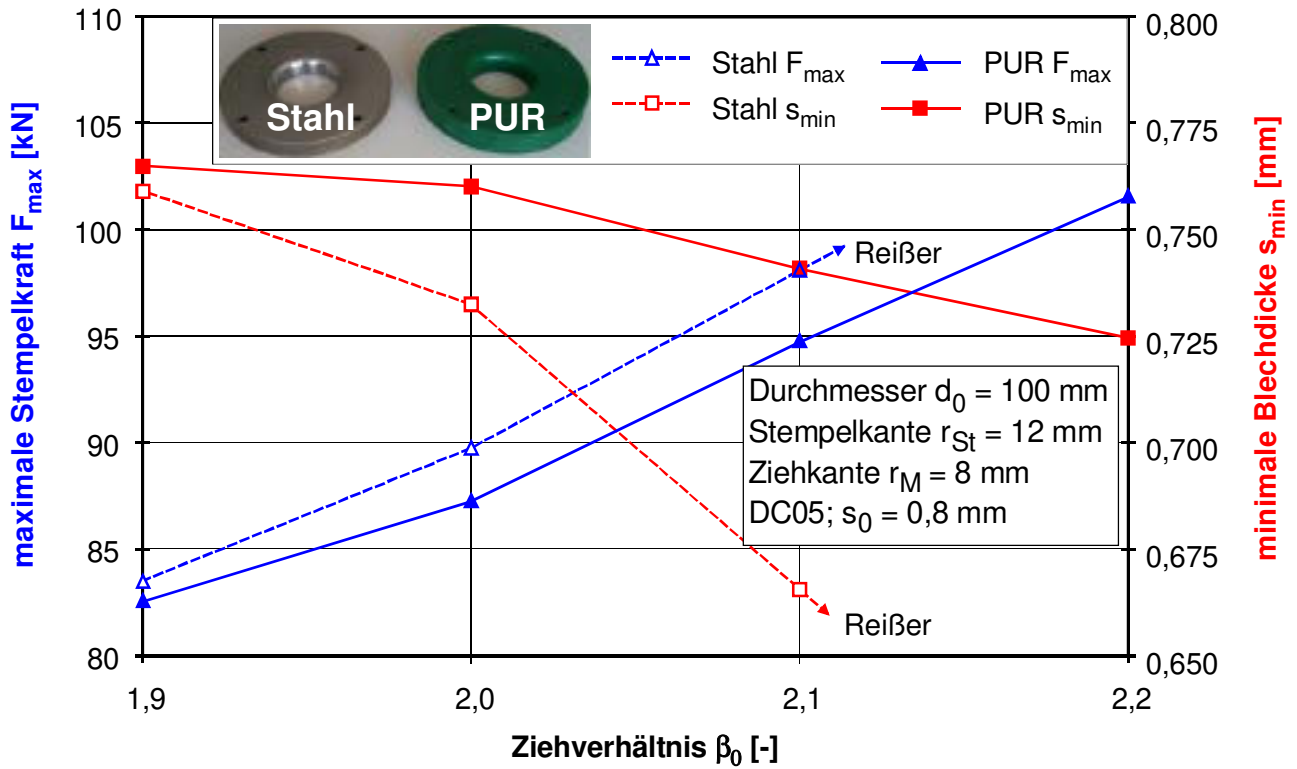


Bild 56: Blechdicken und Ziehkräfte in Abhängigkeit vom Ziehverhältnis

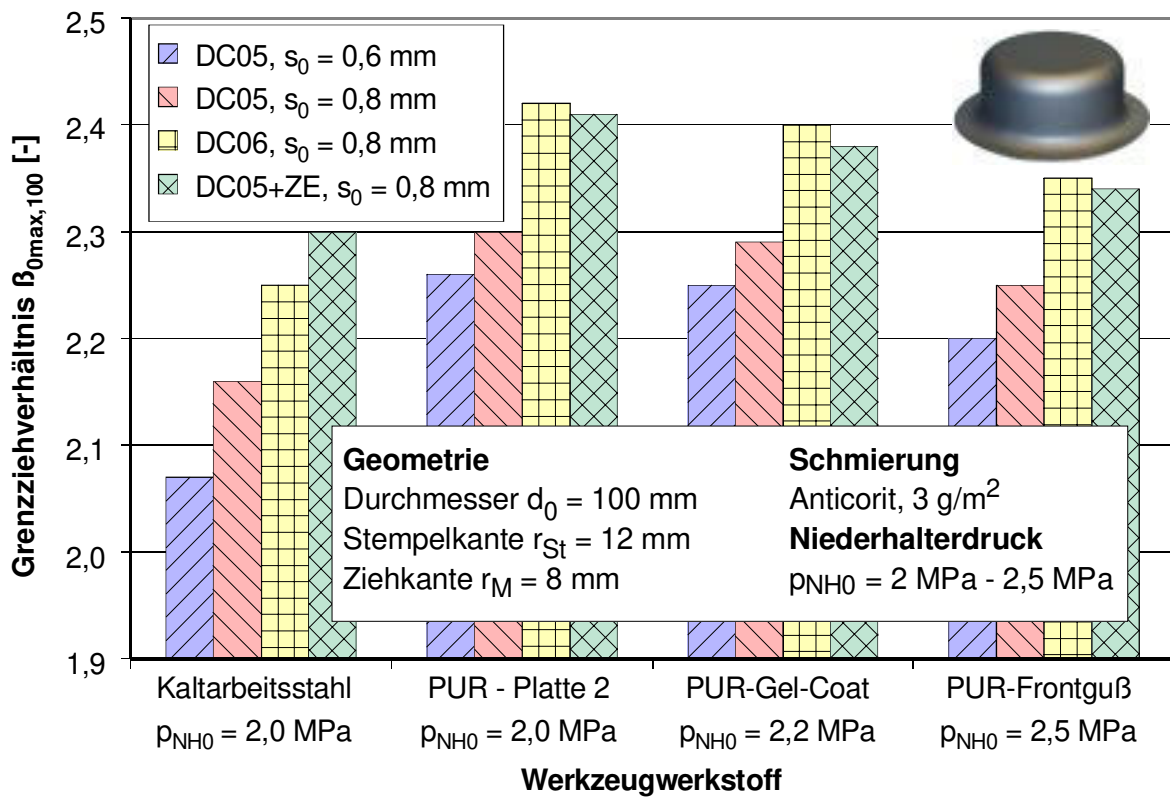


Bild 57: Grenzziehverhältnisse $\beta_{0max,100}$ von Stahlblechen

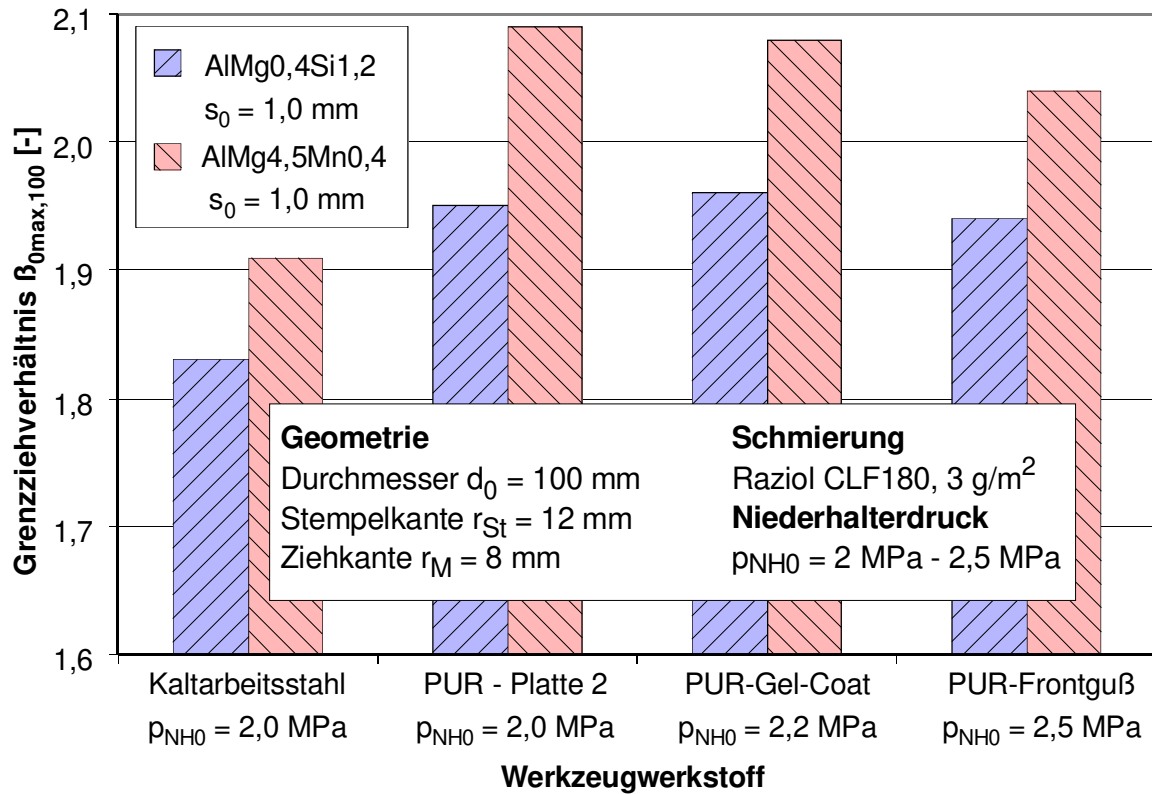


Bild 58: Grenzziehverhältnisse $\beta_{0max,100}$ von Aluminiumblechen

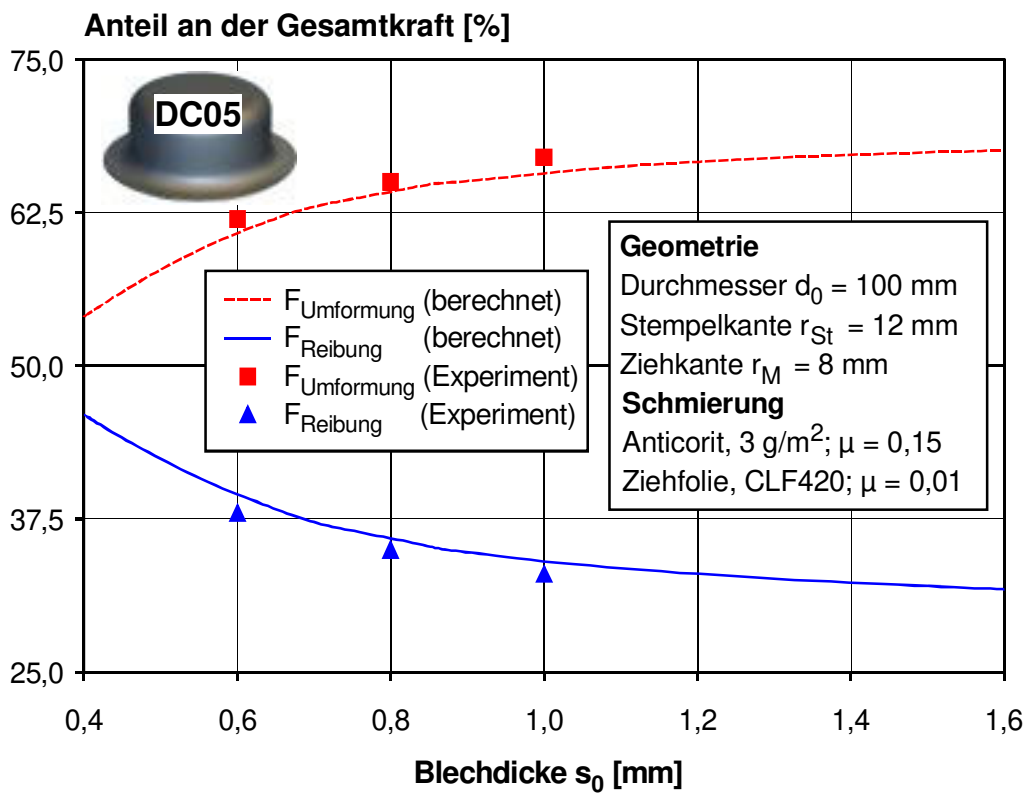


Bild 59: Einfluß der Blechdicke auf den Reibanteil der Gesamtkraft

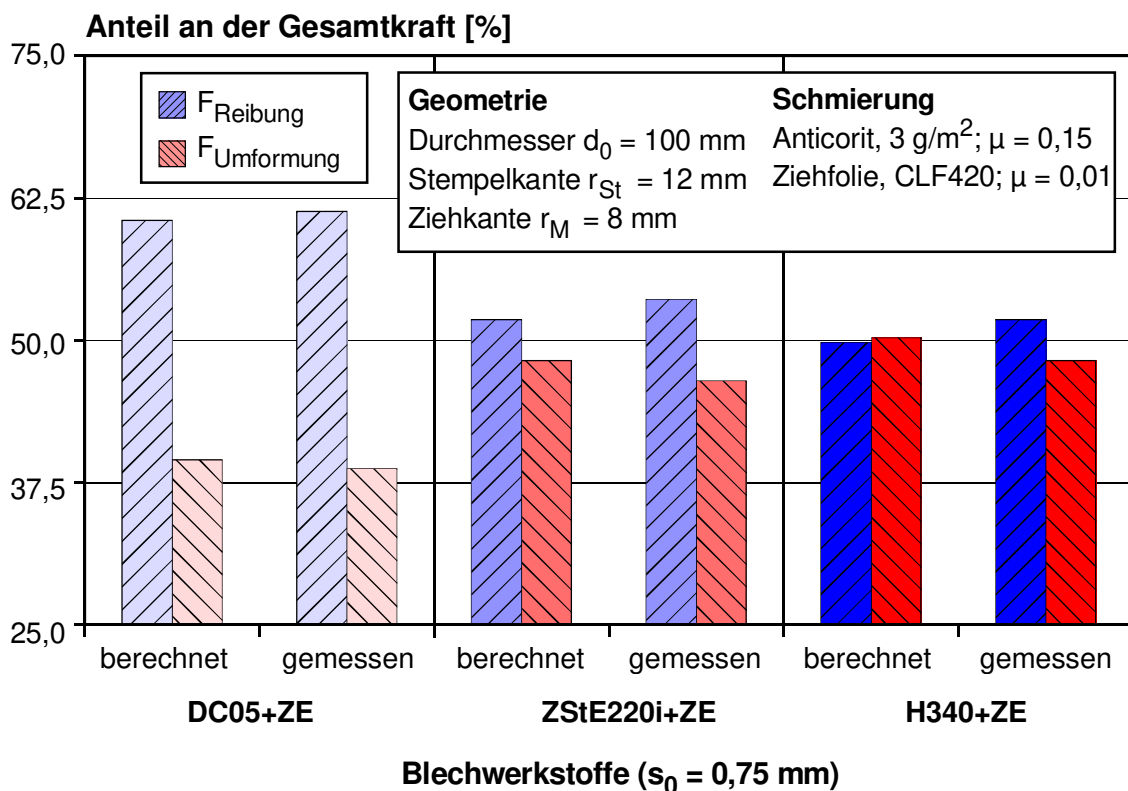


Bild 60: Einfluß der Festigkeit auf den Reibanteil der Gesamtkraft

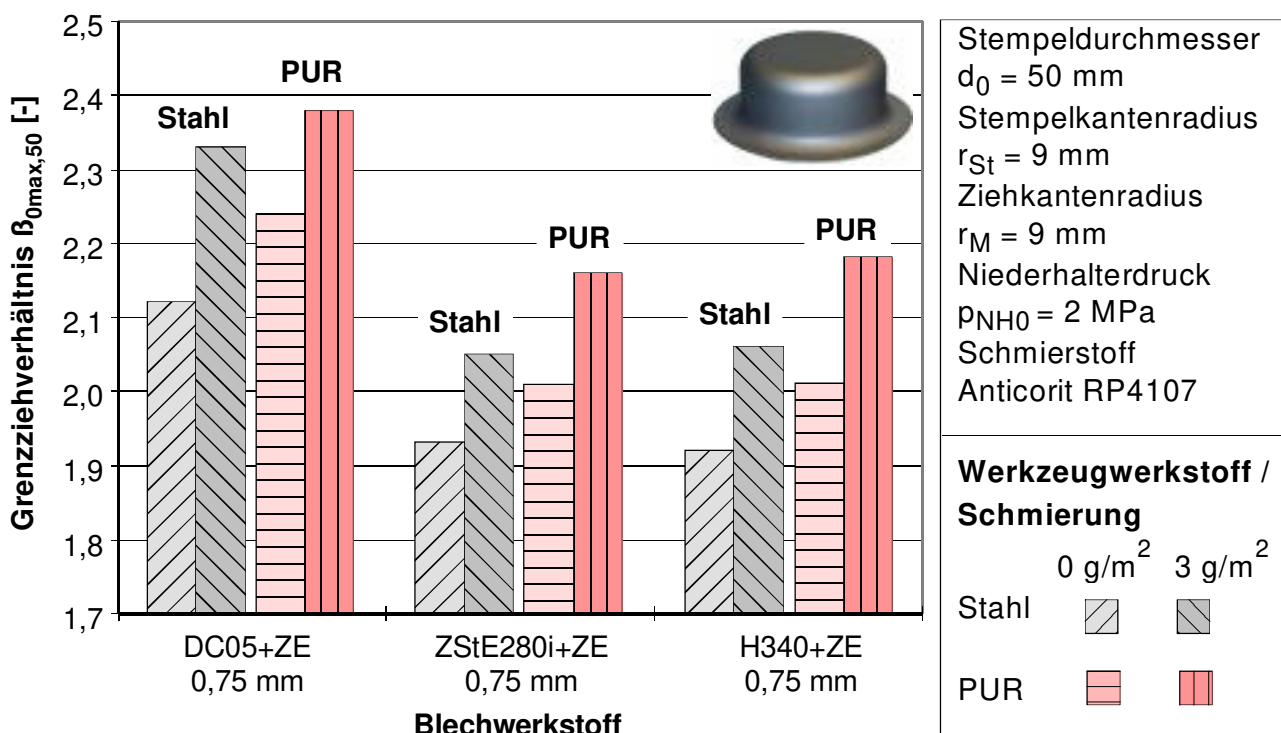


Bild 61: Einfluß von Schmierung und Werkzeugwerkstoff auf das Grenzziehverhältnis von elektrolytisch verzinkten Stahlblechen

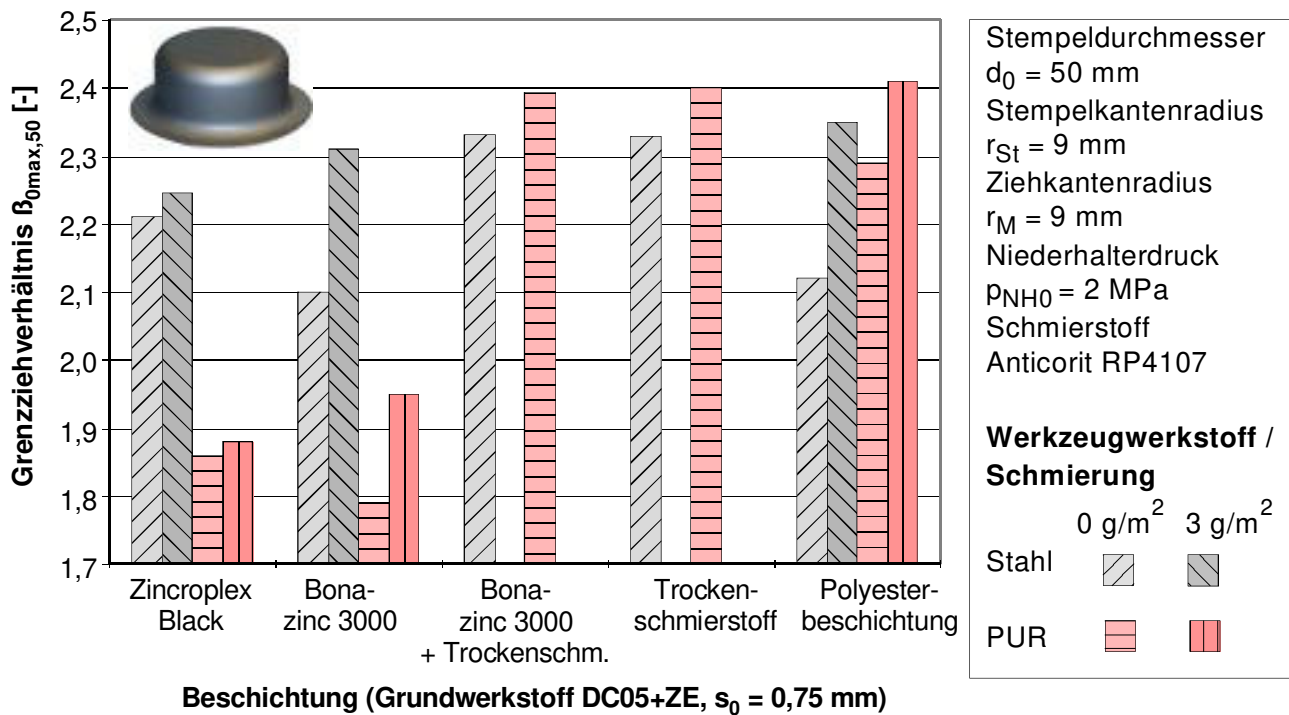


Bild 62: Einfluß von Beschichtung, Schmierung und Werkzeugwerkstoff auf das Grenzziehverhältnis von organisch beschichteten Stahlblechen DC05+ZE

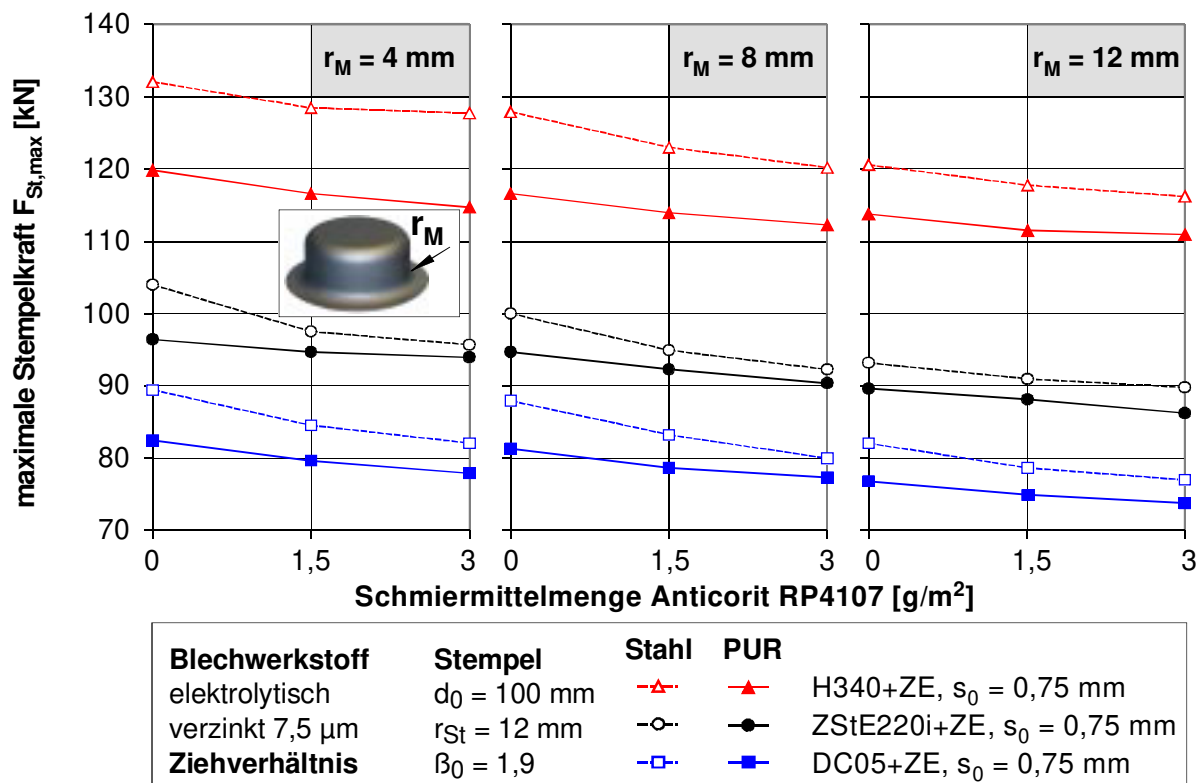


Bild 63: Einfluß von Werkzeugwerkstoff, Matrizenradius und Schmierstoff auf die Stempelkraft bei verzinkten Stahlblechen

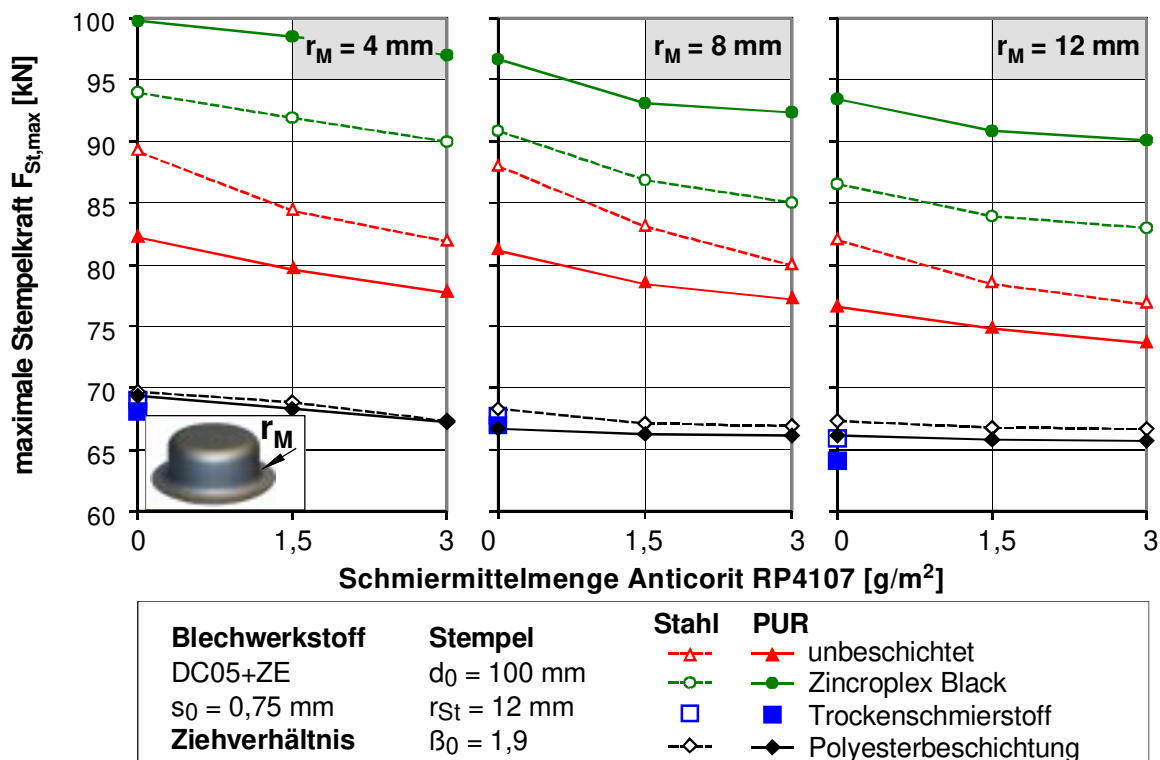


Bild 64: Einfluß von Werkzeugwerkstoff, Matrizenradius, Schmierstoff und Beschichtung auf die Stempelkraft (DC05+ZE, $s_0 = 0,75$ mm)

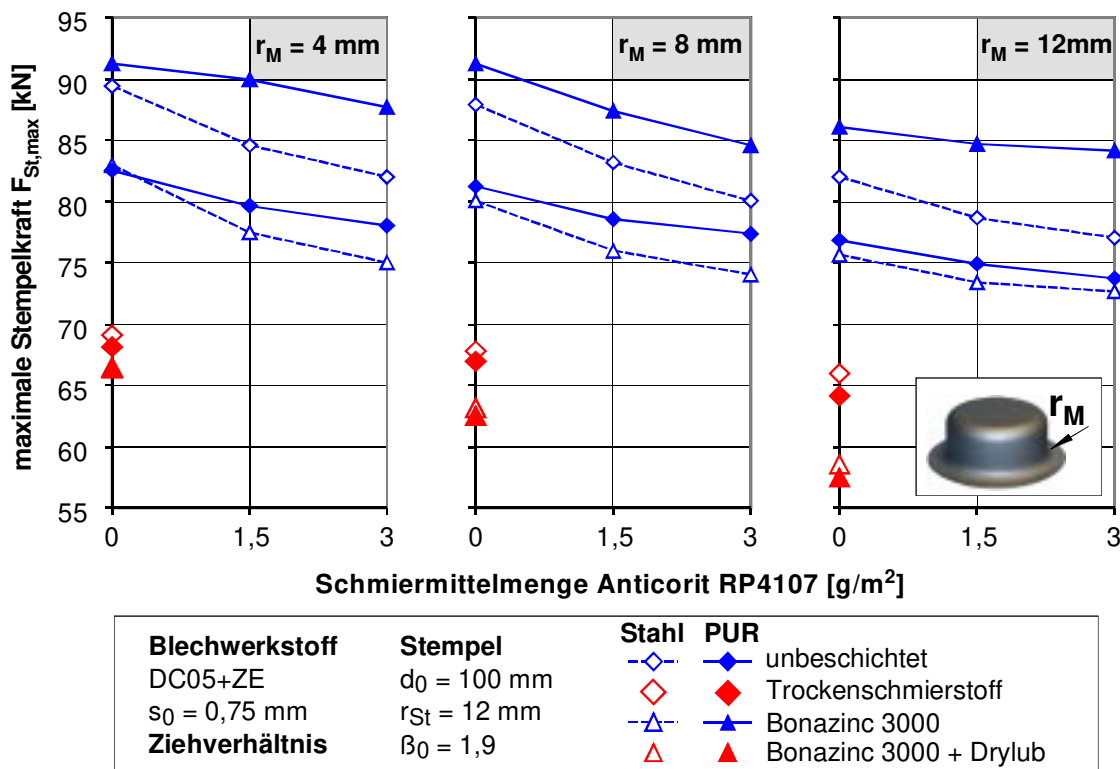


Bild 65: Einfluß von Werkzeugwerkstoff, Matrizenradius, Schmierstoff und Beschichtung auf die Stempelkraft (DC05+ZE, $s_0 = 0,75$ mm)

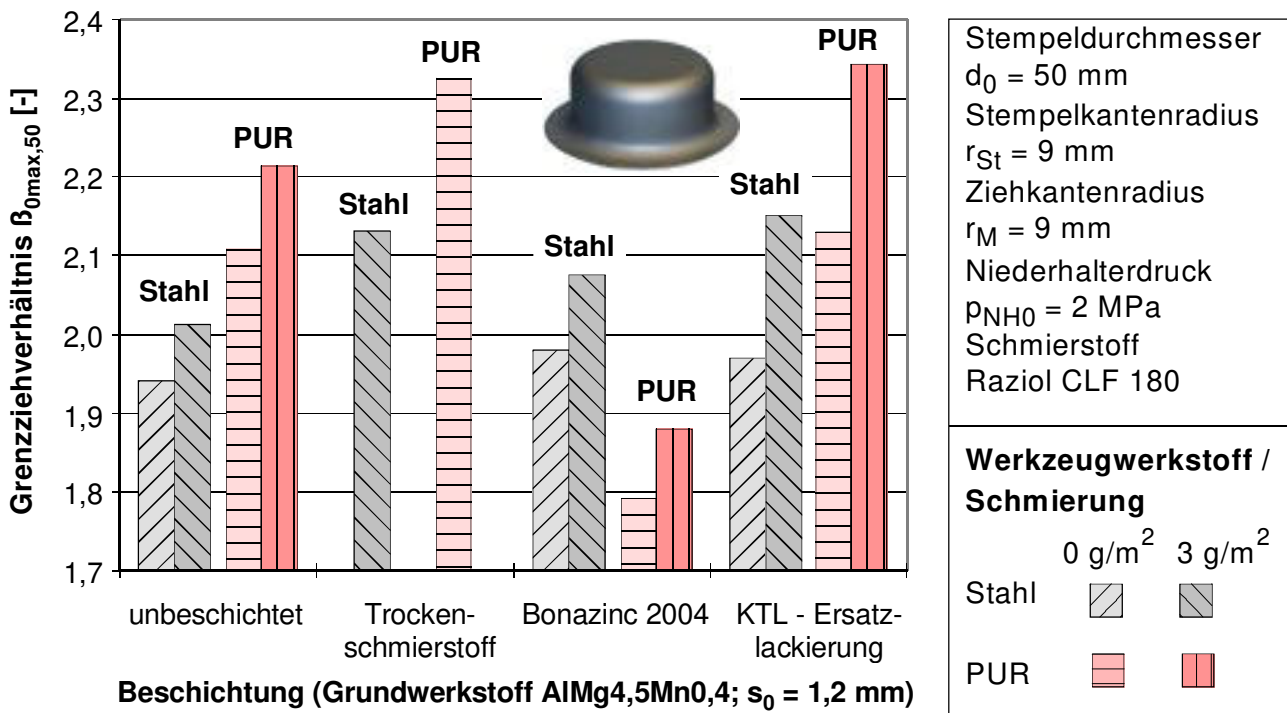


Bild 66: Einfluß von Beschichtung, Schmierung und Werkzeugwerkstoff auf das Grenzziehverhältnis von AlMg_{4,5}Mn_{0,4}; $s_0 = 1,2 \text{ mm}$

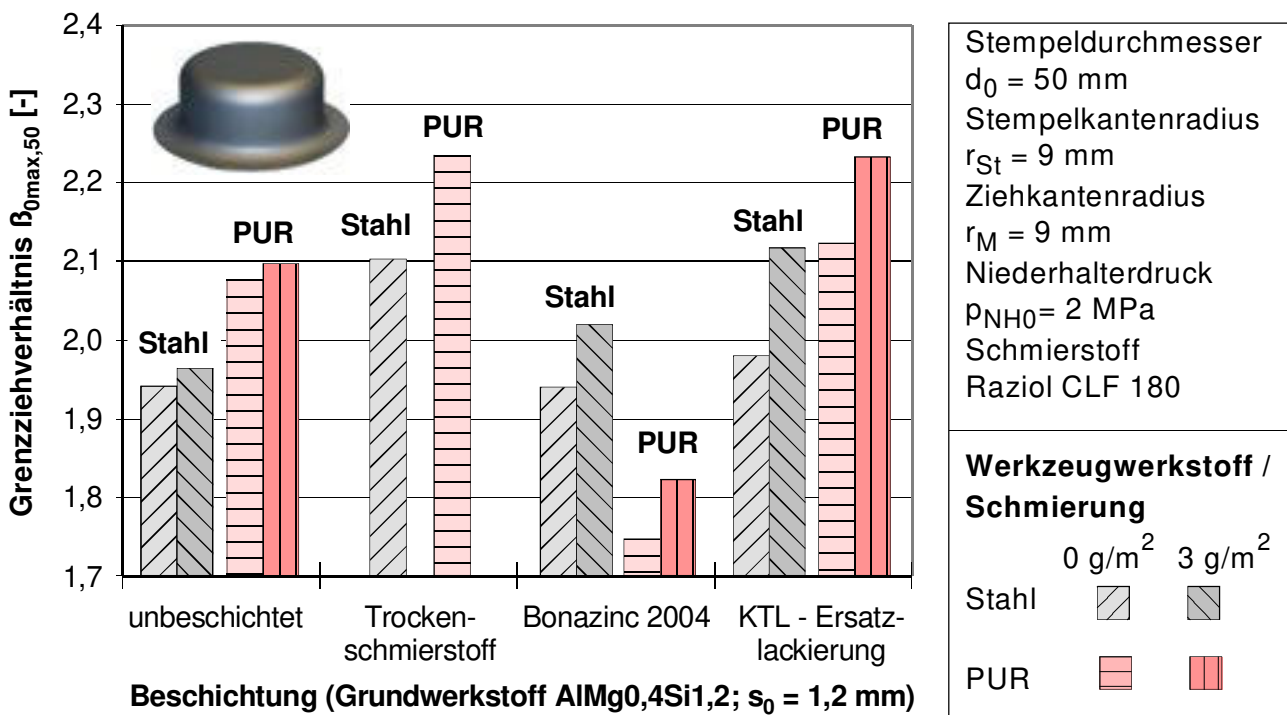
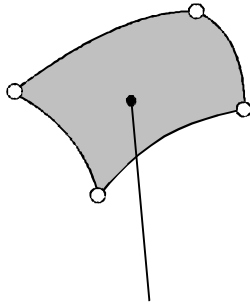


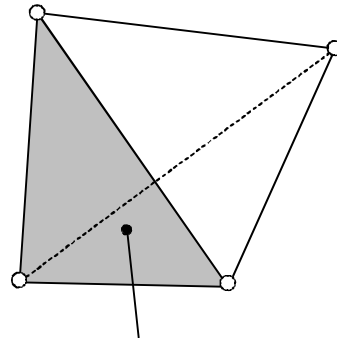
Bild 67: Einfluß von Beschichtung, Schmierung und Werkzeugwerkstoff auf das Grenzziehverhältnis von AlMg_{0,4}Si_{1,2}; $s_0 = 1,2 \text{ mm}$

4-Knoten Schalenelement 3D - Fläche



Kontaktfläche

4-Knoten Tetraederelement 3D - Volumen



Kontaktfläche

Bild 70: Elementtypen für die Prozeßsimulation des Tiefziehens mit Kunststoffwerkzeugen

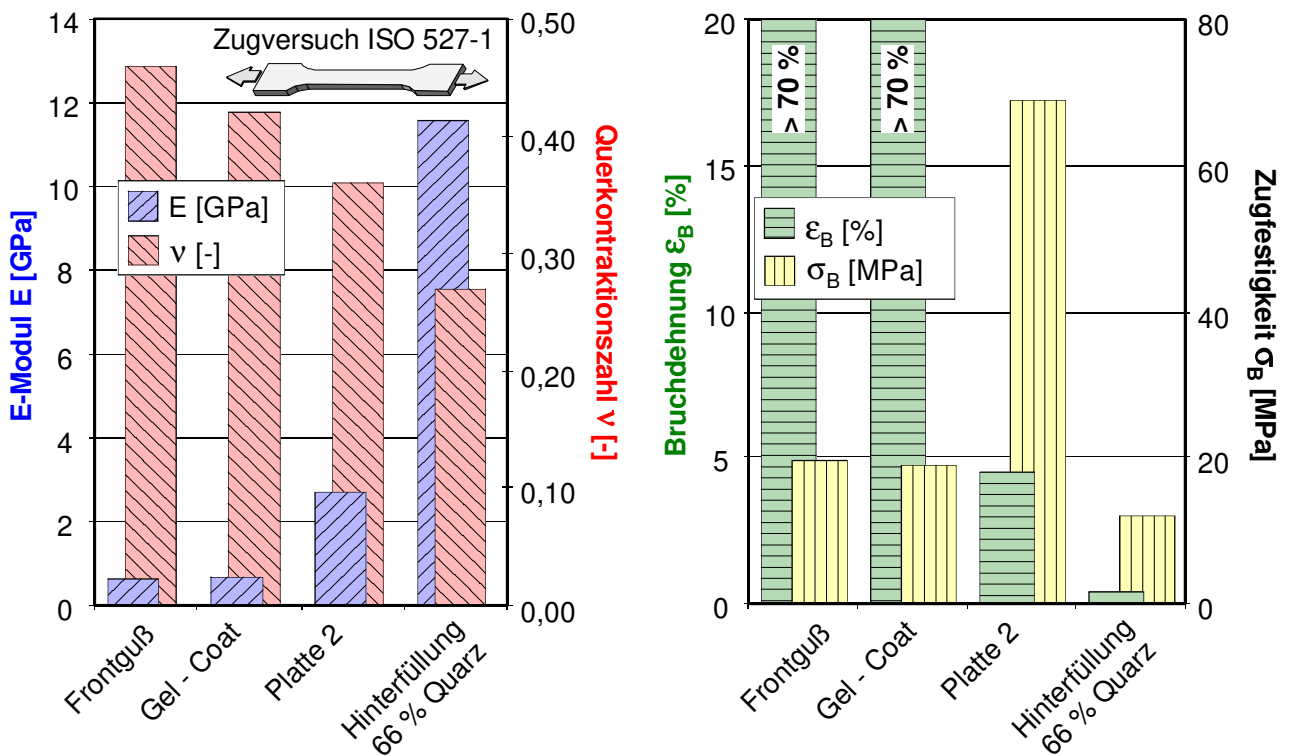


Bild 71: Mechanische Kennwerte der untersuchten Kunststoffe

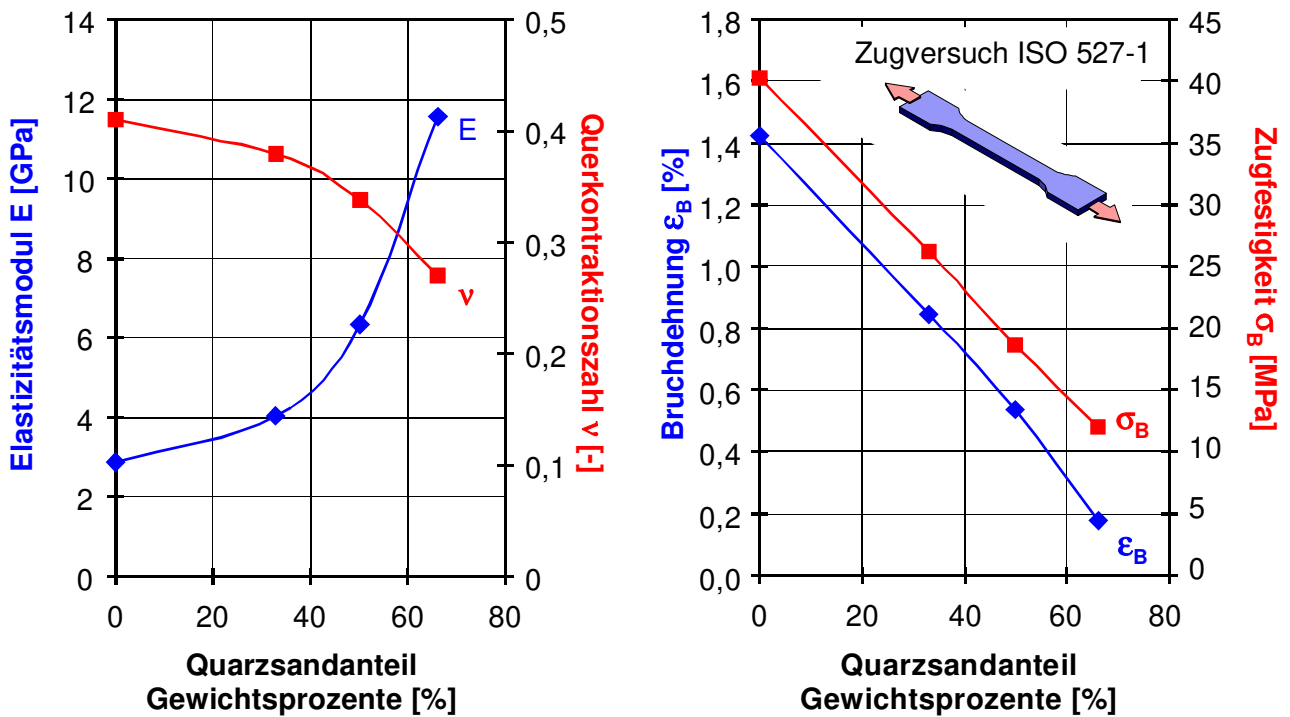


Bild 72: Einfluß des Füllstoffgehalts auf die mechanischen Eigenschaften von Kunststoff

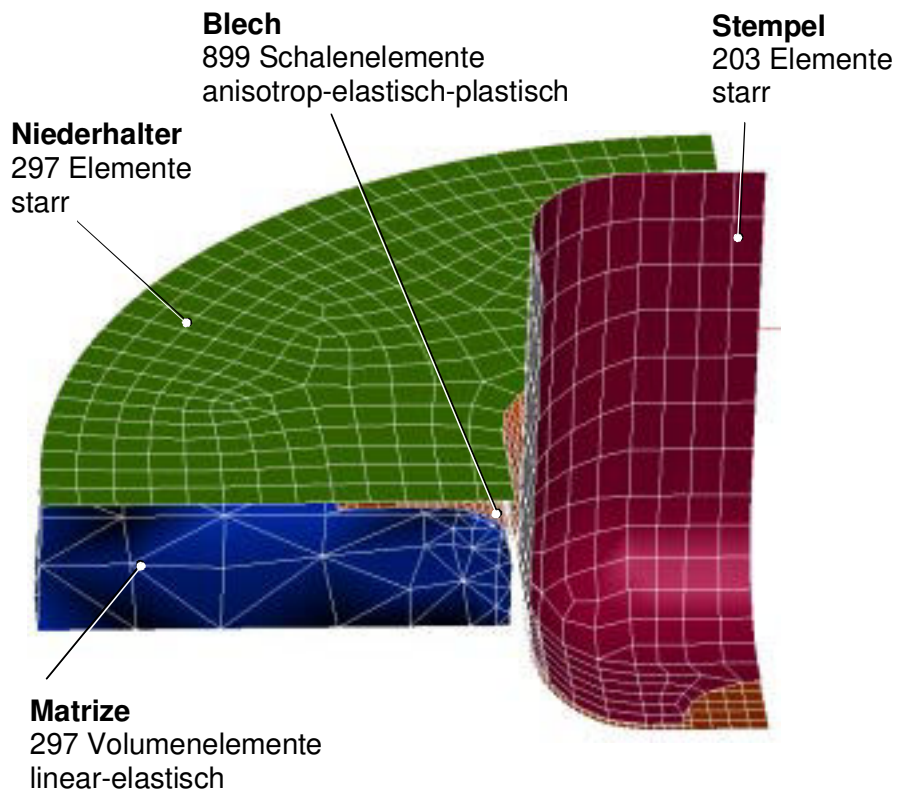


Bild 73: FEM-Modell - Tiefziehen mit elastischer Matrize (40 x 40 mm)

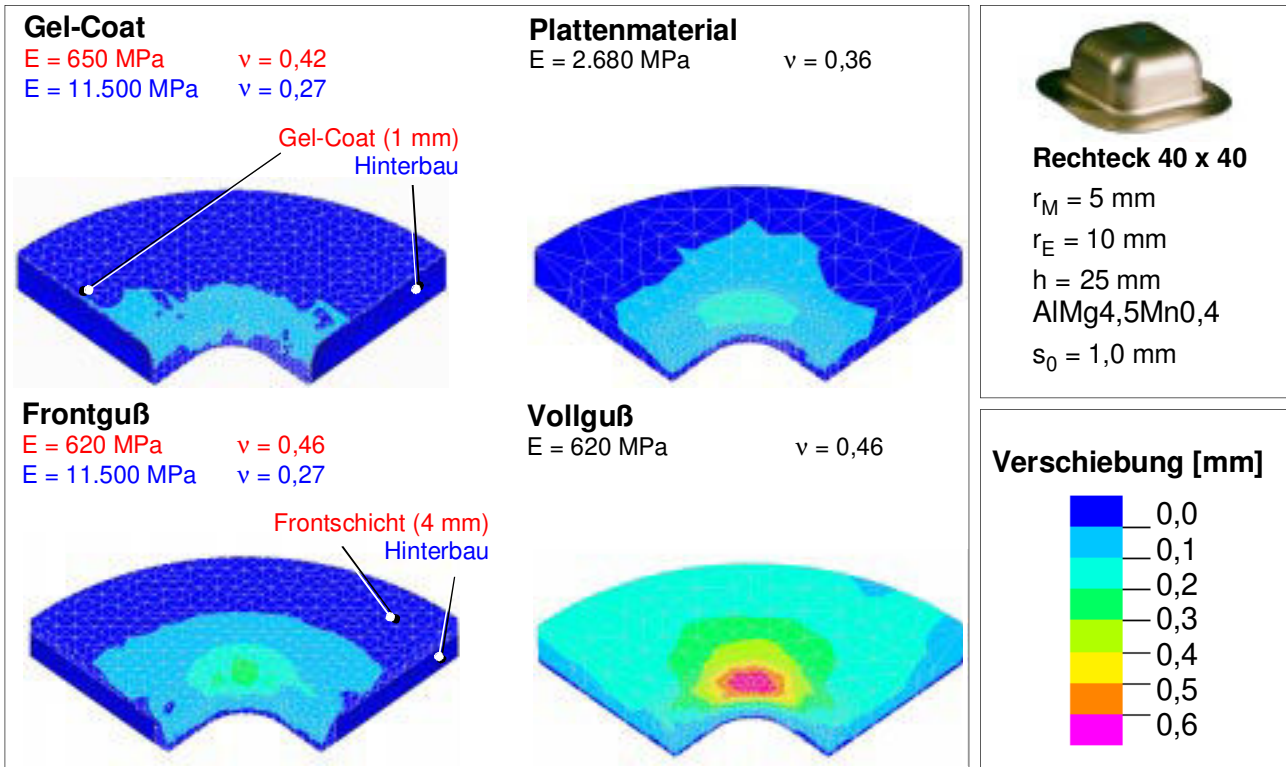


Bild 74: Knotenverschiebungen an elastischen Kunststoffmatrizen, hergestellt mit verschiedenen Fertigungsverfahren

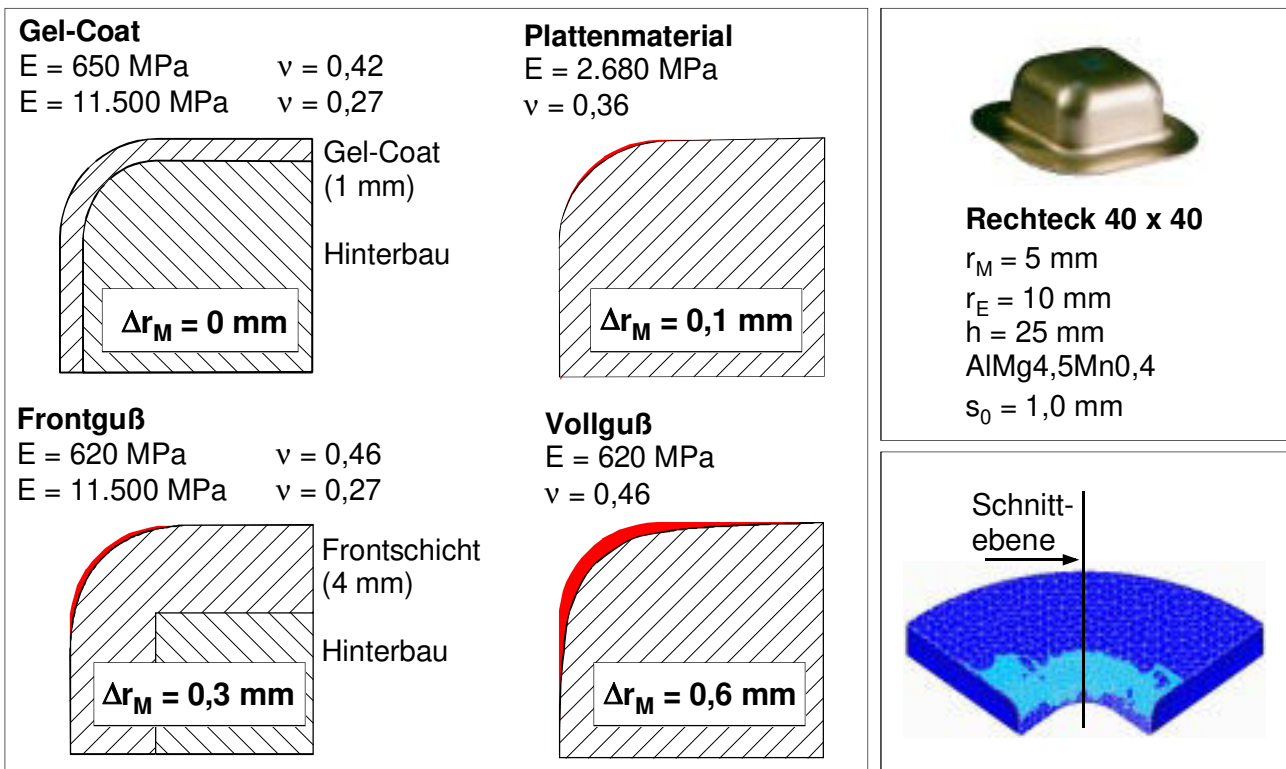


Bild 75: Verschiebungen entlang eines radialen Schnitts in der Ecke des Teils

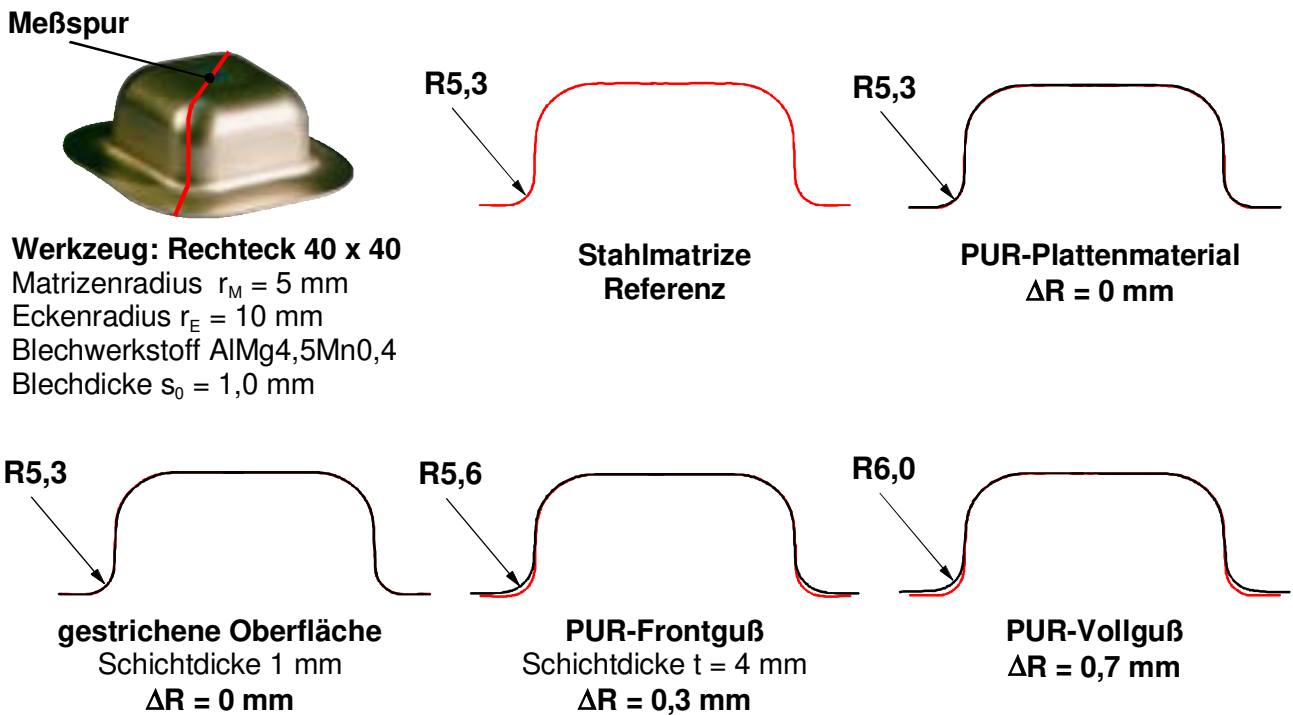


Bild 76: Radiale Schnittlinien von Teilen, gezogen mit unterschiedlichen Kunststoffwerkzeugen

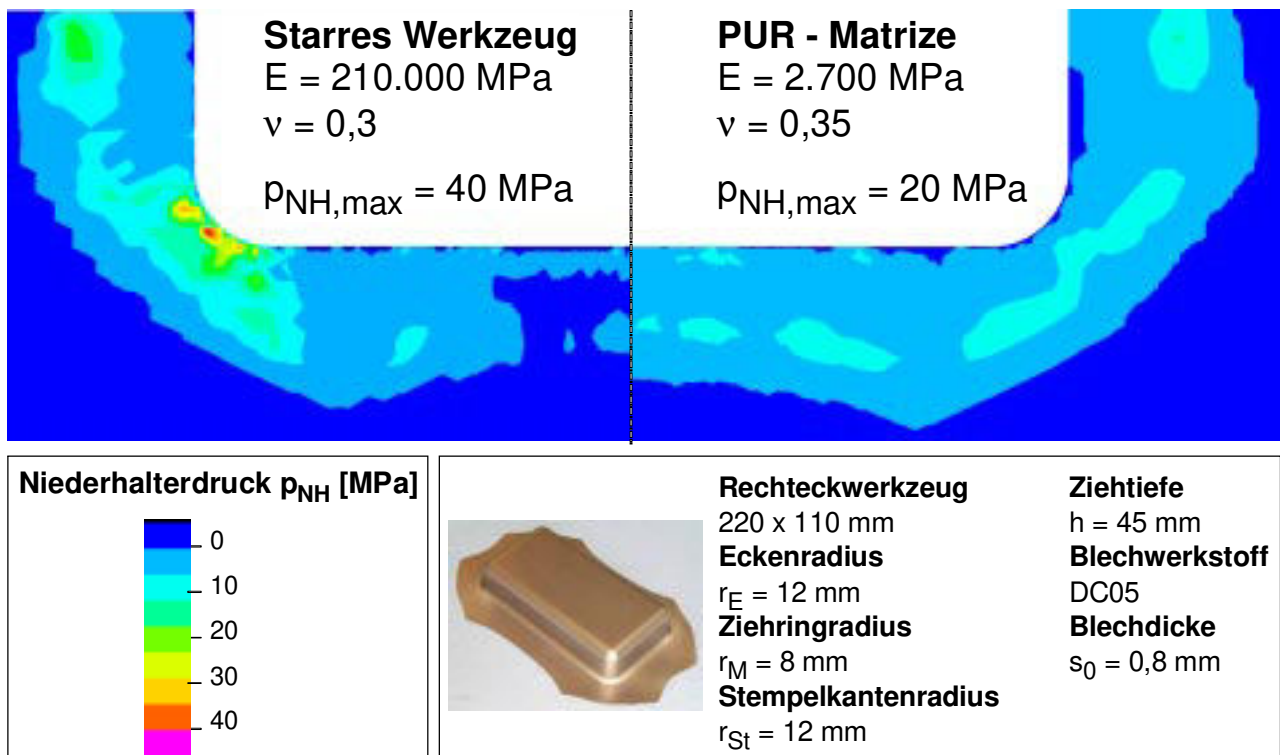


Bild 77: Drücke auf den Niederhaltern rechteckiger Werkzeuge. Simulationsergebnisse mit starrer und elastischer Matrize

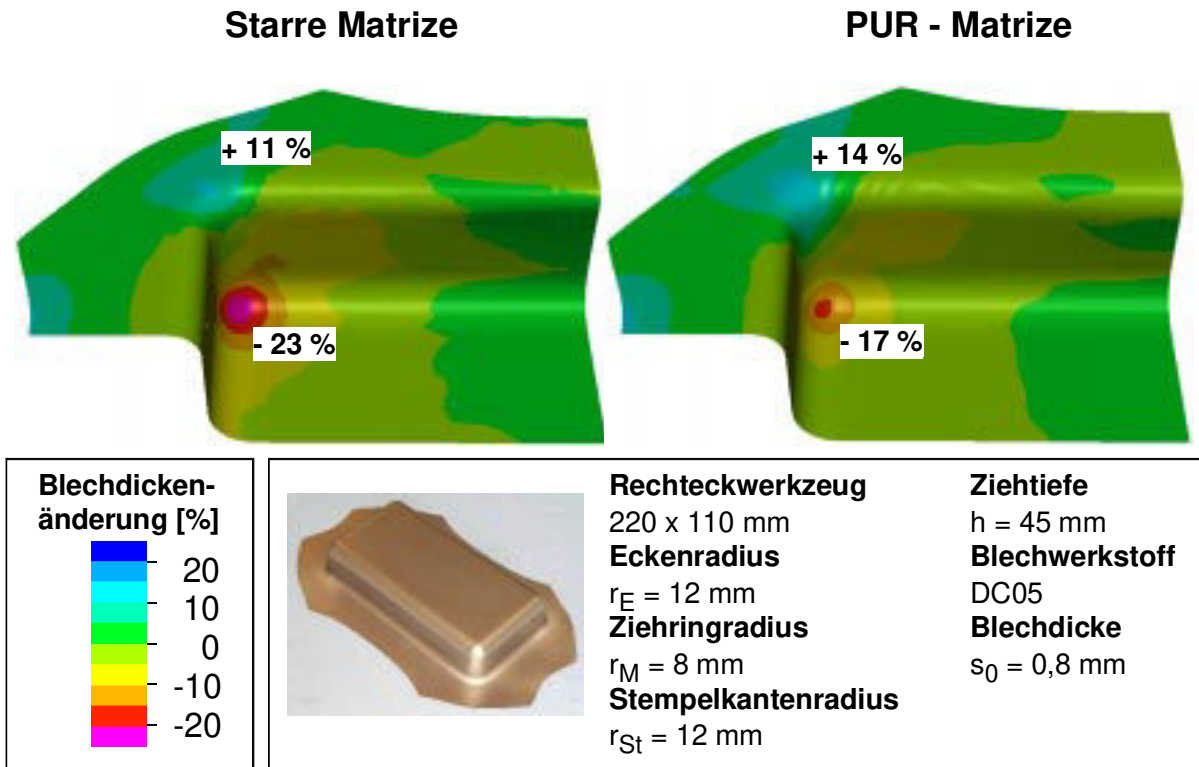


Bild 78: Blehdickenänderungen an rechteckigen Ziehteilen (220 x 110 mm), gezogen mit starrer und elastischer Matrize

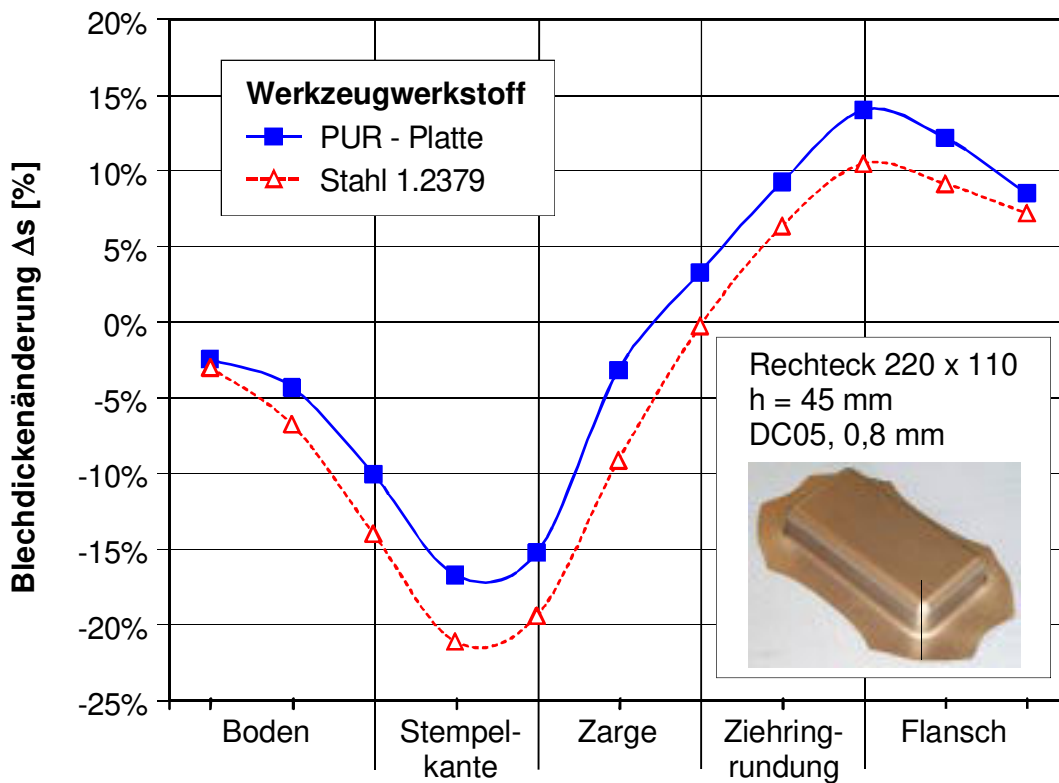


Bild 79: Blehdickenverläufe in den Ziehteilecken von rechteckigen Teilen, gezogen mit Stahl- und mit Kunststoffziehring

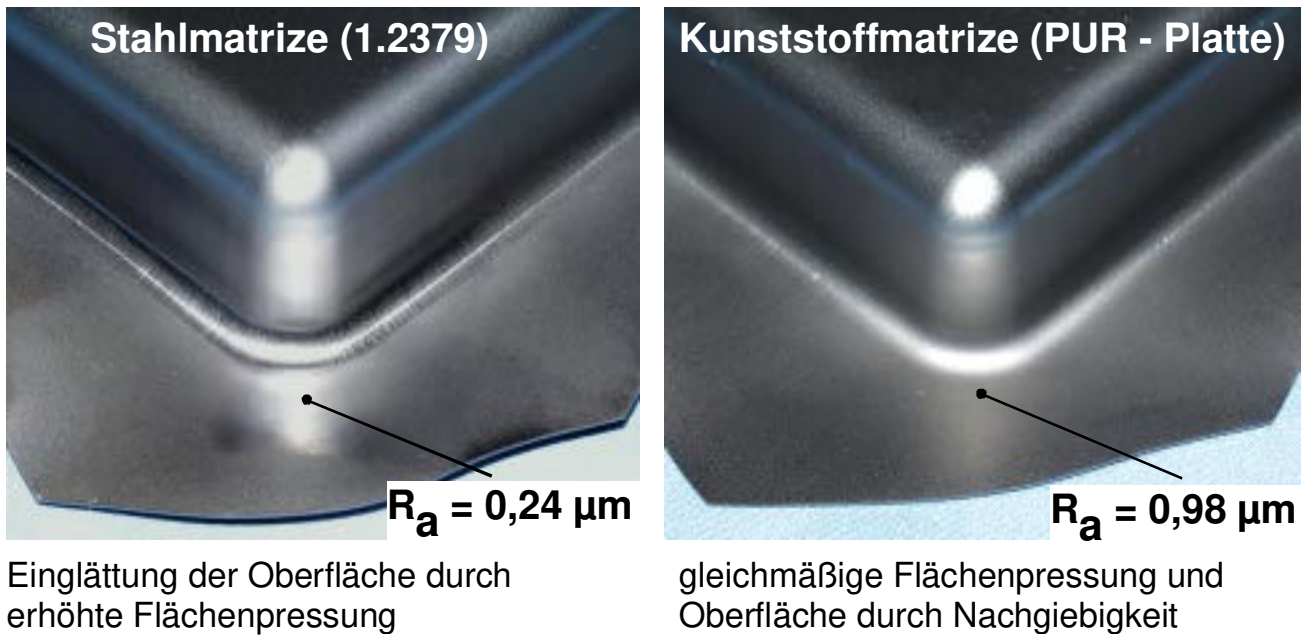


Bild 80: Oberflächen in der Ecke rechteckiger Teile, gezogen mit Stahl- und mit Kunststoffmatrize. $R_{a0} = 0,95 \mu\text{m}$

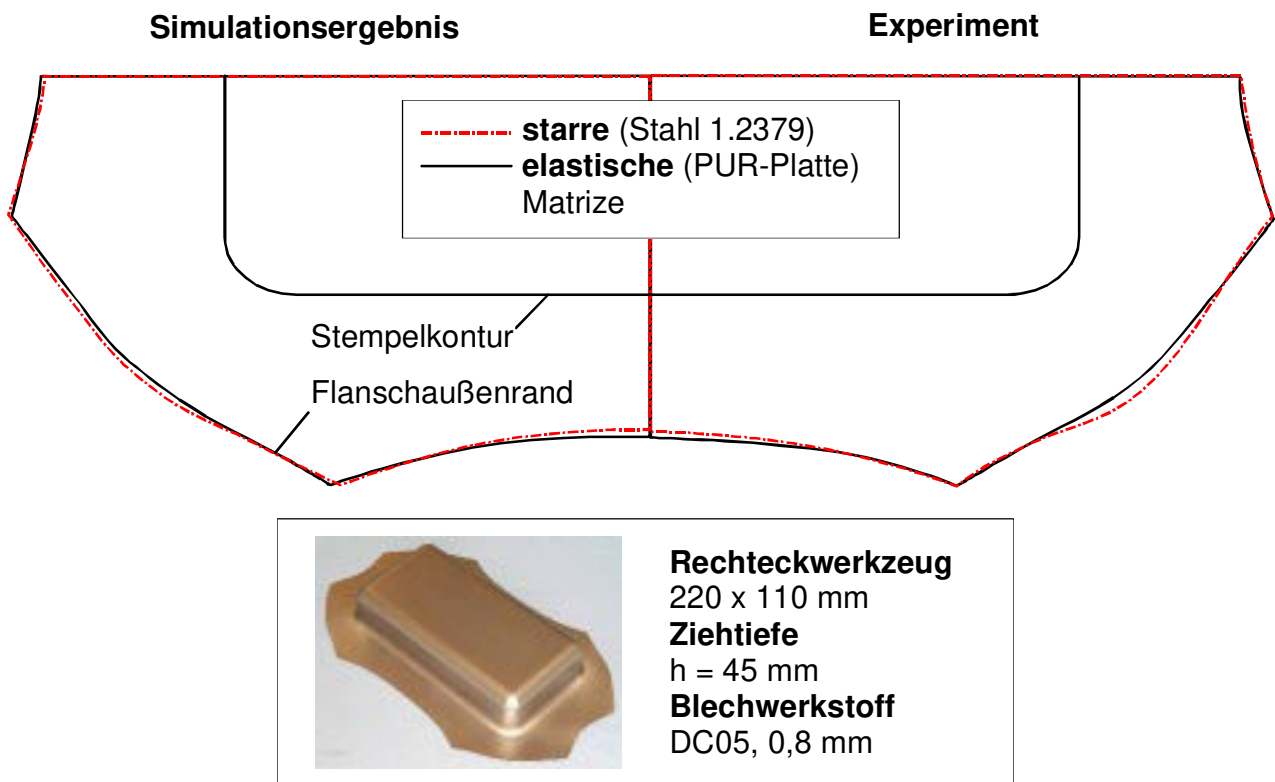


Bild 81: Flanscheinzug beim Tiefziehen mit starrer und mit nachgiebiger Matrize - Vergleich von Simulation und Experiment

Abmessungen

Länge: $l = 350 \text{ mm}$
 Breite: $b = 110 \text{ mm}$
 Höhe: $h = 50 \text{ mm}$
 Blechdicke: $s = 1,2 \text{ mm}$

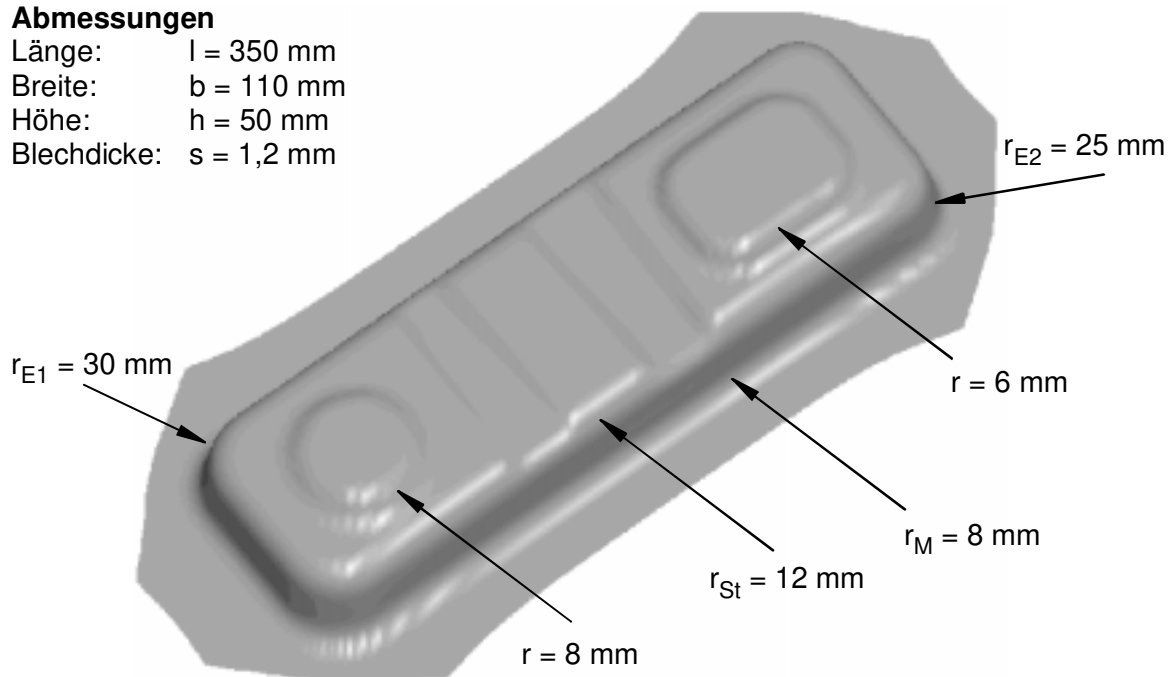


Bild 82: Abmessungen des Teils „Ventildeckel“

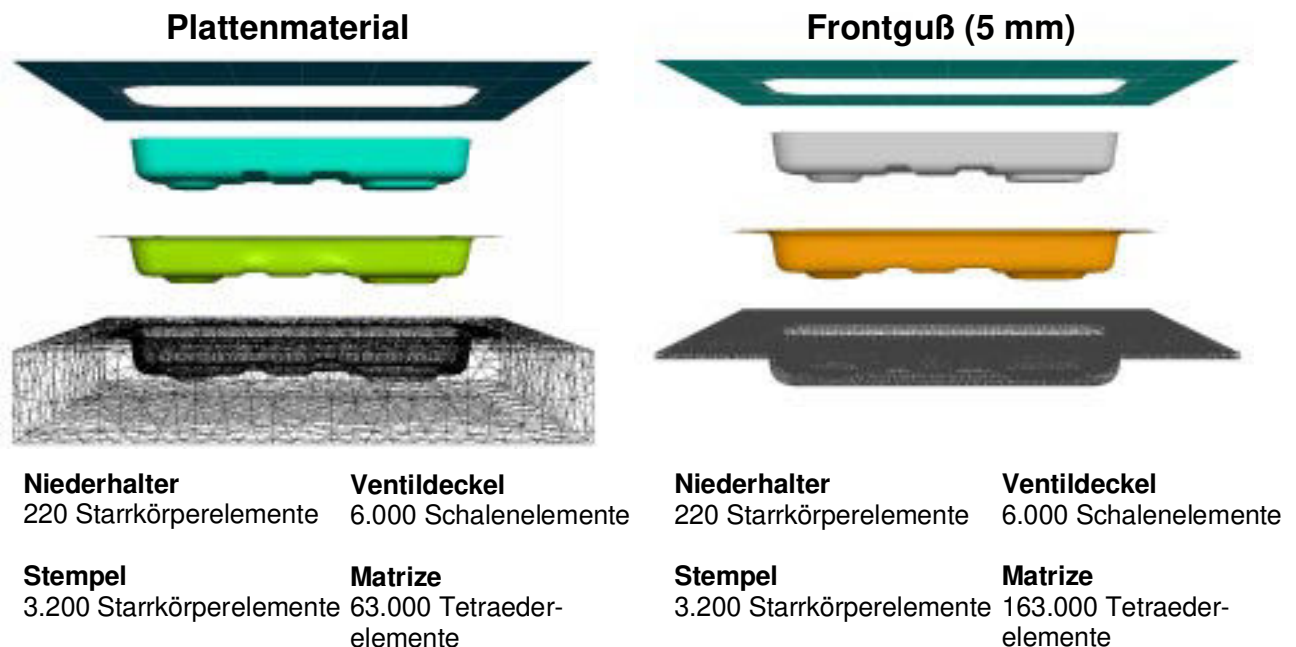
FEM - Modelle

Bild 83: Finite Elemente Modelle des Teils „Ventildeckel“ mit elastischen Matrizen

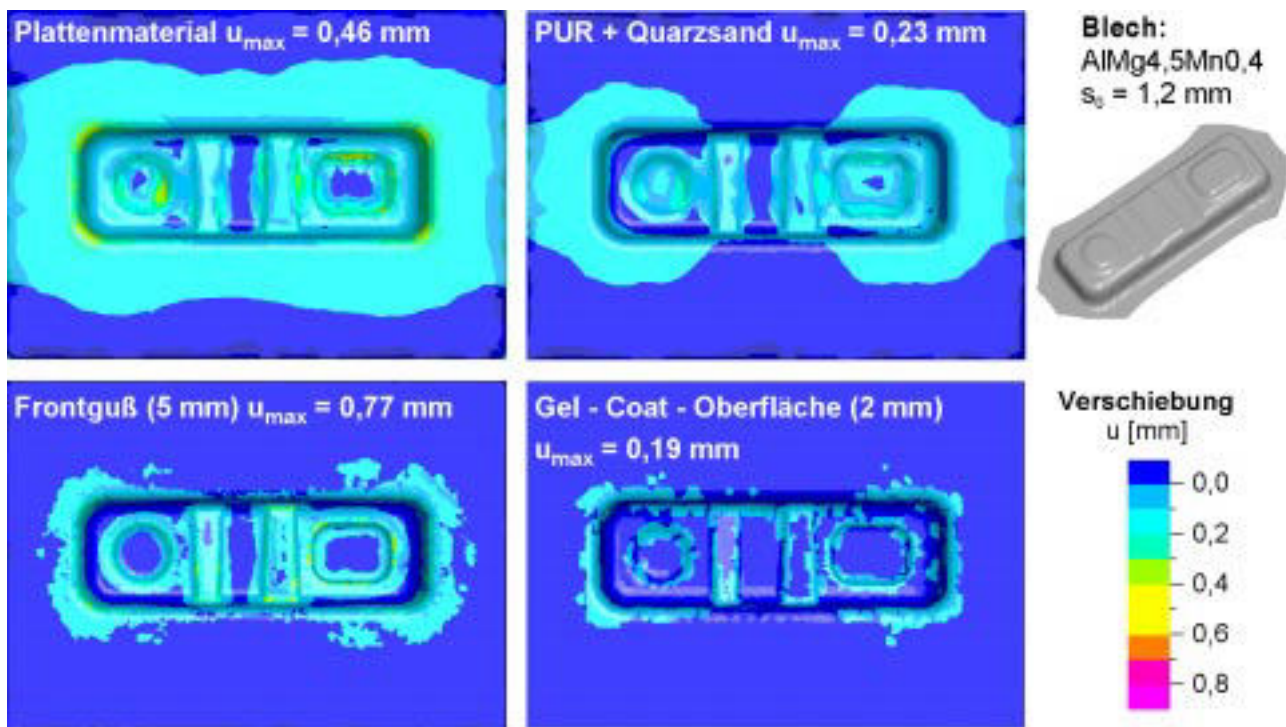


Bild 84: Simulationsergebnisse des Teils „Ventildeckel“. Verschiebungen an unterschiedlichen Matrizen

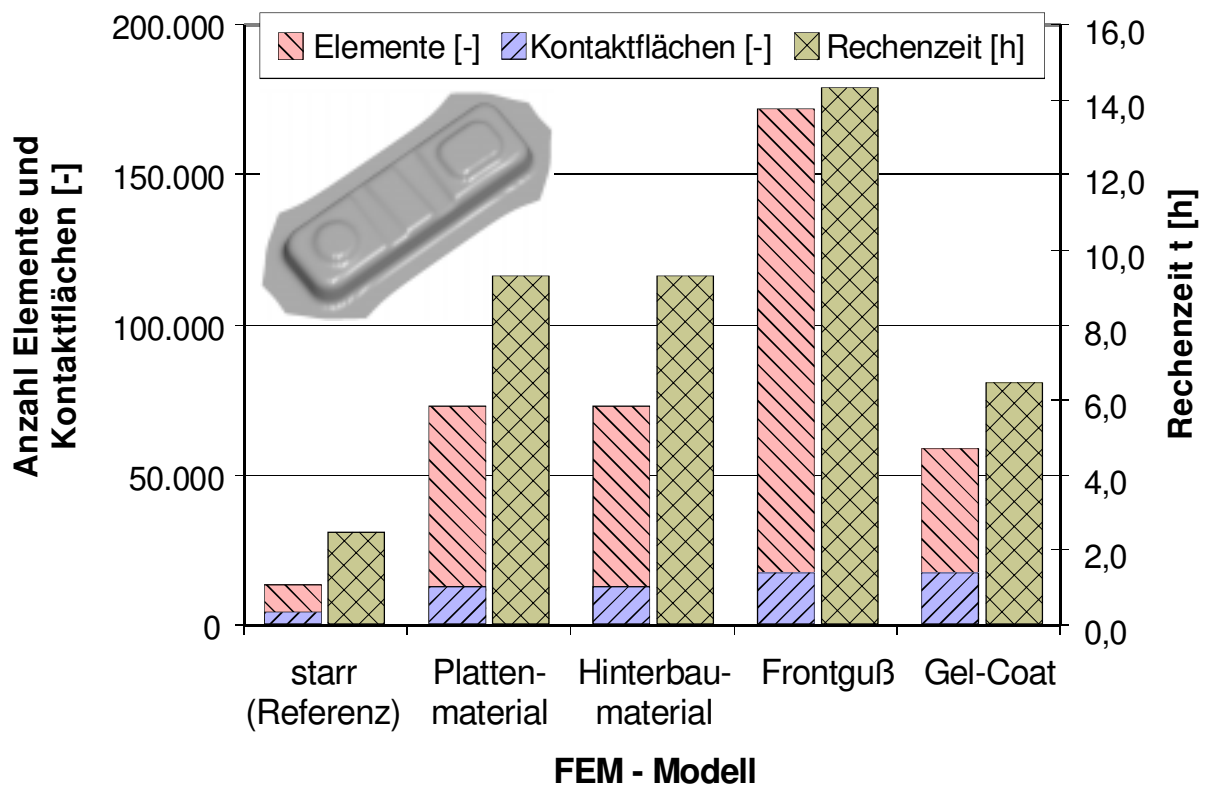


Bild 85: Vergleich der Elementanzahl und der Rechenzeit bei den unterschiedlichen Finite Elemente Modellen

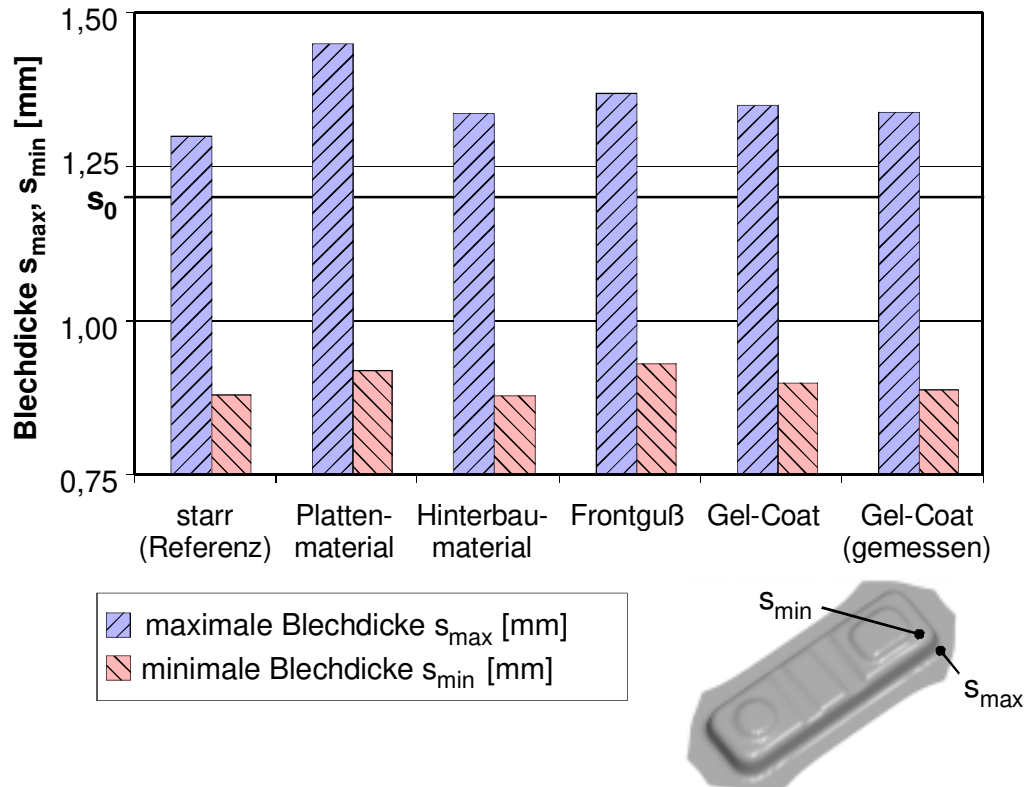


Bild 86: Vergleich einiger Prozeßgrößen beim Tiefziehen mit unterschiedlichen Matrizen

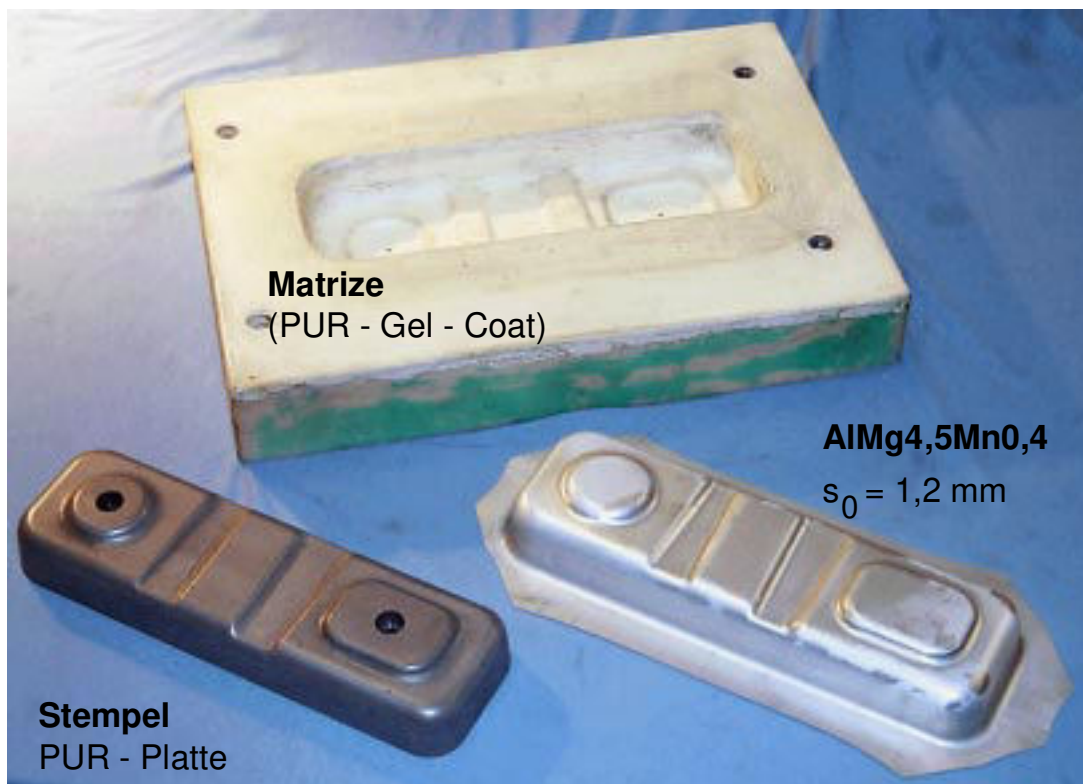


Bild 87: Tiefziehwerkzeug aus Kunststoff und Teil Nr. 500

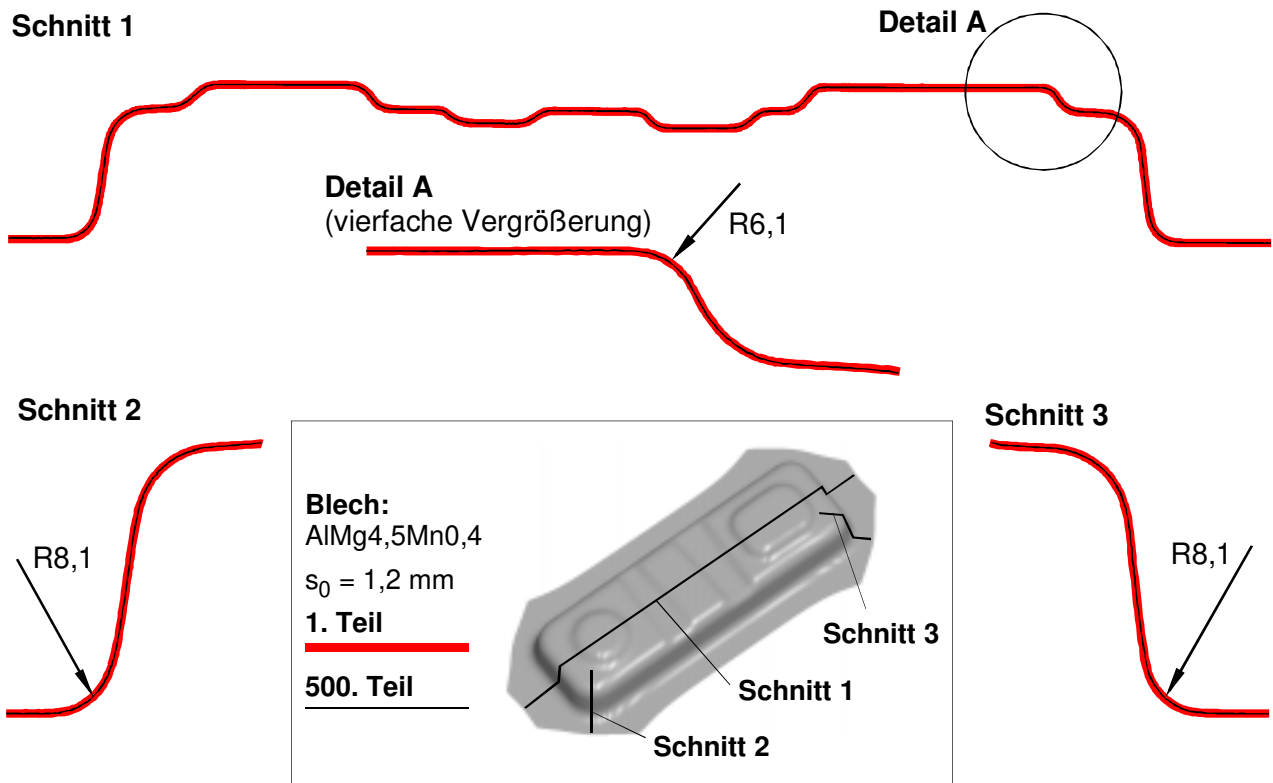
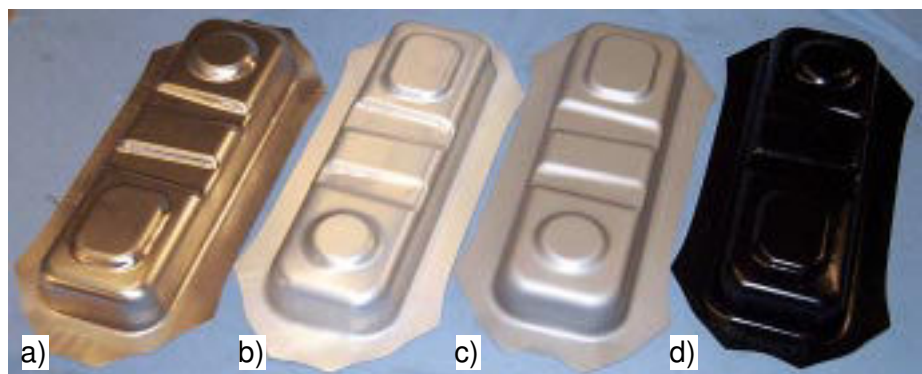


Bild 88: Unterschiede zwischen dem 1. und dem 500. Teil

AlMg4,5Mn0,4; 1,2 mm

- a) unbeschichtet
- b) Trockenschmierstoff
- c) Bonazinc 2004
- d) KTL-Ersatzlackierung



DC05+ZE; 0,75 mm

- a) verzinkt
- b) Bonazinc 3000
- c) Zincroplex Black
- d) Polyesterlackierung



Bild 89: Tiefziehteile mit verschiedenen organischen Beschichtungen, gezogen mit Kunststoffmatrize

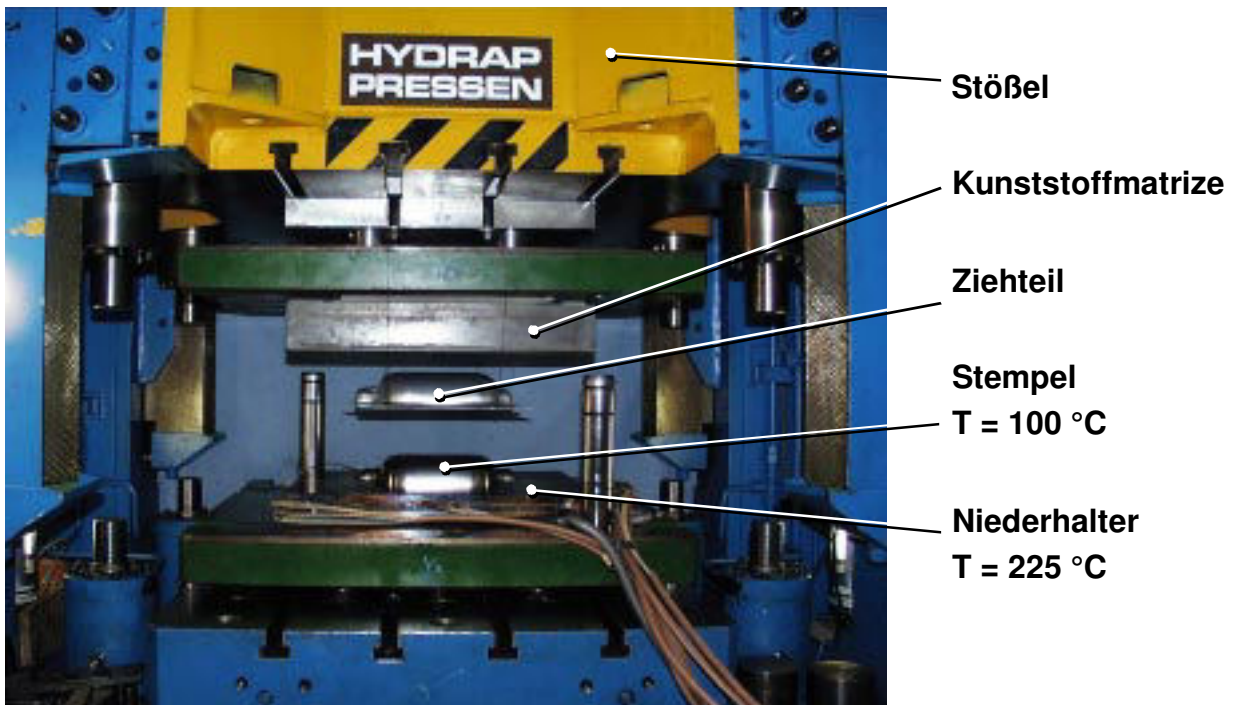


Bild 90: Temperaturbeständiges Kunststoffwerkzeug für die Prototypenfertigung von Teilen aus Magnesiumlegierungen [Fran99]



Bild 91: Teile, umgeformt mit temperaturbeständigem Tiefziehwerkzeug [Fran99]

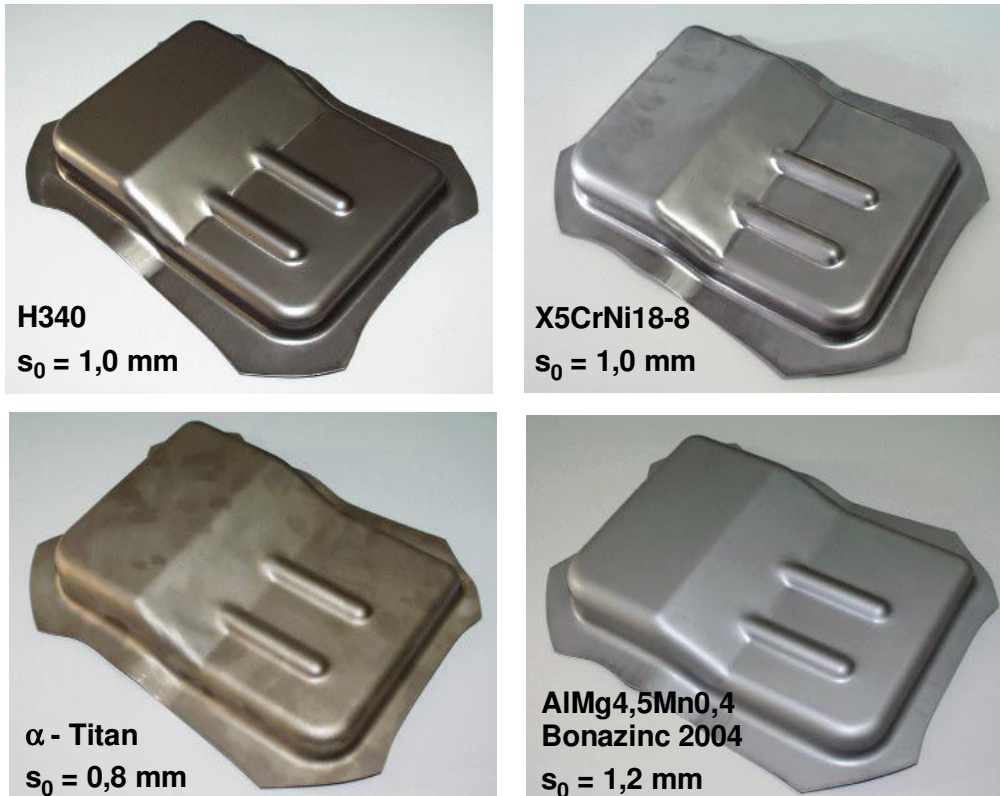
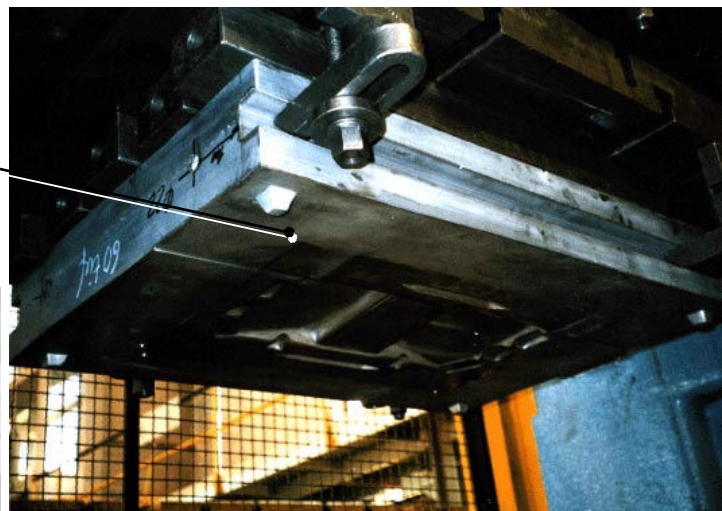


Bild 92: Tiefziehteile aus unterschiedlichen Werkstoffen, gezogen mit Galvanotiefziehwerkzeug

Matrize

Galvanoschale (5 mm)
Hinterbau:
PUR Stahl-gefüllt



Stempel
(PUR-Plattenmaterial 1)

Niederhalter
(PUR-Frontguß)

Bild 93: Praxiswerkzeug zur Fertigung eines Verstärkungsblechs als Doppelteil (Quelle: ebalta Kunststoff GmbH)



DC04
0,75 mm
Teil Nr. 10.000

DC05+ZE
0,75 mm
schweißbares
KTL-Ersatzsystem
Zincroplex Black

Bild 94: Lackiertes Blech (KTL-Ersatzsystem Zincroplex Black) und Blechteil Nr. 10.000, gezogen mit Galvanotiefziehwerkzeug

Tabelle 1: Verschleißmechanismen und Verschleißerscheinungen [DIN50320]

Verschleißmechanismus	Verschleißerscheinung
Adhäsion	Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen, Materialübertrag
Abrasion	Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen
Oberflächenzerrüttung	Risse, Grübchen
Tribochemische Reaktion	Reaktionsprodukte (Schichten, Partikel)

Tabelle 2: Eigenschaften der Blechwerkstoffe, die bei den Verschleißuntersuchungen zum Einsatz kamen

	DC01, DC01+ZE	DC04	AlMg4,5Mn0,4
Blechdicke s_0	1,0 mm	1,0 mm	1,2 mm
Streifenbreite b	60 mm	60 mm	40 mm
Dehngrenze $R_{p0,2}$	230 MPa	115 MPa	127 MPa
Zugfestigkeit R_m	350 MPa	285 MPa	290 MPa
Gleichmaßdehnung A_g	22 %	30 %	28 %
Beschichtung	unbeschichtet, elektrolytisch verzinkt	-	Trockenschmierstoff
Schichtdicke	7,5 μm	-	3 μm

Tabelle 3: Eigenschaften der Werkzeugwerkstoffe, die bei den Verschleißuntersuchungen zum Einsatz kamen

Werkstoff	Werkstoffart	Füllstoff	Shore - D -Härte	Elastizi- tätsmodul E [MPa]	Querkon- traktions- zahl ν [-]	Zug- festigkeit σ_B, Zug [MPa]	Druck- festigkeit σ_B, Druck [MPa]	Bruch- dehnung ϵ_B, Zug [%]
Plattenmaterial 1	Polyurethan	-	85 ¹⁾	2.600	0,34	71	85,5 ¹⁾	4,7
Plattenmaterial 2	Polyurethan	-	90 ¹⁾	2.685	0,36	69	90 ¹⁾	4,5
Plattenmaterial 3	Epoxid	-	90 ¹⁾	2.800 ¹⁾	-	-	-	-
Plattenmaterial 4	Polyurethan	Alumi- nium	89 ¹⁾	2.750 ¹⁾	-	55 ¹⁾	75 ¹⁾	-
Gel-Coat 1	Polyurethan	-	70 ¹⁾	650	0,42	19,0	-	> 70
Frontguß	Polyurethan	-	70 ¹⁾	610	0,46	19,5	-	> 70
Hinterfüllung	Polyurethan	Quarz- sand	75 ¹⁾	2.800 - 12.000	0,41 - 0,27	40,2 - 12,1	85 - 95 ¹⁾	1,4 - 0,4

¹⁾ Herstellerangaben

Tabelle 4: Verschleißraten der unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffe

Verschleißrate W [mm/Prüfzyklus]				
Werkzeugwerkstoff	Blechwerkstoff			
	DC01	DC04	DC01+ZE	AlMg4,5Mn0,4 Trocken- schmierstoff
PUR-Gel-Coat	$5,7 \times 10^{-5}$	-	-	-
PUR-Frontguß	$2,4 \times 10^{-4}$	-	-	-
PUR-Platte 1 $p_N = 15 \text{ MPa}$ Wedolit Z1046	$2,3 \times 10^{-4}$ $1,1 \times 10^{-4}$ $1,1 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$ - -	$5,6 \times 10^{-5}$ - -	- - -
PUR-Platte 2	$1,4 \times 10^{-4}$	-	$3,6 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-6}$
PUR-Hinterbau				
0 % Quarzsand	$5,6 \times 10^{-4}$	-	-	-
33 % Quarzsand	$4,7 \times 10^{-3}$	-	-	-
50 % Quarzsand	$4,9 \times 10^{-3}$	-	-	-
66 % Quarzsand	$6,0 \times 10^{-3}$	-	-	-
75 % Quarzsand	$7,0 \times 10^{-3}$	-	-	-
PUR-Platte (Aluminium-gefüllt)	$9,9 \times 10^{-4}$	-	-	-
Epoxid-Platte	$8,8 \times 10^{-4}$	-	-	-
Metallspritztechnik	$8,4 \times 10^{-4}$	-	-	-
Galvanoschalen				
25 HRC	$4,2 \times 10^{-6}$	-	-	-
48 HRC	$5,5 \times 10^{-6}$	-	-	-
Feinzinklegierung	$2,7 \times 10^{-4}$	-	-	-
Sn-Bi-Legierung	$1,7 \times 10^{-3}$	-	-	-
Grauguß GG25	$9,6 \times 10^{-6}$	-	-	-
Prüfparameter (wenn nicht anders angegeben):				
mittlere Flächenpressung: $p_N = 30 \text{ MPa}$				
Hub: $h = 55 \text{ mm}$				
14 Prüfzyklen / min				
Schmierung: Anticorit 3 g/m^2				

Werkstoff	Beschichtung	Blechdicke	Dehngrenze	Zugfestigkeit	Verfestigungsexponent	mittlere senkrechte Anisotropie	Mittenrauhwert	Gemittelte Rautiefe
		s ₀ [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	n [-]	r _m [-]	R _a [μm]	R _{ZDIN} [μm]
Aluminiumwerkstoffe								
Al99,5	unbeschichtet	1,00	44	74	0,17	0,84	0,06	0,59
AlMg4,5Mn0,4	unbeschichtet	1,00	131	289	0,31	0,81	0,76	3,69
AlMg4,5Mn0,4	unbeschichtet	1,20	137	295	0,30	0,61	0,46	5,01
AlMg4,5Mn0,4	Trockenschmierstoff	1,20	127	290	0,29	0,63	0,69	6,43
AlMg4,5Mn0,4	Bonazinc 2004	1,20	117	273	0,30	0,65	2,61	19,9
AlMg4,5Mn0,4	KTL-Ersatzlackierung	1,20	128	290	0,28	0,68	0,38	3,56
AlMg0,4Si1,2	unbeschichtet	1,00	123	231	0,27	0,65	0,56	2,87
AlMg0,4Si1,2	unbeschichtet	1,20	110	216	0,25	0,64	0,43	4,31
AlMg0,4Si1,2	Trockenschmierstoff	1,20	98	195	0,26	0,63	0,60	5,72
AlMg0,4Si1,2	Bonazinc 2004	1,20	141	241	0,25	0,64	2,33	18,4
AlMg0,4Si1,2	KTL-Ersatzlackierung	1,20	149	254	0,27	0,65	0,39	3,78
Stahlwerkstoffe								
DC05	unbeschichtet	0,59	165	310	0,24	1,61	0,96	4,52
DC05	unbeschichtet	0,78	164	321	0,24	1,62	0,95	4,48
DC05	unbeschichtet	1,01	160	315	0,24	1,65	1,01	5,64
DC06	unbeschichtet	0,79	139	302	0,28	2,01	0,66	4,51
DC05+ZE	elektrolytisch verzinkt	0,80	166	316	0,24	1,62	1,56	10,5
DC05+ZE	Trockenschmierstoff	0,77	159	281	0,23	1,81	1,61	11,8
DC05+ZE	Bonazinc 3000 (+ Drylub)	0,72	145	258	0,24	1,79	1,53	11,7
DC05+ZE	Zincroplex Black	0,75	177	291	0,22	1,88	1,26	11,3
DC05+ZE	Polyesterbeschichtung	0,71	156	263	0,23	1,79	0,49	4,08
ZStE280i+ZE	elektrolytisch verzinkt	0,71	237	325	0,22	0,72	0,98	8,71
H340+ZE	elektrolytisch verzinkt	0,75	380	457	0,16	0,91	0,96	5,61

Tabelle 5: Eigenschaften der beschichteten Stahl und Aluminiumfeinbleche

11 Literatur

- 1 [Alsm98] Alsmann, M.; Behrens, B.A.; Overrath, J.: Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften von organisch vorbeschichteten Feinblechen für die Automobilindustrie. Tagungsband zum Industriekolloquium "Fertigen in Feinblech". Clausthal-Zellerfeld, 10.-11. Dezember 1998, S. 66/70.
- 2 [Amin90] Amino, H.; Nakamuro, K.; Nakagawa, T.: Counter-Pressure Deep Drawing and its Application in the Forming of Automobile Parts. Journal of Material Processing Technology. (1990) Nr. 23, S. 243/265.
- 3 [Been98] Beenken, H.; Hahn, O.; Liebrecht, F.; Schulte, A.; Voelkner, W.: Stanznieten und Durchsetzfügen von organisch beschichteten und höherfesten Stahlblechen. Stahl und Eisen. 118 (1998) Nr. 6, S. 67/71.
- 4 [Behr98] Behrens, B.-A.; Overrath, J.: Optimierung verzinkter Stahlfeinbleche. Bänder Bleche Rohre. (1998) Nr. 9, S. 138/146.
- 5 [Bely77] Belytschko, T.; Mullen, R.: Explicit Integration of Structural Problems. In: Finite Elements in Nonlinear Mechanics. Editor: Bergan, P. 1977.
- 6 [Blüm79] Blümel, K. W.; Krechter, F: Reibungsvorgänge im Faltenhalter bei der Umformung von Feinblech. Thyssen Technische Berichte 2 (1979) Nr. 2, S. 120-125..
- 7 [Bräu98] Bräunlich, H.; Demmler, M.: Umformverhalten oberflächenbeschichteter Stahlbleche. Bänder Bleche Rohre. (1998) Nr. 10, S. 18/23.
- 8 [Braz85] Brazier, W.G.; Thompson, R.W.: The Effect of Zinc Coatings, Die Materials, and Forming Lubricants. SAE Technical Paper 850274 (1985).
- 9 [DIN79] DIN 50320: Verschleiß (Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes). Deutsches Institut für Normung. Berlin, Köln: Beuth-Verlag 1979.
- 10 [Doeg71] Doege, E.; Fetzer, H.; Kellenbenz, R.; Bergmann, E.: Tiefziehen auf einfach- und doppeltwirkenden Karosseriepessern unter Berücksichtigung des Gelenkantriebs. Werkstatt und Betrieb. 104 (1971) Nr. 10, S. 737/747.
- 11 [Doeg95] Doege, E. et al.: Ziehtheilauslegung auf der Basis elementarer Berechnungsansätze. In: Fortschritte in der Werkzeugtechnik. S. 169/194. Bamberg: Maisenbach Verlag 1995.
- 12 [Doeg97] Doege, E.; Dröder, K.: Einsatz von Keramik als Werkzeugwerkstoff in der Blechumformung. Bänder Bleche Rohre. (1997) Nr. 12, S. 16/21.

- 13 [Doeg98] Doege, E.; Dröder, K.; Janssen, S.: Leichtbau mit Magnesiumknetlegierungen – Blechumformung und Präzisionsschmieden technischer Mg-Legierungen. wt Werkstatttechnik. 88 (1998), Nr. 11/12 S. 465/468.
- 14 [Eiss81] Eiss, N.S.: CRC Handbook of Lubrication. Band 2: Wear of Nonmetallic Materials. Boca Raton, Florida: CRC Press 1980.
- 15 [Fran99] Frank, C.; Dröder, K.: Kunststoffwerkzeug für Prototypenteile aus Magnesiumfeinblech. Bänder Bleche Rohre. (1999) Nr. 5, S. 28/30.
- 16 [Furr98] Furrer, P.; Raiber, A.: Aluminiumbleche und andere Halbzeuge für den kostengünstigen Leichtbau. Tagungsband zum Industriekolloquium "Fertigen in Feinblech". Clausthal-Zellerfeld, 10.-11. Dezember 1998, S. 24/29.
- 17 [Girs97] Girschewski, B.; Hoffmann, H.; Lang, S.: Einsatzpotential von AlMg-Blechen in der Karosserieaußenhaut. Blech Rohre Profile. (1997) Nr. 12, S. 42/45.
- 18 [Gotz98] Gotzmann, G.; Ruffer, L.: Polyurethane - Polymerwerkstoffe mit maßgeschneidertem Eigenschaftspotential. Ingenieur-Werkstoffe. 7 (1998) Nr. 1, S. 8/12.
- 19 [Haas96] Haas, E.; Wagner, S.: Induktionshärten von Großwerkzeugen. Tagungsband zum Kolloquium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“. Fellbach, 7.-8. Mai 1996, S. 105/122.
- 20 [Haas97] Haase, I.; Franke, R.: Kunststoff-Verbundwerkstoffe für Gleitelemente bei Extrembeanspruchungen. Tribologie und Schmierungstechnik. 44 (1997) Nr. 6, S. 272/276.
- 21 [Haug94] Haug, E. et al.: Einsatz der FEM zur Verkürzung des Entwicklungszyklus beim Karosseriedesign. Tagungsband zum Umformtechnischen Kolloquium Darmstadt 1994 (UKD´94). S. 15.1/15.7.
- 22 [Hill48] Hill, R.: A Theory of Yielding and Plastic Flow on Anisotropic Metals. Proceedings of the Royal Society. 193 A (1948), S. 281/297.
- 23 [Hoch91] Hochwald, P.: Werkzeuge für kleine Serien zum Umformen von Blechen. Bänder Bleche Rohre. (1991) Nr. 9, S. 47/49.
- 24 [Iliu97] Iliuc, I.: Gleitverschleiß von rauhen Oberflächen. Tribologie und Schmierungstechnik. 44 (1997) Nr. 4, S. 174/177.
- 25 [ISO527] ISO 527-1. Plastics – Determination of Tensile Properties - Part 1: General Principle. 1993.
- 26 [ISO604] ISO 604. Plastics – Determination of Compressive Properties. 1993.

-
- 27 [Jänc99] Jänchen, P.: Neuere Entwicklungen in der hydromechanischen Bauteilfertigung. Tagungsband zum 16. UKH (Umformtechnisches Kolloquium Hannover). Hannover, 25.-26. Februar 1999, S. 129/137.
- 28 [Joha87] Johannisson, T.; Beaumont, P.: High Pressure Die Forming of Sheet Metal. Metallurgia. 54 (1987) Nr. 10, S. 194/196.
- 29 [Khas99] Khashaba, M.; El-Giushy, M.; Ali, W.: Experimental Study of Scratch Testing of Steel. Tagungsband der 2nd Assiut University Int. Conf. on Mech. Eng. Advanced Tech. for Indust. Production. Assiut, Ägypten, 2.-4. März 1999.
- 30 [Kell93] Keller, K.; Eversberg, K.-R.: Anwendungsorientierte Werkzeugbeschichtung mittels CVD-, PVD- und Nitriertechnik. Tagungsband zum EFB-Kolloquium „Reibung, Schmierung, Tribologie in der Blechbearbeitung“. Fellbach, 9.-10. März 1993.
- 31 [Kien98] Kieninger, A.; Kölker, W.: Fräsen von Kunststoffen im Modell- und Designbau. VDI-Z Special „Werkzeug und Formenbau“. (1998) Nr. 11, S. 42/44.
- 32 [Klei97] Kleiner, M.; Gartzke, A.; Kolleck, R.: Experimental and Finite Element Analysis of Capabilities and Limits of a Combined Pneumatic and Mechanical Deep Drawing Process. Annals of the CIRP, 46 (1997) Nr. 1.
- 33 [Mich92] Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 3. Auflage. München, Wien: Hanser Verlag 1992.
- 34 [Mind92] Mindrup, W.: Möglichkeiten der Fluidzellpresstechnik. Tagungsband zum Kolloquium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“. Fellbach, 7.-8. April 1992. S. 305/318.
- 35 [Müns98] Münster, A.; Rafat, N.: Prüfung neuartiger Tiefziehschmierstoffe für Aluminium. Tribologie und Schmierungstechnik. 45 (1998) Nr. 1, S. 25/27.
- 36 [Neub97] Neubauer, A.; Bolt, P. J.; Rozier, P.J.C.M.; Untersuchungen zum Verschleißverhalten alternativer Matrizenwerkstoffe beim Tiefziehen. Bänder Bleche Rohre. 5 (1997), S. 34/40.
- 37 [Oste94] Ostermann, F.: Fertigungstechnische Empfehlung für bandbeschichtete und oberflächenveredelte Al-Blecherzeugnisse. Tagungsband zum Kolloquium „Blechbearbeitung“. Hannover, 18.-19. Oktober 1994, S. 43/57.
- 38 [Radk83] Radke, H.: Blechumformung mit Werkzeugen aus niedrigschmelzendem Metall. Bänder Bleche Rohre. (1983) Nr. 7, S. 193 ff.

- 39 [Raßh94] Raßhofer, W.: Recycling von Polyurethan-Kunststoffen. Heidelberg: Hüthig Verlag 1994.
- 40 [Roll94] Roll, K.; Gröber, M.: Numerische Prozeßsimulation in der Blechumformung – Möglichkeiten und Grenzen. Tagungsband zum Kolloquium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“. Fellbach, 3.-4. Mai 1994, S. 423/442.
- 41 [Schi71] Schinnerling, J.: Die Explosionsumformung. Eine neue Verfahrenstechnik der Umformung. Werkstatt und Betrieb. 104 (1971) Nr.3, S. 183/186.
- 42 [Schm29] Schmidt, M.: Die Prüfung von Tiefziehblechen. Archiv für Eisenhüttenwesen. (1929) Nr. 3, S. 213/222.
- 43 [Schu97] Schulte, S.; Schulz-Marner, H.: Verschleißprüfstand für Blechumformwerkzeuge. Bänder Bleche Rohre. (1997) Nr. 9, S. 50 ff.
- 44 [Schu99] Schulte, S.: Umformsimulation als fester Bestandteil des Produktentstehungsprozesses bei Audi. Tagungsband zum 16. UKH (Umformtechnisches Kolloquium Hannover). Hannover, 25.-26. Februar 1999, S. 263/277.
- 45 [Schw91] Schweizerhof, K.; Hallquist, J.O.: Explicit Integration Schema and Contact Formulations for Thin Sheet Metal Forming. VDI Berichte. 894 (1991), S. 404/439.
- 46 [Sieb56] Siebel, E.; Panknin, W.: Ziehverfahren der Blechbearbeitung. Metallkunde. 47 (1956) 4, S. 207-212.
- 47 [Sieg96] Siegert, K.; Haller, B.: Herstellung von Prototyp-Werkzeugen der Blechumformung mit niedrigschmelzenden Legierungen. Tagungsband zum „Deutschen Industrieforum für Technologie“. Mettmann, 13.-14. November 1996.
- 48 [Simc94] Simcak, F. et al.: Evaluation of Specific Characteristics of Zinc Coated Deep Drawing Sheets. Tagungsband zum IDDRG´94 - Arbeitsgruppentreffen. Lissabon, 16.-17. Mai 1994, S. 109/120.
- 49 [Simm52] Simmons, T.: Integrally Stiffened Wing Panels Formed by Shot Peening Method. Western Metals, January (1952).
- 50 [Stor96] Story, J.M.; Chandorkar, K.V.: Hinweise zur Werkzeuggestaltung für die Aluminium-Blechumformung Tagungsband zum Kolloquium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“. Fellbach, 7.-8. Mai 1996, S. 215/247.
- 51 [Stre94] Streefland, G.-J.: Perspektiven und Grenzen der Bearbeitung von oberflächenveredelten Blechen. Tagungsband zum Kolloquium „Blechbearbeitung“. Hannover, 18.-19. Oktober 1994, S. 59/75.

- 52 [Tekk98] Tekkaya, E.: Stand der Simulation in der Blechumformung. Blech Rohre Profile. (1998) Nr. 11, S. 62/68.
- 53 [Thom94] Thoms, V.; Fugger, B.: Werkzeuge und Verfahren für kleine und mittlere Stückzahlen. Tagungsband zum Kolloquium „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“. Fellbach, 3.-4. Mai 1994, S. 167/190.
- 54 [Thom98] Thomas, W.; Altan, T.: Application of Computer Modelling in Part, Die, and Process Design for Manufacturing of Automotive Stamping. Steel Research. 69 (1998) Nr. 4/5, S. 181/187.
- 55 [Töns96] Tönshoff, H.K.; Meyerhoff, M.: Entwicklungstendenzen im Werkzeug- und Formenbau. VDI-Z Special „Werkzeug- und Formenbau“. Nr. 11 (1997), S. 20/23.
- 56 [Töns97] Tönshoff, H.K.; Pudig, C.; Tracht, K.: Werkzeug- und Formenbau in Deutschland. wt-Produktion und Management. 87 (1997), S. 145/151.
- 57 [Träg97] Träger, K.: Metallspritzen für den Kunststoffformenbau. Tagungsband zum Kolloquium „Werkzeugbau 2000+“. Hannover, 15.-16. September 1997, S. 211/223.
- 58 [Uhli98] Uhlig, K.: Polyurethan-Taschenbuch. München: Hanser Verlag 1998.
- 59 [Wate74] Waterhouse, R.B.; Wharton, M.H.: Titanium and Tribology. Lubrication and Tribology. (1974) Nr. 1/2, S. 20/23.
- 60 [Witt80] Witthüser, K.-P.: Untersuchung von Prüfverfahren zur Beurteilung der Reibungsverhältnisse beim Tiefziehen. Dr.-Ing. Dissertation. Universität Hannover, 1980.
- 61 [Wohn93] Wohnig, W.; Nagel, U.: Einsatz beschichteter Feinbleche im Karosseriebau. Tagungsband zum EFB-Kolloquium „Reibung, Schmierung, Tribologie in der Blechbearbeitung“. Fellbach, 9.-10. März 1993.
- 62 [Wosk82] Woska, R.: Einfluß ausgewählter Oberflächenschichten auf das Reib- und Verschleißverhalten beim Tiefziehen. Dr.-Ing. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, 1982.
- 63 [Zhar94] Zharkov, V.A.: Fertigen von Karosserieteilen in kleinen Serien. Bänder Bleche Rohre. (1994) Nr. 3, S. 49/51.
- 64 [Zimn98] Zimnik, W.; Ritterbach, B.; Müll, K.: Pretex - Ein neues Verfahren zur Erzeugung texturierter Feinbleche für höchste Ansprüche. Stahl und Eisen. 118 (1998) Nr. 3, S. 75/80.

12 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Christian Frank
Geburtsdatum: 04.09.1968 in Hamburg
Familienstand: verheiratet, ein Kind

Schullaufbahn

August 1974 Einschulung Grundschule Brödermannsweg in Hamburg.
August 1978 – Juni 1987 Besuch des Heilwig-Gymnasiums in Hamburg.

Wehrdienst

01.10.87 – 31.12.88 Artillerieregiment 6 in Kellinghusen, Schleswig-Holstein.

Studium

Oktober 1988 Aufnahme des Maschinenbaustudiums an der TU Braunschweig.
01.09.91 – 15.08.92 Auslandsstudium an der University of Waterloo in Ontario, Kanada.
August 1994 Studienabschluß als Dipl.-Ing. Maschinenbau.

Berufliche Tätigkeiten

01.09.94 – 30.06.95 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Dortmund am Lehrstuhl für Baumechanik und Statik.
seit 15.07.95 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Hannover am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen in der Abteilung „Technologie/Blechumformung“.