

6 Eigenschaften der Beschichtungen

6.1 Phosphatschichten

6.1.1 Eigenschaften der Phosphatschichten

Phosphatierte Rohteile sind von einer Schicht mit einer gleichmäßigen Dicke zwischen $12\ \mu\text{m}$ und $20\ \mu\text{m}$ bedeckt (Bild 6.1.a). Sie weisen in fast allen untersuchten Fällen eine geschlossene Beschichtung der Oberfläche auf. Stellen mit großer Oberflächenrauheit werden nicht ganz durchgehend beschichtet. Auch in Vertiefungen, die durch beim Reinigungsstrahlen oder bei Kollision der Rohteile entstandene Späne überdeckt sind, ist eine Phosphatschicht vorhanden (Bild 6.1.b). Oxide an der Oberfläche können die Beschichtung verhindern, treten aber nur in geringer Menge auf. Die Phosphatschicht ist deutlich weicher als der Werkstückwerkstoff oder auch die mechanisch aufgetragenen, metallischen Schichten. Dies führt bei der metallographischen Präparation zu Auswaschungen der Beschichtung.

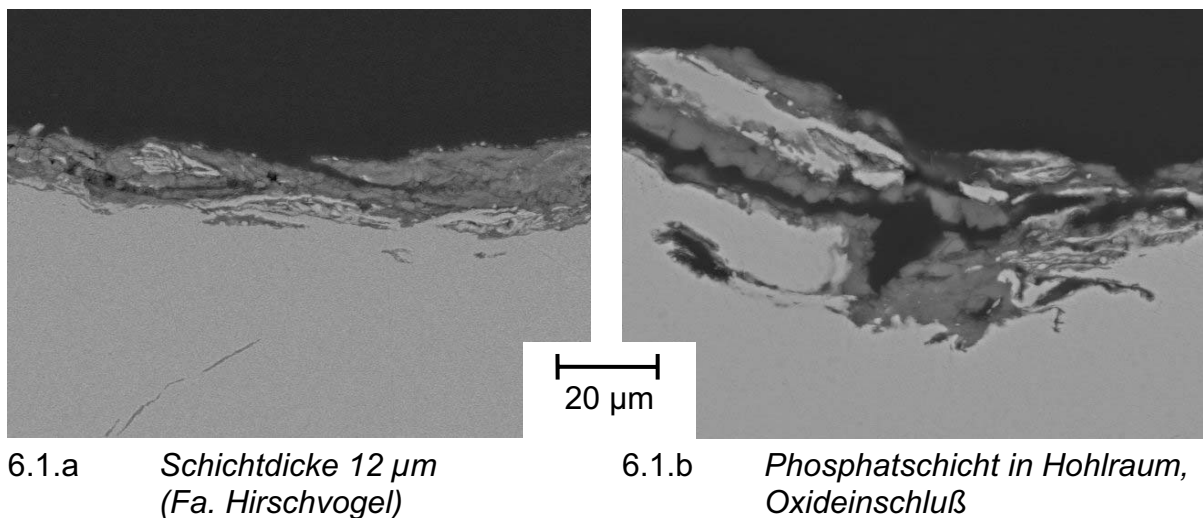


Bild 6.1 Querschliffe phosphatierter Rohteile

Die Beschichtungen auf Mantel- und Stirnflächen zylindrischer Rohteile unterscheiden sich nicht. An den Kanten sind häufig Beschädigungen bis zur Entfernung der Beschichtung zu finden (Bild 6.2). Sie werden durch die Kollision der Rohteile beim Beschichtungsvorgang und Transport verursacht.

Im konfokalen Lasermikroskop ist ein hoher Anteil offener Poren zu erkennen (Bild 6.3). Die Oberflächenrauheit R_{max} der Phosphatschichten liegt in der Größenordnung von 40 μm . Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt die Plattenform der aus der Lösung aufgewachsenen Phosphatkristalle (Bild 6.4). Bild 6.5 zeigt, daß die weichen Kristalle bei einer mechanischen Beanspruchung über die Oberfläche verschmiert werden.

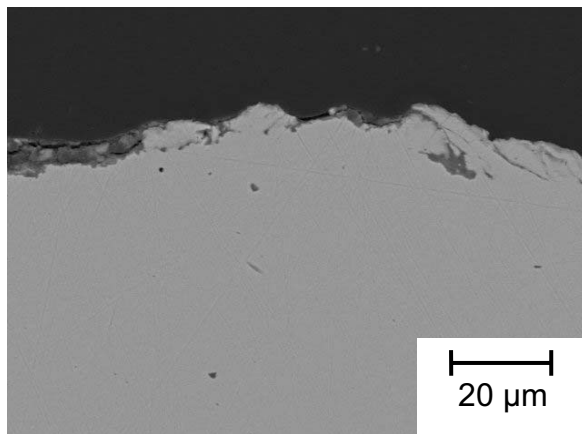


Bild 6.2 *Beschädigung der Phosphatschicht an der Kante eines Rohteils*

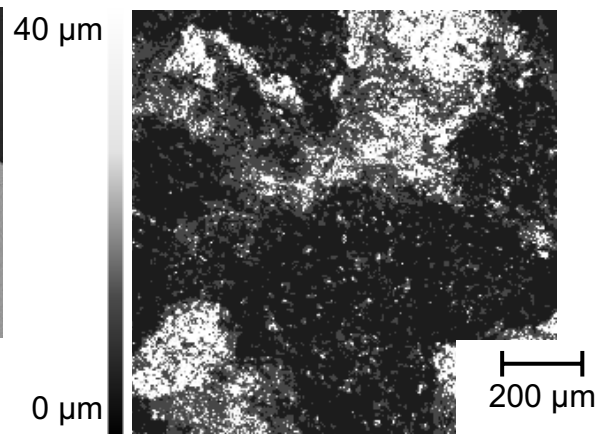


Bild 6.3 *Aufnahme einer Phosphatschicht mit konfokaler Lasermikroskopie*

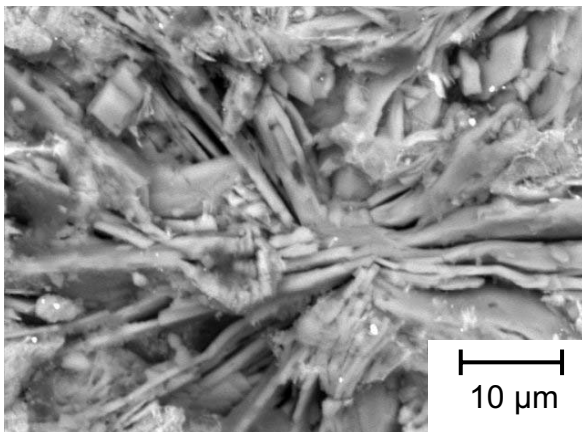


Bild 6.4 *Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Phosphatschicht*

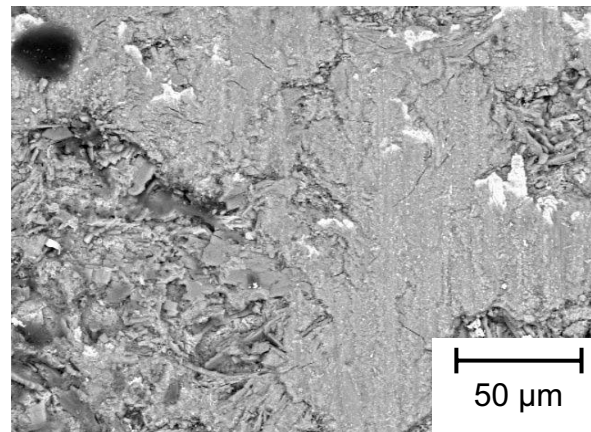


Bild 6.5 *Mechanische Beschädigung der Phosphatschicht*

Phosphatierte Teile, die mit Seife beschichtet wurden, sind fast vollständig von dem Schmiermittel bedeckt. Unbeschichtete Bereiche treten nur an Stellen großer Oberflächenrauheit oder durch mechanische Beschädigung der Beschichtung auf. Bei Auftrag anderer Schmiermittel wie Molybdändisulfid aus wäßriger Suspension ist die Verteilung auf der Phosphatschicht nicht gleichmäßig, sondern es existieren

Bereiche ohne Schmiermittel mit einem Durchmesser von 10 μm bis 100 μm (Bild 6.6).

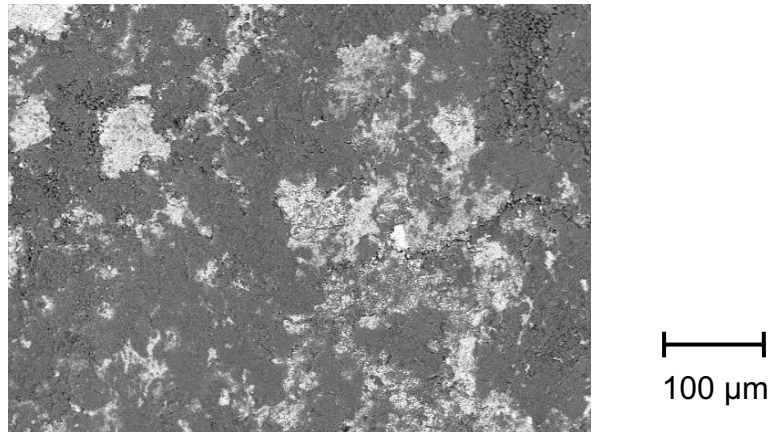


Bild 6.6 *Molybdändisulfid auf Phosphatschicht*

6.1.2 Verhalten der Phosphatschicht bei der Umformung

Nach der Umformung eines Spikes ist die Phosphatschicht im Querschliff teilweise noch sichtbar (Bild 6.7). Auf der gering umgeformten Oberseite des Tellers sind an den Flanken der Eindrücke des Stempels Ansammlungen der Phosphatschicht mit einer Dicke von 20 μm erkennbar. Die ausgebauchte Seite des Tellers, die keinen Kontakt zum Werkzeug hatte, weist nur stellenweise Rückstände der Beschichtung auf. Auf der stark umgeformten schrägen Fläche des Tellers sind Rückstände der Phosphatschicht in Vertiefungen des Werkstückwerkstoffs vorhanden. Am Übergang zum Spike ist der Werkstoff unter hoher Flächenpressung über das Werkzeug gegliitten. Im Querschliff ist keine Schicht erkennbar, während Messungen mit EDX zeigen, daß entlang der gesamten Oberfläche Phosphat vorhanden ist. An der Flanke der Spikespitze, im Bereich der höchsten Verformung und Oberflächenvergrößerung, sind dagegen keine Rückstände der Phosphatschicht zu finden.

Ventilfederteller, die bei der Firma Sidenor aus phosphatierten und mit Molybdändisulfid beschichteten Teilen hergestellt wurden, weisen auf der am stärksten umgeformten Oberfläche noch Rückstände des Beschichtungsmaterials auf (Bild 6.8). Diese bedecken nur einen Teil der Oberfläche und befinden sich in Vertiefungen des Werkstückwerkstoffs.

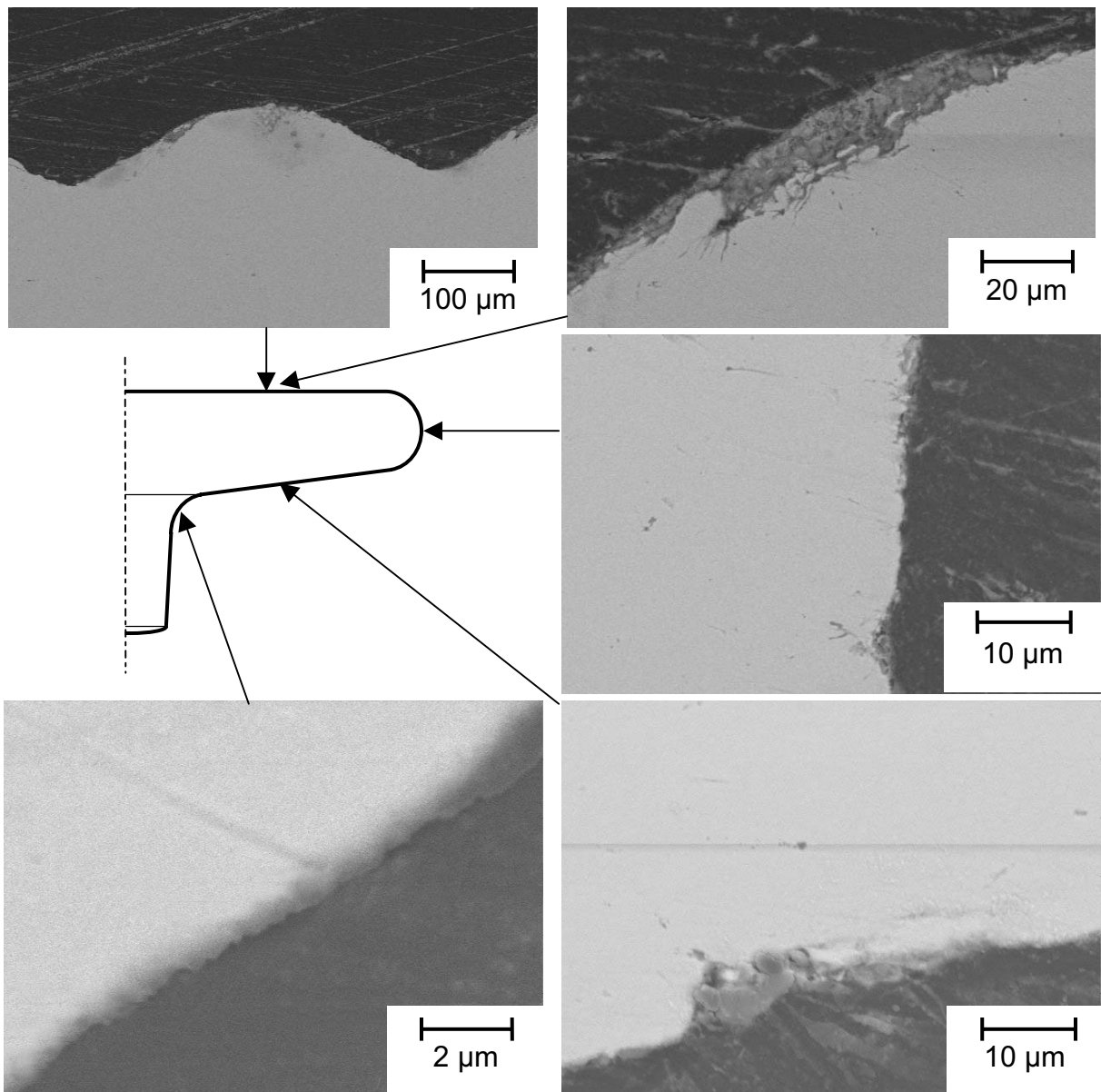


Bild 6.7 Querschliff eines aus einem phosphatierten Rohteil geformten Spike

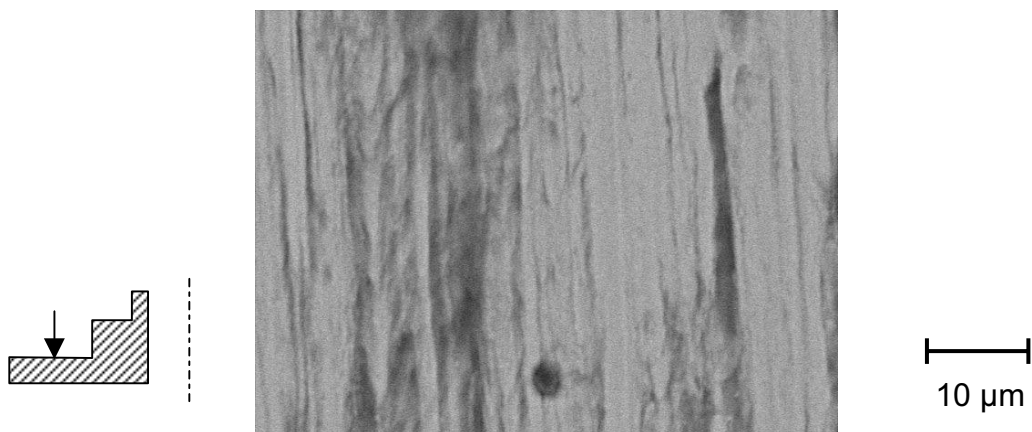


Bild 6.8 Rückstände der Phosphatschicht auf der stark umgeformten Oberfläche eines Ventildfedertellers

6.2 Eigenschaften der mechanischen Beschichtungen

Die mechanisch aufgetragenen Beschichtungen entstehen durch Auftreffen der zinkummantelten Strahlmittelteilchen an zufälligen Orten der Werkstückoberfläche. Das aufgetragene Beschichtungsmaterial ist lokal unterschiedlich fest mit der Oberfläche des Werkstücks verbunden. Bild 6.9 zeigt Querschliffe von Proben, die mittels rundem Strahlmittel beschichtet wurden. Die Schichtgewichte der untersuchten Proben liegen zwischen 2 g/m^2 und 90 g/m^2 (Kapitel 12).

Bei einem Schichtgewicht von 2 g/m^2 (Bild 6.9.a) sind auf einer Kantenlänge des Querschliffs von 2 mm nur zwei einzelne Partikel mit einer Größe von $10 \mu\text{m}$ beziehungsweise $20 \mu\text{m}$ vorhanden. Die Partikel sind nicht fest mit der Oberfläche verbunden und weisen viele Risse auf.

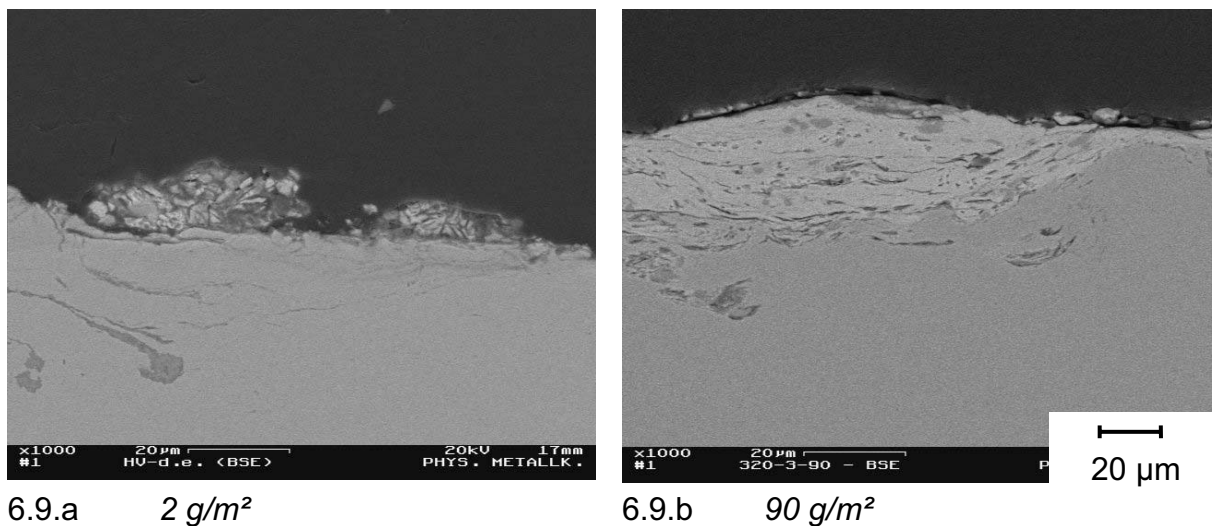
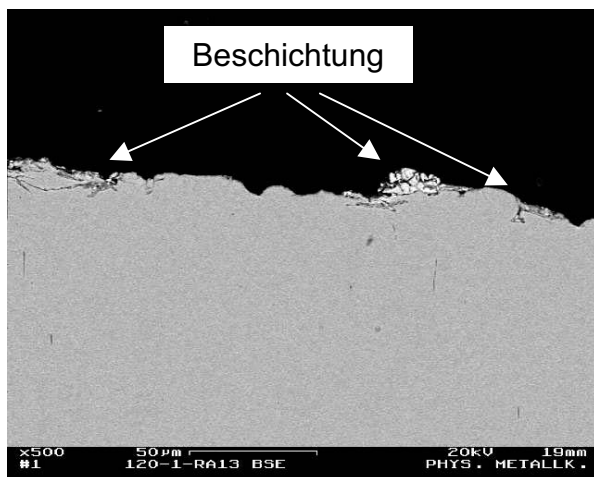


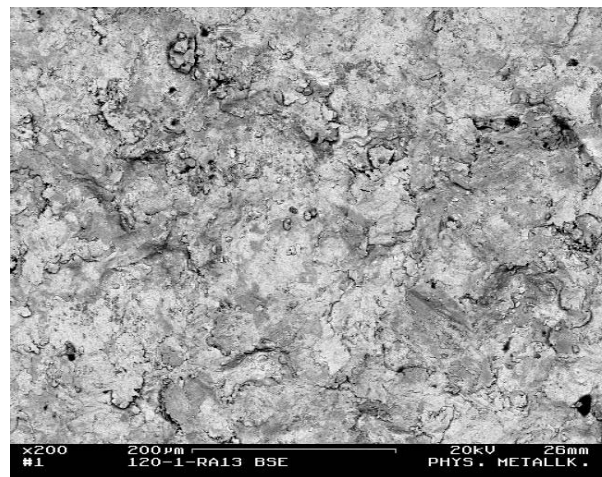
Bild 6.9 Querschliffe von Proben mit unterschiedlichem Schichtgewicht (Kapitel 12, Tabelle 12.2)

Das Schichtgewicht von 90 g/m^2 (Bild 6.9.b) wurde in einer mechanischen Strahlanlage mit einer Strahlzeit von 12 Stunden erreicht. Die Schicht ist fest mit der Oberfläche verbunden und mit Rissen parallel zu dieser durchsetzt. Die Schichtdicke schwankt stark zwischen $4 \mu\text{m}$ und $25 \mu\text{m}$. Es treten wenige unbeschichtete Bereiche auf. Die mittlere chemische Zusammensetzung der Beschichtung entspricht mit 90 at% Zn, 6 at% Fe und 4 at% Al der Schale der Strahlmittelteilchen. Die dunklen Stellen sind aluminiumreiche Reste der porösen Außenschicht der Strahlmittelteilchen mit durchschnittlich 22 Gew% Al, 52 Gew% Fe und 26 Gew% Zn.

Die Schichtgewichte der für die Umformung eingesetzten mechanisch aufgetragenen Beschichtungen liegen in der Größenordnung von 10 g/m^2 . Bild 6.10 zeigt Querschliff und Aufsicht eines mit rundem Strahlmittel in einer mechanischen Strahlanlage beschichteten Werkstücks. Im Querschliff sind einzelne Teile des Beschichtungsmaterials sichtbar. Sie weisen ein unregelmäßiges Gefüge mit Rissen auf. Die Schichtdicke schwankt zwischen $2 \mu\text{m}$ und $12 \mu\text{m}$. Die Haftung des Beschichtungsmaterials ist so gering, daß es an einigen Stellen vom Einbettmaterial ganz oder teilweise von der Werkstückoberfläche abgezogen wird.



6.10.a Querschliff



6.10.b Aufsicht

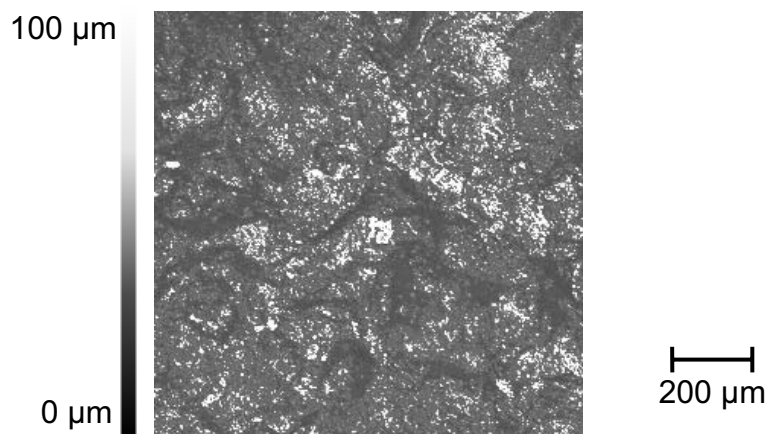
Bild 6.10 Rohteil mit einem Schichtgewicht von 10 g/m^2 (rundes Strahlmittel)

Bild 6.11 Vertiefungen auf einer mechanisch beschichteten Oberfläche (Konfokale Lasermikroskopie, größere Helligkeit entspricht größerer Höhe der Oberfläche)

Mechanisch beschichtete Rohteile weisen eine deutlich höhere Oberflächenrauheit als phosphatierte auf. Konfokale Lasermikroskopie (Bild 6.11) zeigt an einer mit

rundem Strahlmittel beschichteten Probe größere Höhenunterschiede, aber eine geringere Anzahl von zur Aufnahme von Schmierstoff geeigneten Vertiefungen als bei phosphatierten Oberflächen (Kapitel 6.1). Der maximale Höhenunterschied der untersuchten Fläche liegt bei 100 μm .

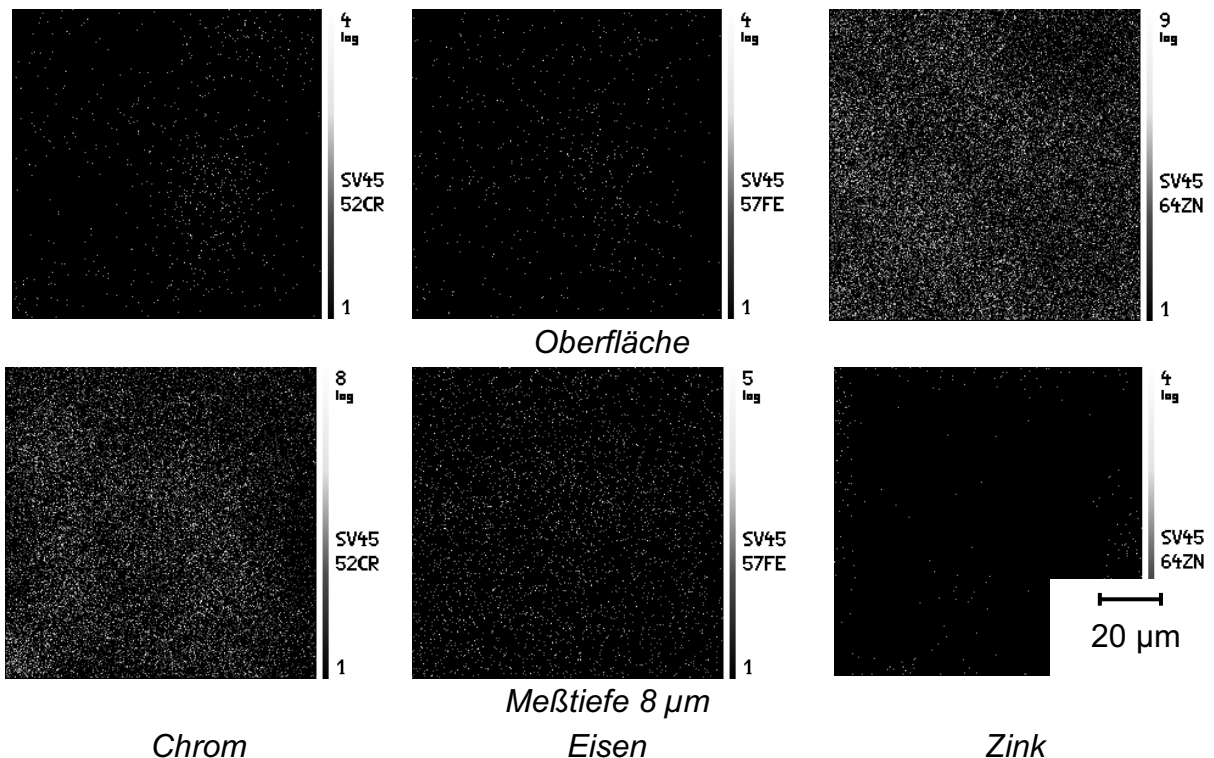


Bild 6.12 *Elementverteilung einer beschichteten Oberfläche (SIMS, Druckluft-Strahlversuch auf Stahl, rundes Strahlmittel, Luftdruck 3 bar, Strahlwinkel 90°, Strahlzeit 10 s)*

Die Untersuchung einer beschichteten Oberfläche mit Sekundärionen-Massenspektrometrie ergibt unter Berücksichtigung der Rauheit eine mittlere Schichtdicke von 5 μm . Bei der Messung des Tiefenprofils geht die Intensität des Zink-Signals aufgrund der geometrischen Einflüsse der Oberflächenrauheit bis zu einer Probentiefe von ungefähr 8 μm um 5 Größenordnungen bis auf das Hintergrundrauschen zurück (Bild 6.12). Die Intensität des Eisen-Signals nimmt im Vergleich zur Abnahme des Zink-Signals weniger stark zu, da auch im Beschichtungsmaterial Eisen enthalten ist. Die Intensität des nur aus dem Werkstück stammenden Chrom-Signals nimmt bis zur Tiefe von 8 μm mit dem Anteil der erfaßten Werkstoffoberfläche um 4 Größenordnungen zu (Bild 6.12). Die ungleichmäßige Verteilung des Beschichtungsmaterials wird von der Messung aufgrund der geometrischen Einflüsse und der lateralen Auflösung nicht erfaßt.

6.3 Beschichtung in Druckluft-Strahlversuchen

6.3.1 Werkstoffcharakterisierung

Der für die Druckluft-Strahlversuche verwendete Kohlenstoffstahl C 15 weist ein ferritisch-perlitisches Gefüge auf (Bild 6.13). Der Volumenanteil des Perlits beträgt etwa 15 %. Die mittlere Sehnenlänge der Körner beträgt 15 μm . Die Ferritkörner weisen eine mittlere Sehnenlänge von 30 μm auf.

Bei den im Folgenden beschriebenen Versuchen werden, soweit nicht ausdrücklich erwähnt, polierte Proben und unbenutztes Strahlmittel in einfachem Umlauf verwendet.

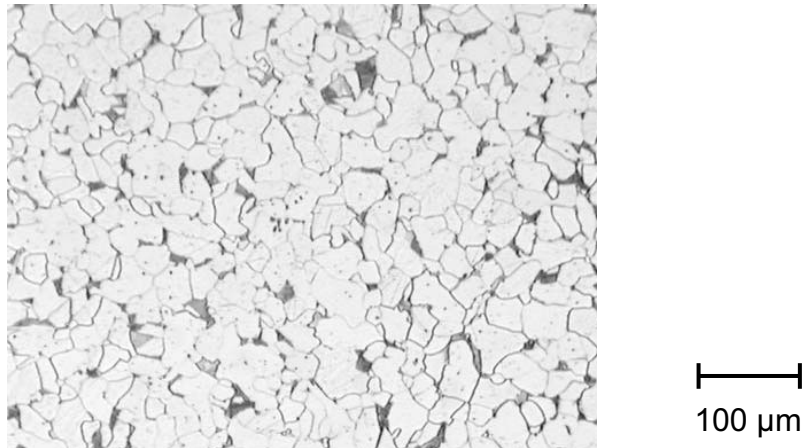


Bild 6.13 Gefüge des verwendeten Kohlenstoffstahls C 15

6.3.2 Vergleich der Strahlmittelarten

Einzelne Teilchen des kantigen Strahlmittels, die mittels der Druckluft-Strahlpistole gestrahlt wurden, hinterlassen in der Mitte einer polierten Oberfläche einen Eindruck mit einer größten Länge von 200 μm . Bei 4 von 10 Versuchen blieben Bruchstücke der Schale mit einer Kantenlänge von ungefähr 50 μm an der Oberfläche des Probekörpers hängen. Diese größeren Teilchen haften nur schwach und fallen bei leichter Erschütterung des Probekörpers ab. Eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt den Eindruck und auf der Oberfläche verbliebene kleine Bruchstücke des Beschichtungsmaterials mit einer Größe von 1 μm bis 5 μm (Bild 6.14.a).

Das runde Strahlmittel hinterläßt Eindrücke mit einem Durchmesser von etwa 150 μm . Bruchstücke mit einer Kantenlänge bis ungefähr 50 μm , die nicht fest haften, wurden in 80 % der Versuche beobachtet. Bild 6.14.b zeigt Beschichtungsmaterial, das in zusammenhängenden Stücken mit einer Größe bis zu 20 μm fest haftend auf die Oberfläche aufgetragen wurde.

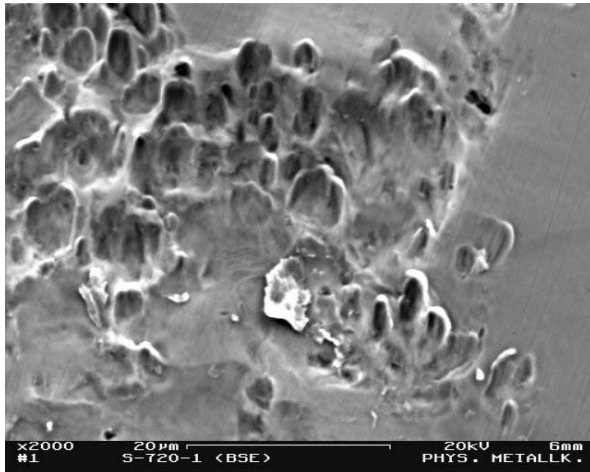
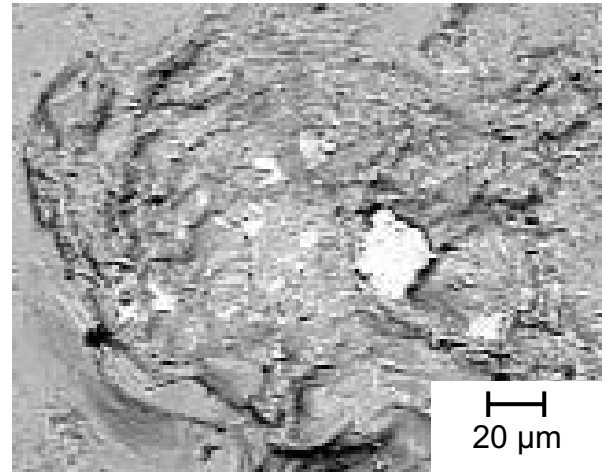
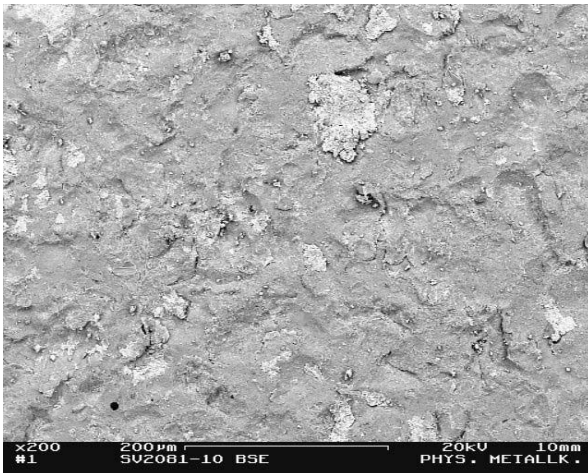
6.14.a *Kantiges Strahlmittel*6.14.b *Rundes Strahlmittel*

Bild 6.14 *Abdruck einzelner Strahlmittelteilchen auf polierten Oberflächen (Druckluft-Strahlversuch auf Stahl mit einzelnen Strahlmittelteilchen, Luftdruck 3 bar, Strahlwinkel 90°)*

Bei fortgesetztem Aufprall vieler Strahlmittelteilchen ist die polierte Oberfläche eines Probekörpers aus Stahl nach einer Strahlzeit von 10 Sekunden vollständig von Eindrücken der Strahlmittelteilchen bedeckt (Bilder 6.15.a und 6.15.b). Mit zunehmender Strahlzeit nehmen die Oberflächenrauheit und die Flächenbedeckung des Beschichtungsmaterials zu (Bilder 6.15.c bis 6.15.f).

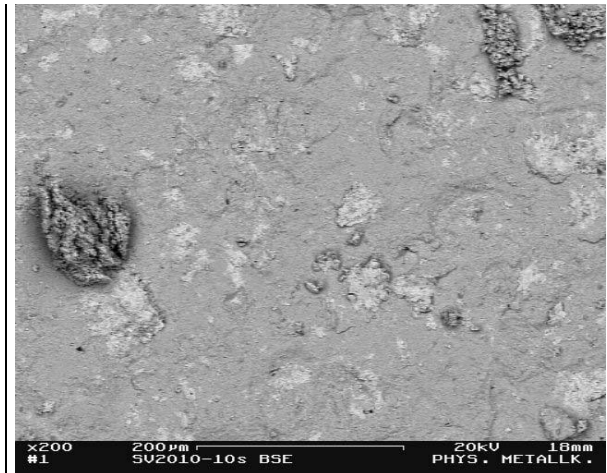
Das kantige Strahlmittel hinterläßt auf der Oberfläche kleine Bruchstücke des Beschichtungsmaterials mit einer Größe von 2 μm bis zu 10 μm . Bild 6.15.a zeigt außerdem die einzige Stelle innerhalb des untersuchten Bereichs von 2 mm^2 , an der ein zusammenhängendes Stück mit einem Durchmesser von 50 μm aufgetragen wurde.

Das runde Strahlmittel trägt eine geringere Anzahl größerer zusammenhängender Partikel des Beschichtungsmaterials auf die Oberfläche auf. Die Beschichtung bildet sich in Inseln von 10 μm bis 100 μm Durchmesser (Bild 6.15.b). Die einzelnen Partikel mit einer Größe von 50 μm bis 100 μm werden bei längerer Strahlzeit auf die Oberfläche gedrückt (Bilder 6.15.d und 6.15.f).

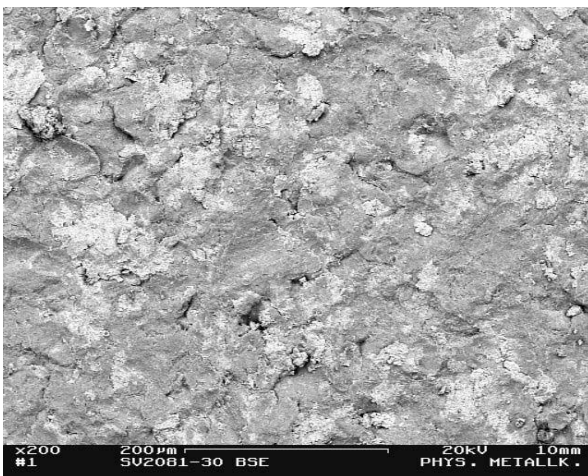


6.15.a

Strahlzeit 10 Sekunden

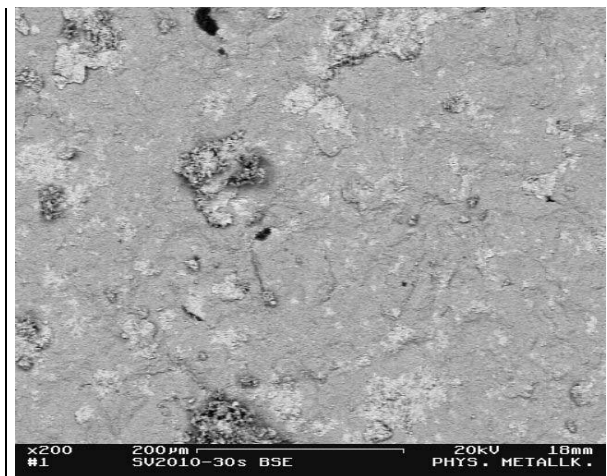


6.15.b

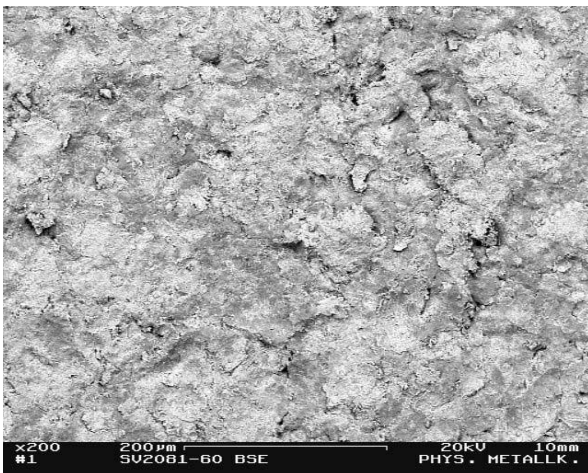


6.15.c

Strahlzeit 30 Sekunden

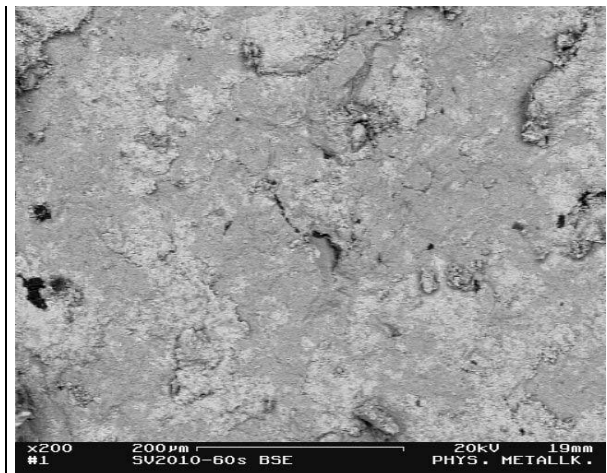


6.15.d



6.15.e

Strahlzeit 60 Sekunden



6.15.f

Kantiges Strahlmittel

Rundes Strahlmittel

Bild 6.15 *Polierte Stahloberfläche nach steigender Strahlzeit
(Druckluft-Strahlversuch auf Stahl, Luftdruck 3 bar, Strahlwinkel 90°)*

Der mittlere Durchsatz an rundem Strahlmittel bei diesen Versuchen beträgt 12 g/s und ist damit aufgrund der besseren Fließeigenschaften um 25 % höher als für das kantige Strahlmittel (9 g/s). Der Wert für das runde Strahlmittel liegt in der Größenordnung des Durchsatzes von rundem Stahlkies als Strahlmittel (13 g/s).

6.3.3 Einfluß der Strahlzeit

Die größere Anzahl an kleineren Bruchstücken läßt das Schichtgewicht für das kantige Strahlmittel zunächst schneller als für das runde Strahlmittel ansteigen. Mit längerer Strahlzeit steigt das Schichtgewicht bei Verwendung des kantigen Strahlmittels degressiv und ab einer Strahlzeit von etwa 50 Sekunden ist es geringer als bei Verwendung des runden Strahlmittels. Bei Einsatz des runden Strahlmittels nimmt das Schichtgewicht mit steigender Strahlzeit linear zu.

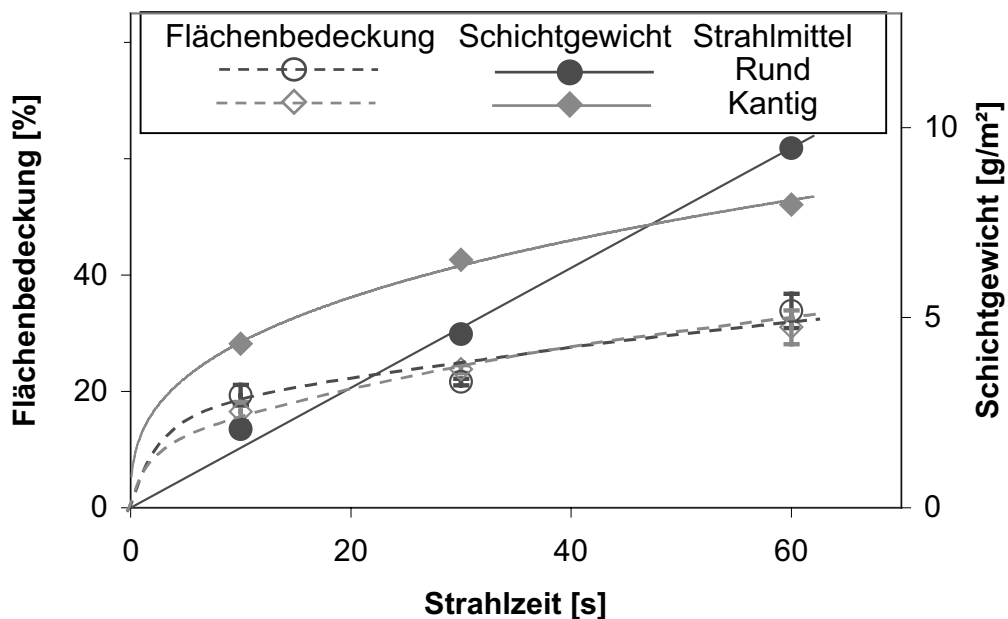


Bild 6.16 *Einfluß der Art des Strahlmittels auf Flächenbedeckung und Schichtgewicht in Abhängigkeit von der Strahlzeit (Strahlwinkel 90°, 3 bar; Balken: Standardabweichung der Einzelmessungen)*

Die Zunahme der Flächenbedeckung mit der Strahlzeit verläuft für die verschiedenen Strahlmittel im Rahmen der Streuung der Meßwerte gleich (Bild 6.16). Bei weiterer Zunahme der Strahlzeit mit unverbrauchtem rundem Strahlmittel erreicht die Flächenbedeckung einen Sättigungswert. Mit den gegebenen Parametern liegt die erreichbare Flächenbedeckung bei etwa 45 % (Bild 6.17). Dieser Wert kann mit

einem Fehler von bis zu $\pm 10\%$ behaftet sein (Kapitel 4), die Streuungen der Einzelmessungen liegen aber weit unterhalb. Bereits nach kurzer Strahlzeit wird ein Wert von 20 % erreicht. Die Geschwindigkeit der Zunahme nimmt stetig ab. Das Schichtgewicht steigt dagegen auch bei längerer Versuchsdauer weiterhin linear mit der Strahlzeit.

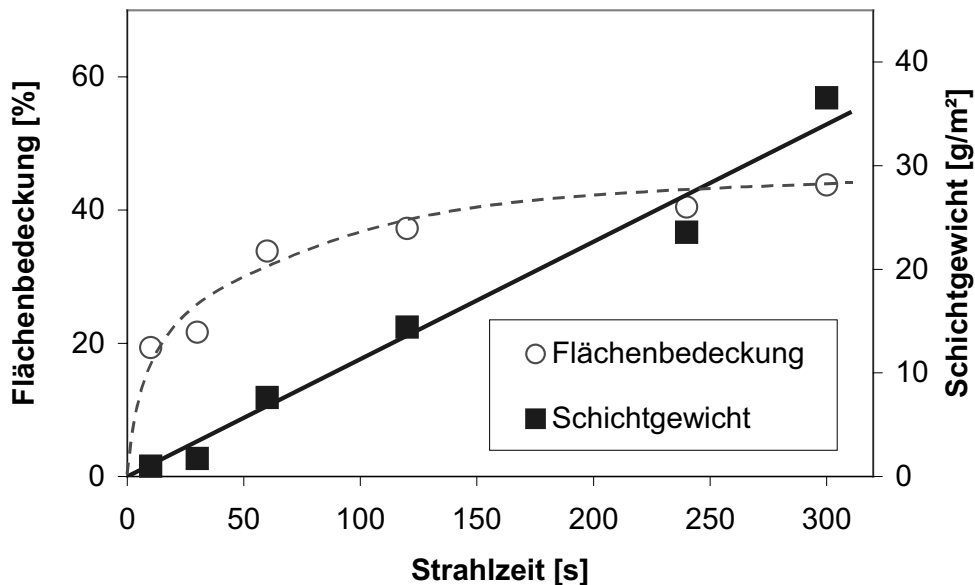


Bild 6.17 Erreichen eines Sättigungswertes der Flächenbedeckung bei längerer Strahlzeit (rundes Strahlmittel, einfacher Umlauf, Strahlwinkel 90° , 3 bar)

6.3.4 Einfluß des Strahlwinkels

Bei einem Strahlwinkel von 45° wird ein höherer Auftrag mit größerer Flächenbedeckung als bei senkrechtem Aufprall erreicht. In Bild 6.18 ist der schräge Einfall der Strahlmittelteilchen an der Verformung des Beschichtungsmaterials parallel zur Probenoberfläche in Aufprallrichtung zu erkennen.

Bild 6.19 zeigt, daß mit einem Aufprallwinkel von 45° schon nach 30 Sekunden eine Flächenbedeckung von über 40 % erreicht wird. Dies entspricht nahezu dem Maximalwert, der bei längerer Strahlzeit unter einem Winkel von 90° erreicht wird. Mit zunehmender Strahlzeit steigt dieser Wert nur noch geringfügig an. Ein Unterschied zwischen den bei 45° in 30 Sekunden und den bei 90° in 60 Sekunden aufgetragenen Beschichtungen besteht in der stärkeren lateralen Verformung des aufgetragenen Beschichtungsmaterials bei schrägem Einfall. Die einzelnen

zusammenhängenden Partikel sind bei flacherem Strahlwinkel größer (Bild 6.15.b und 6.18). Ein Strahlwinkel von 20° erzeugt ebenfalls eine höhere Auftragsgeschwindigkeit als der senkrechte Aufprall, die Flächenbedeckung steigt aber langsamer als für 45° . Ein Wert von 40 % wird erst nach 60 Sekunden erreicht. Bei wachsender Strahlzeit nimmt der Einfluß des Winkels ab. Die Flächenbedeckung nähert sich dem Maximalwert.

Das Schichtgewicht steigt wie die Flächenbedeckung bei Strahlwinkeln von 20° und 45° schneller an als bei 90° . Die Zunahme des Schichtgewichtes mit der Strahlzeit verläuft für alle Winkel linear.

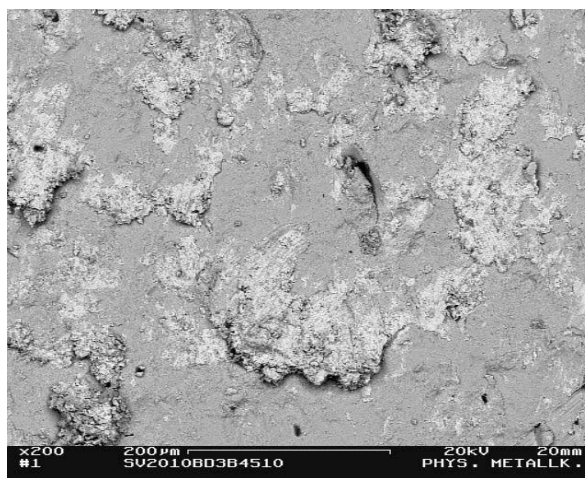


Bild 6.18 Strahlwinkel 45° (rundes Strahlmittel, Strahlzeit 10 Sekunden)

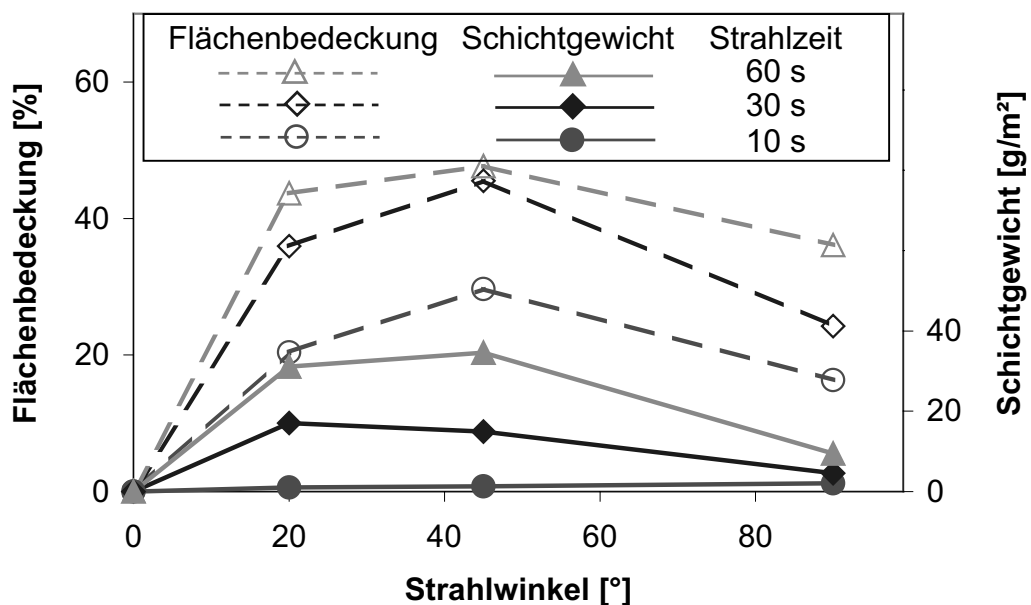


Bild 6.19 Einfluß des Strahlwinkels bei zunehmender Strahlzeit auf die Flächenbedeckung (rundes Strahlmittel, 3 bar)

6.3.5 Einfluß der kinetischen Energie des Strahlmittels

Durch größeren Druck wird der Luftstrom und damit die Strahlmittelteilchen stärker beschleunigt. Die der an der Probenoberfläche haftenden Bruchstücke des Strahlmittels sind bei einem Druck von 5 bar mit bis zu 200 µm deutlich größer als bei 3 bar (Bild 6.20). Dadurch wird mehr Beschichtungsmaterial aufgetragen und das Schichtgewicht nimmt schneller zu. Bild 6.21 zeigt, daß auch die Flächenbedeckung bei größerer Energie der Strahlmittelteilchen schneller zunimmt und der Sättigungswert der Flächenbedeckung einen höheren Wert als bei 3 bar erreicht.

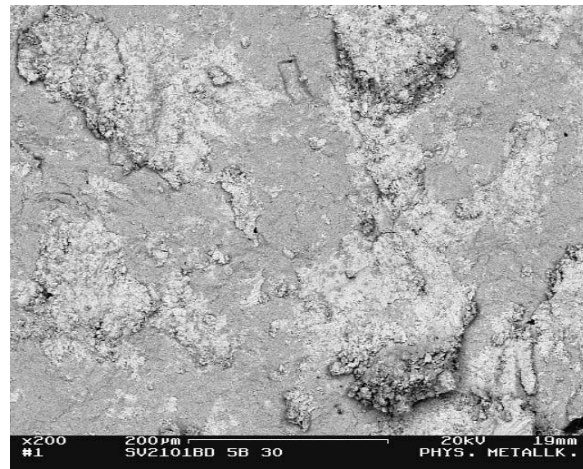


Bild 6.20 Luftdruck 5 bar (rundes Strahlmittel, Strahlwinkel 90°, Strahlzeit 30 s)

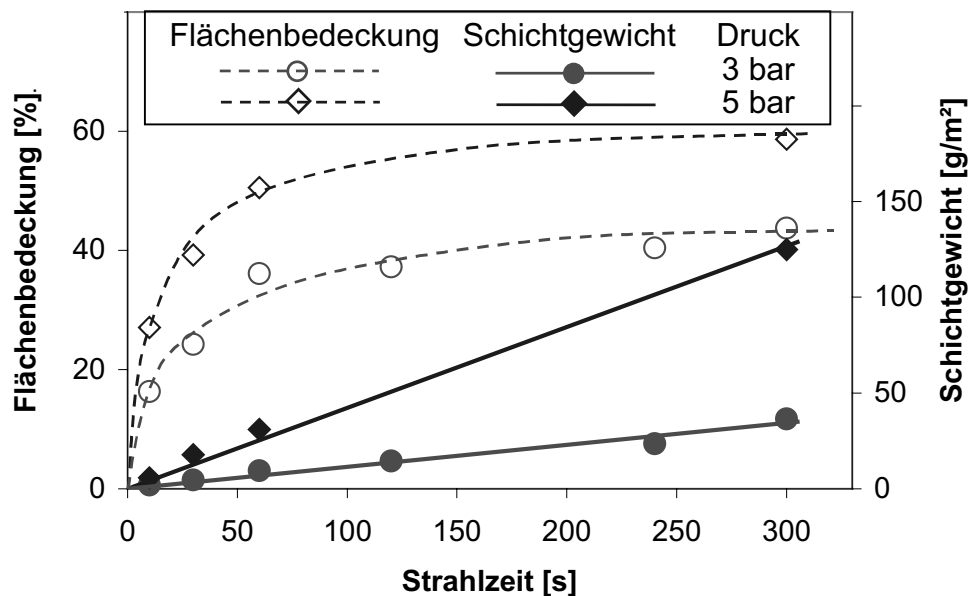


Bild 6.21 Einfluß des Luftdrucks auf Flächenbedeckung und Schichtgewicht

6.3.6 Einfluß der Werkstückoberfläche

Die Vorbereitung der Werkstückoberfläche hat einen deutlich geringeren Einfluß auf den Beschichtungsauftrag als zum Beispiel die Strahlzeit oder die Energie der Strahlmittelteilchen. Eine unterschiedliche Vorbereitung der Probenoberfläche durch Polieren beziehungsweise Reinigungsstrahlen bewirkt nach kurzer Strahlzeit bei polierten Proben einen höheren Auftrag an Schichtgewicht und Flächenbedeckung (Bild 6.22). Nach einer Strahlzeit von 60 Sekunden ist die Oberflächenstruktur durch den Strahlvorgang gleich und die Vorbehandlung wirkt sich nicht mehr aus.

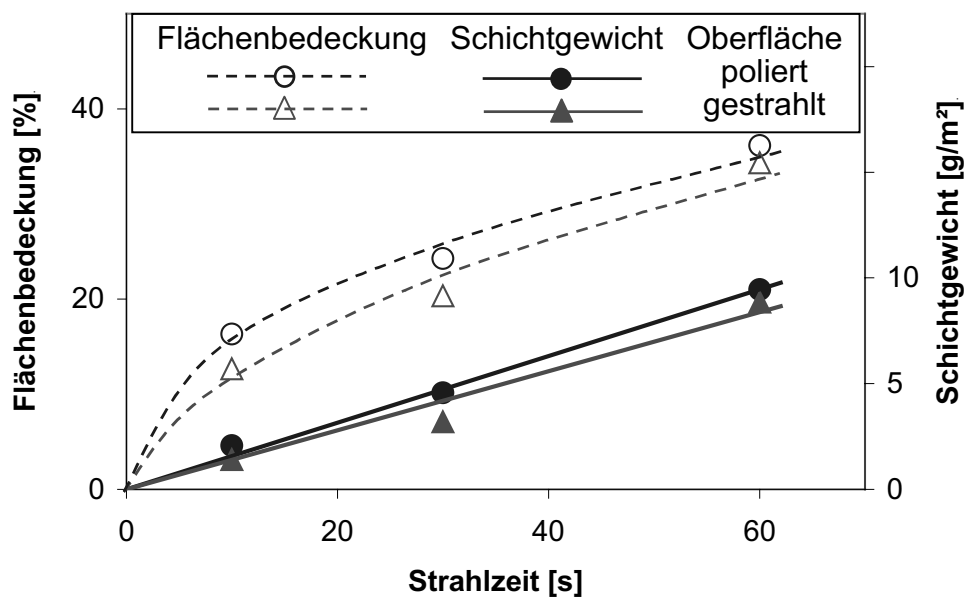
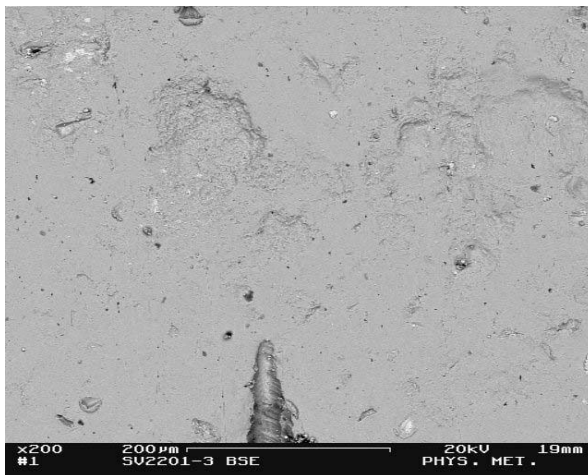
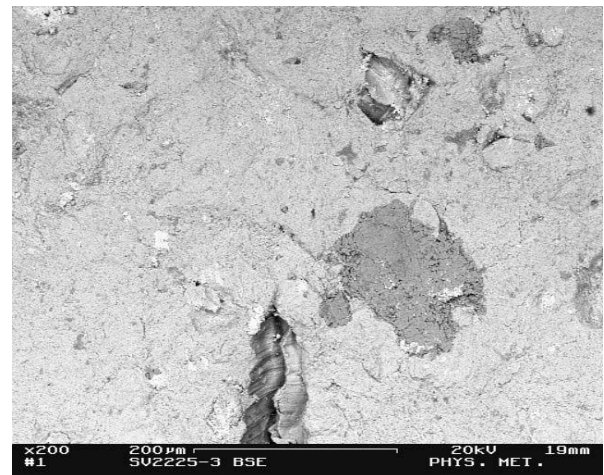


Bild 6.22 *Einfluß der Probenoberfläche auf die Flächenbedeckung (Rundes Strahlmittel, Strahlwinkel 90°, 3 bar)*

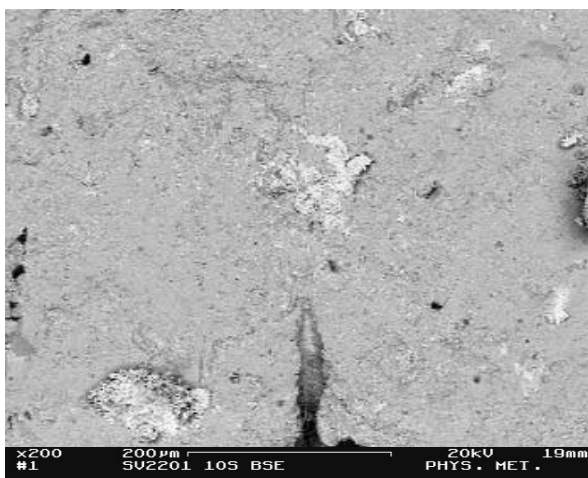
Den Ablauf des Beschichtungsvorgangs für eine polierte und eine reinigungsgestrahlte Oberfläche zeigt Bild 6.23 an markierten Stellen, die jeweils nach steigender Strahlzeit untersucht wurden. Die Strahlmittelteilchen hinterlassen auf der polierten Oberfläche einzelne Eindrücke mit einem Durchmesser von ungefähr 100 µm (Bild 6.23.a). Auf der reinigungsgestrahlten Oberfläche gehen die Eindrücke der Strahlmittelteilchen in der durch die Vorbehandlung erzeugten Oberflächenrauheit unter (Bild 6.23.b). Auf die Oberflächen wurden Partikel des Beschichtungsmaterials mit einem Durchmesser von 10 µm aufgetragen.



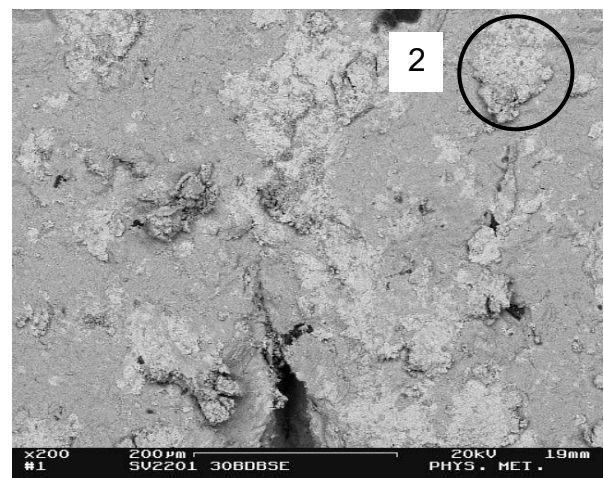
6.23.a Polierte Oberfläche nach 3 s Strahlzeit



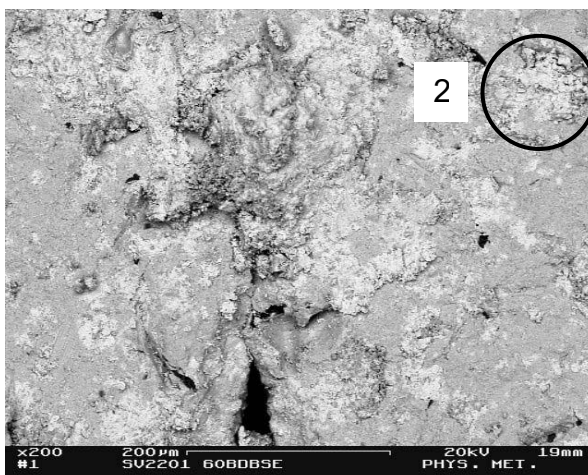
6.23.b Reinigungsgestahlte Oberfläche nach 3 s Strahlzeit



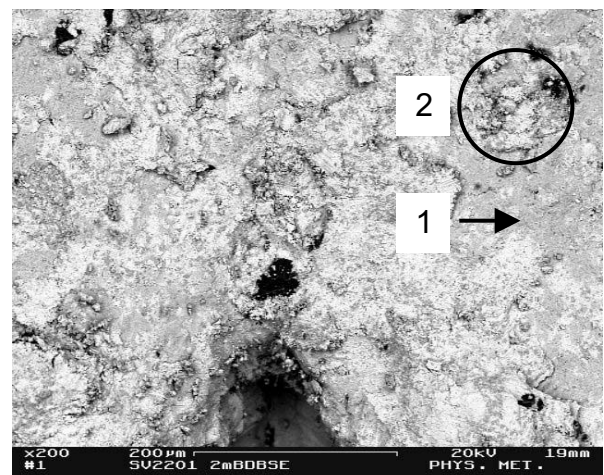
6.23.c Polierte Oberfläche nach 10 s Strahlzeit



6.23.d Polierte Oberfläche nach 30 s Strahlzeit



6.23.e Polierte Oberfläche nach 60 s Strahlzeit



6.23.f Polierte Oberfläche nach 120 s Strahlzeit

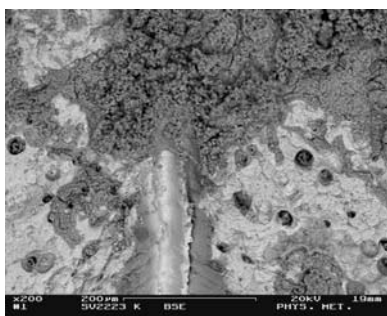
Bild 6.23 Ablauf des Beschichtungsvorgangs auf unterschiedlichen Probenoberflächen (Rundes Strahlmittel, Strahlwinkel 90°, 3 bar)

Mit zunehmender Strahlzeit nimmt die Flächenbedeckung zu (Bilder 6.23.c bis 6.23.f). Bestimmte Bereiche der Oberfläche bleiben jedoch auch bei weiterer Bestrahlung ohne Beschichtung (Bild 6.23.f, Markierung 1), während zusätzliches Material auf bereits beschichteten Bereichen haftet (Bild 6.23.4 bis 6.23.f, Markierung 2). Die EDX-Untersuchung der unbeschichteten Bereiche zeigt keine Besonderheiten wie zum Beispiel eine verstärkte Oxidation.

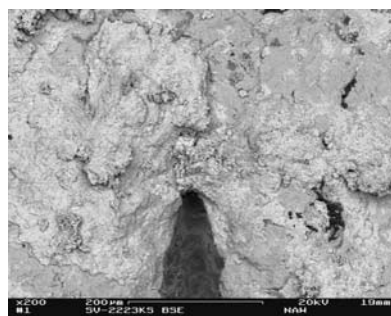
Die Rauheit der polierten Oberfläche hat nach einer Strahlzeit von 10 Sekunden den gleichen Wert wie die der reinigungsgestrahlten erreicht (Bild 6.23.c). Das dunkel erscheinende Oxidpartikel neben der Markierung in Bild 6.23.b wird durch den Strahlvorgang fast vollständig entfernt (Bild 6.23.d).

6.3.7 Einfluß der Korrosion der Werkstückoberfläche

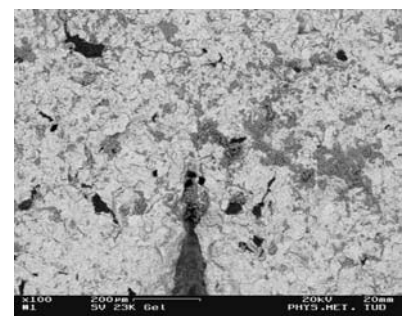
Bei der Beschichtung von korrodierten Werkstückoberflächen werden die Korrosionsprodukte nicht vollständig entfernt und teilweise vom Beschichtungsmaterial überdeckt. Auf mit Stahlkies gestrahlten und korrodierten Proben sind in Bild 6.24.a deutlich die Korrosionsprodukte erkennbar. Wiederholte Untersuchung einer markierten Stelle nach zunehmenden Strahlzeiten zeigt, daß ein Großteil der Korrosionsprodukte durch den Strahlvorgang entfernt und Beschichtungsmaterial aufgetragen wird (Bild 6.24.b). Nach dem chemischen Ablösen der Beschichtung wird sichtbar, daß unter größeren Partikeln des Beschichtungsmaterials stellenweise Rückstände der Korrosionsprodukte vorhanden sind (Bild 6.24.c).



6.24.a *Korrodierte Oberfläche*



6.24.b *Beschichtete Oberfläche*



6.24.c *Beschichtung abgelöst*

Bild 6.24 *Beschichtung einer korrodierten Probe (Rundes Strahlmittel, 3 bar, Strahlwinkel 90°, Strahlzeit 60 s)*

6.3.8 Einfluß des Werkstoffs

Der zu beschichtende Werkstoff hat starke Auswirkungen auf den Beschichtungsvorgang. Versuche mit Aluminium und Kupfer zeigen einen um den Faktor 7 höheren Auftrag als die Versuche mit Stahl (Bild 6.25). Die Zunahme des Schichtgewichtes mit der Strahlzeit verläuft für alle Werkstoffe linear.

Aufsichten zeigen Beschichtungen mit rauher Oberfläche und einer Dicke von durchschnittlich 12 µm nach einer Strahlzeit von 60 Sekunden auf Aluminium und Kupfer. Die Schichten weisen eine geringe Zahl an Rissen auf. Zwischen Werkstück und Beschichtung treten keine Risse wie bei Stahl auf. Nachfolgende Strahlmittelteilchen verdichten das vorher aufgetragene Beschichtungsmaterial zu einer massiven Schicht. Weder Aluminium noch Kupfer erhalten vollständig geschlossene Beschichtungen, die Flächenbedeckung erreicht nach einer Strahlzeit von 60 Sekunden aber über 90 % (Bild 6.25). Die Bestimmung der Flächenbedeckung auf Kupfer ist aufgrund des geringen Ordnungszahlkontrastes mit einem großen Fehler behaftet.

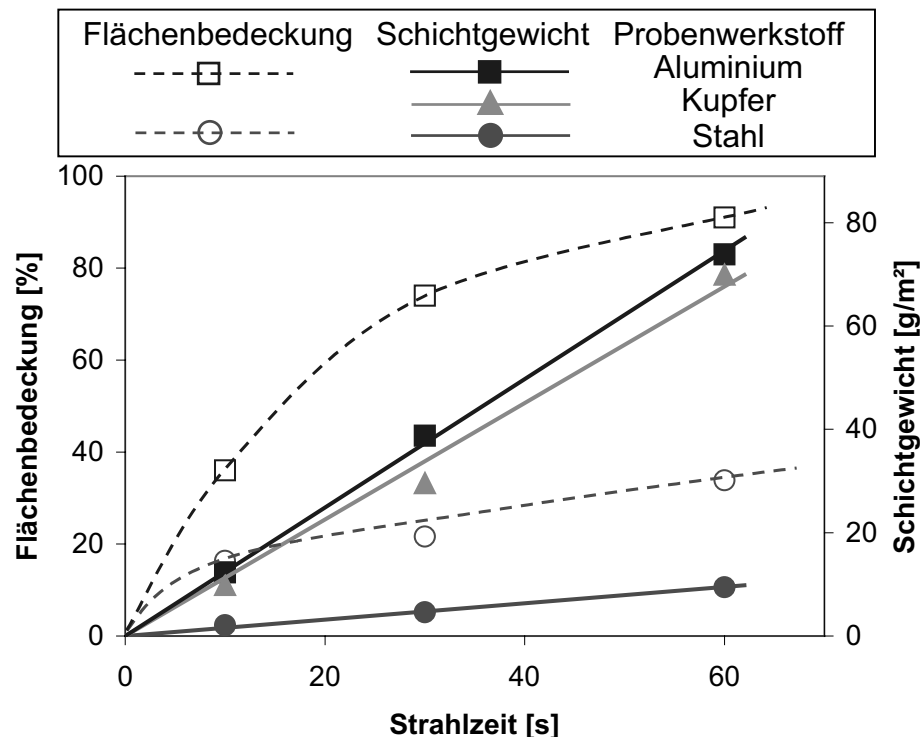


Bild 6.25 *Einfluß des Probenwerkstoffs auf die Beschichtung (Rundes Strahlmittel, Strahlwinkel 90°, 3 bar)*

6.3.9 Wirkung verbrauchter Strahlmittel

Nachdem die Strahlmittelteilchen die zinkreiche Schale verloren haben, wirken die Stahlkerne abrasiv. Dies zeigen Druckluft-Strahlversuche, bei denen eine Menge von 100 g des runden Strahlmittels im Kreislauf stetig wieder verwendet wurde. Der Luftdruck betrug 6 bar. Auf Kupfer entsteht in 5 Minuten eine massive Schicht mit einer Dicke von 35 μm bis 50 μm , stellenweise bis zu 150 μm , und einem Mittelwert von 80 μm . Die Schichten weisen eine geringe Zahl von parallel zur Probenoberfläche verlaufenden Rissen auf. Wird das Strahlmittel ein zweites Mal verwendet, so werden ähnliche Schichten mit einer mittleren Dicke von 50 μm erzeugt. Diese Schichten sind nicht mehr geschlossen. Auf 20 % der Oberfläche ist keine Beschichtung vorhanden. Die Zahl von Rissen und Hohlräumen ist höher als bei der Verwendung von unbenutztem Strahlmittel.

Auf Stahl als Probekörper entsteht in einer Strahlzeit von 3 Minuten eine Schicht mit einer mittleren Dicke von 10 μm . Die Zahl an Rissen ist größer als bei Beschichtungen auf Kupfer. Die Oberfläche der aufgetragenen Schichten ist rau und besteht aus Bruchstücken mit einer Kantenlänge von 5 μm bis 20 μm . Nach einer Strahlzeit von 6 Minuten beträgt die mittlere Schichtdicke 20 μm , nach 8 Minuten nur noch 12 μm (Bild 6.26). Im stetigen Umlauf verlieren die Strahlmittelteilchen ihre Schale vollständig. Die zurückbleibenden Stahlkerne haben eine abrasive Wirkung und das Beschichtungsmaterial wird wieder abgetragen.

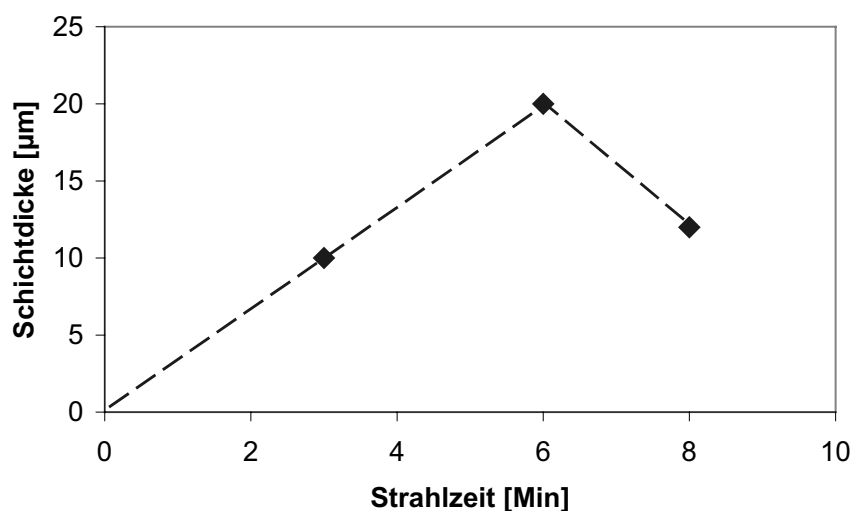


Bild 6.26 Strahlversuche auf Stahl mit stetigem Umlauf des Strahlmittels, 6 bar

6.4 Beschichtung in mechanischen Strahlanlagen

In mechanischen Strahlanlagen liegen die Rohteile in mehreren Lagen übereinander, so daß erst im Zuge der Umwälzung nach und nach alle dem Strahlmittel ausgesetzt werden. Die wechselnde Lage der einzelnen Rohteile und die stetige Umwälzung durch das Gummiband lassen keine Aussage über Häufigkeit und Richtung des Aufpralls der Strahlmittelteilchen auf bestimmte Oberflächenbereiche eines Rohteils zu.

6.4.1 Einfluß der Chargenmenge

Versuche mit unterschiedlichen Mengen an Rohteilen in einer mechanischen Strahlanlage mit rundem Strahlmittel und gravimetrische Bestimmung des Schichtgewichtes zeigen, daß die Gesamtmenge des aufgetragenen Beschichtungsmaterials linear mit der zur Beschichtung zur Verfügung stehenden Werkstückoberfläche und somit mit dem Chargengewicht in der Strahlanlage wächst (Bild 6.27).

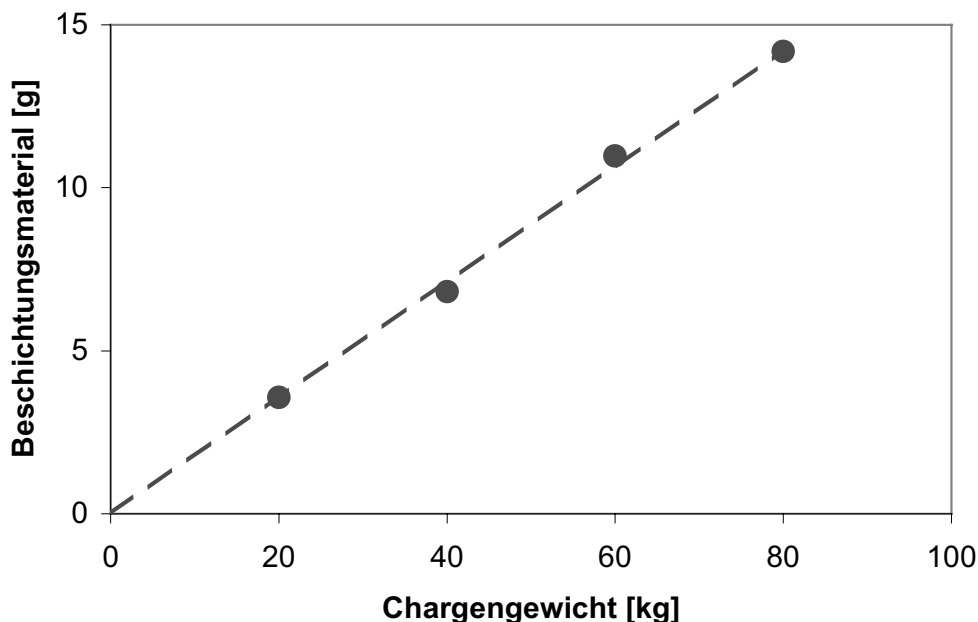


Bild 6.27 *Einfluß des Chargengewichtes bei Beschichtung auf die Gesamtmenge des Beschichtungsmaterials (Tabelle 12.3)*

6.4.2 Einfluß des Strahlmitteldurchsatzes

Versuche mit unterschiedlichem Strahlmitteldurchsatz in einer mechanischen Strahlanlage zeigen mit dem Durchsatz linear steigenden Schichtauftrag (Bild 6.28). Die Beschleunigung einer größeren Menge an Strahlmittel äußert sich in einer höheren Leistungsaufnahme des Antriebsmotors. Der Durchsatz an Strahlmittel ergibt sich aus der über die Leerlaufleistung hinausgehende Leistungsaufnahme, dem Durchmesser (400 mm) und der Umdrehungsgeschwindigkeit (3000 min^{-1}) des Schleuderrades. Die Begrenzung für den Auftrag an Beschichtungsmaterial stellt für die eingesetzten Strahlanlagen die Leistungsfähigkeit der Schleuderräder dar.

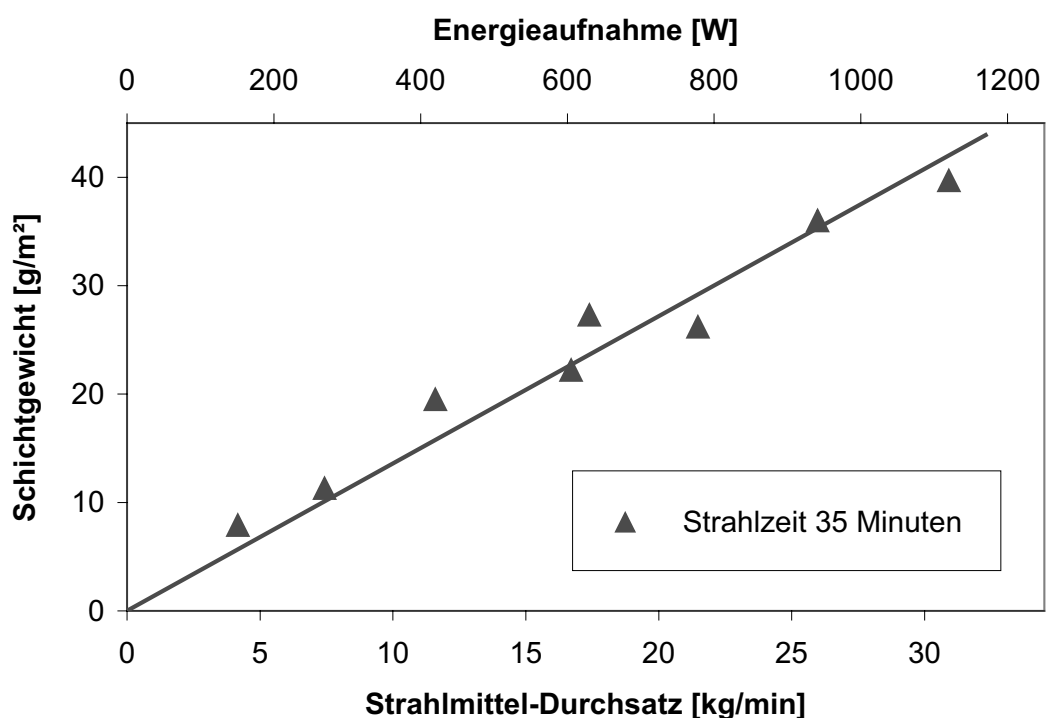
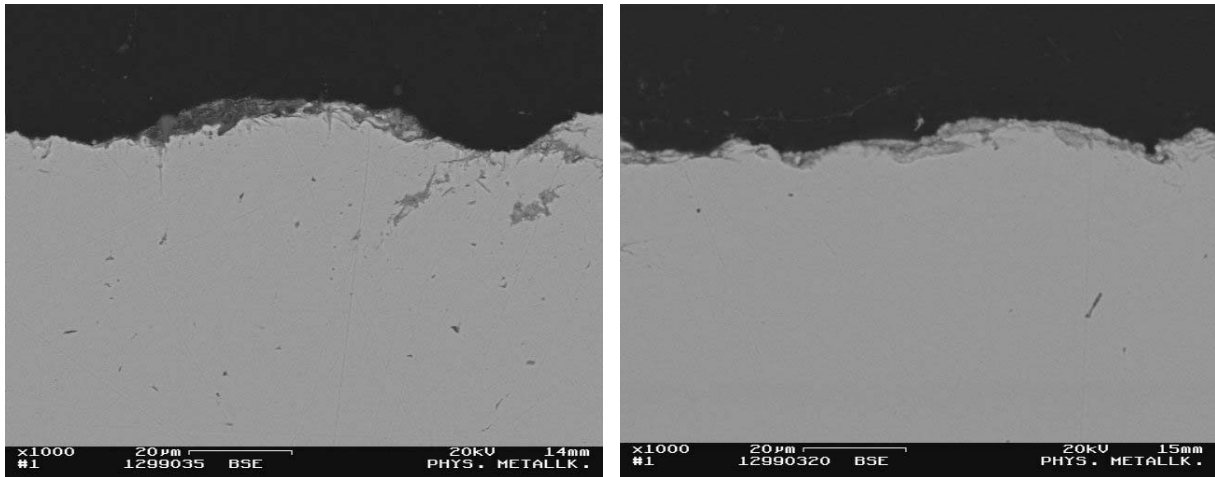


Bild 6.28 *Einfluß des Durchsatzes an rundem Strahlmittel in einer mechanischen Strahlanlage (Tabelle 12.4)*

6.4.3 Einfluß der Strahlzeit

Mit steigender Strahlzeit in mechanischen Strahlanlagen steigt das Schichtgewicht linear. Unter Verwendung von kantigem Strahlmittel entsteht in einer Strahlzeit von 20 Minuten eine Beschichtung von ca. 12 g/m^2 . Mit steigender Strahlzeit bleibt die Dicke der Beschichtung annähernd konstant und die Flächenbedeckung wächst bis zum Erreichen der Sättigung (Bild 6.29).



6.29.a Strahlzeit 5 Minuten

6.29.b Strahlzeit 20 Minuten

Bild 6.29 Mit kantigem Strahlmittel in mechanischer Strahlanlage aufgetragene Beschichtung (Tabelle 12.5)

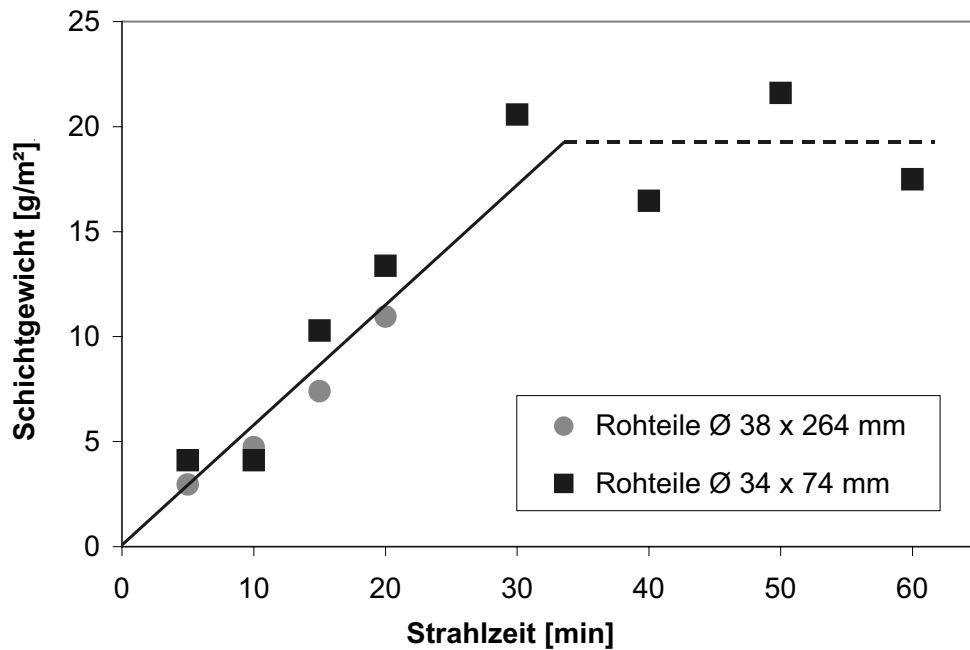


Bild 6.30 Einfluß der Strahlzeit bei Beschichtung mit kantigem Strahlmittel in mechanischer Strahlanlage (Tabelle 12.5)

Bild 6.30 zeigt, daß mit kantigem Strahlmittel bei Erreichen der Sättigung für die Flächenbedeckung nach einer Strahlzeit von 30 Minuten auch für das Schichtgewicht ein Sättigungswert erreicht wird. Ein Schichtgewicht von 20 g/m² wird nicht überschritten. Es entsteht ein Gleichgewicht zwischen Auftrag und Abtrag von Beschichtungsmaterial. Mit verminderter Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder (2000 /min), das heißt geringer Geschwindigkeit der Strahlmittelteilchen, wird in gleicher Zeit weniger Beschichtungsmaterial aufgetragen

(20 min: 5 g/s). Bei der Verwendung von rundem Strahlmittel steigt das Schichtgewicht bis zur längsten untersuchten Strahlzeit von 64 Minuten linear an (Kapitel 6.4.4).

6.4.4 Einfluß der Werkstückgeometrie

Bild 6.31 zeigt, daß das in einer bestimmten Strahlzeit aufgetragene spezifische Schichtgewicht mit steigender Gesamtoberfläche der Rohteile abnimmt. Das Angebot an Beschichtungsmaterial wird voll ausgeschöpft, so daß bei voller Ausnutzung des Chargengewichtes gleiche Schichtgewichte bei kleinen Rohteilen mit großer spezifischer Oberfläche erst nach längeren Strahlzeiten als bei großen Teilen erreicht werden. Die Zunahme des Schichtgewichtes mit der Strahlzeit bleibt bis zur längsten untersuchten Strahlzeit von 64 Minuten annähernd konstant.

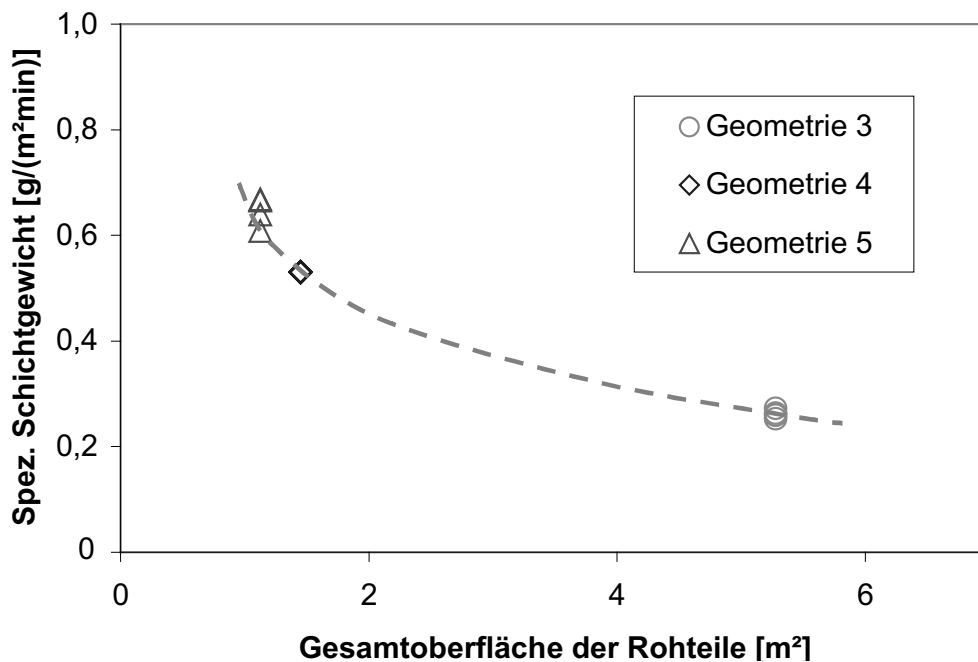
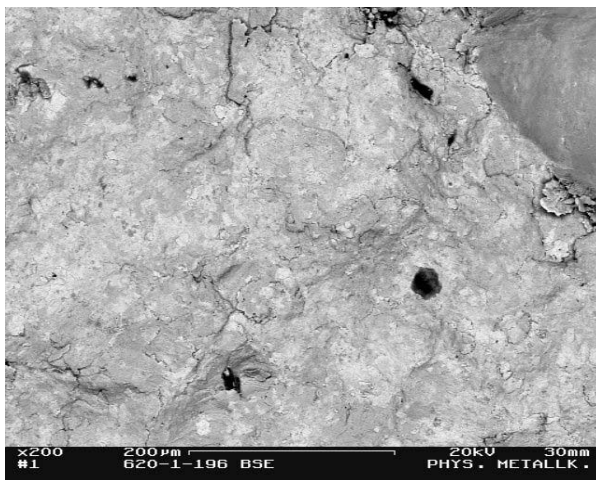


Bild 6.31 *Einfluß der Geometrie auf die Beschichtung mit rundem Strahlmittel (Tabelle 12.1)*

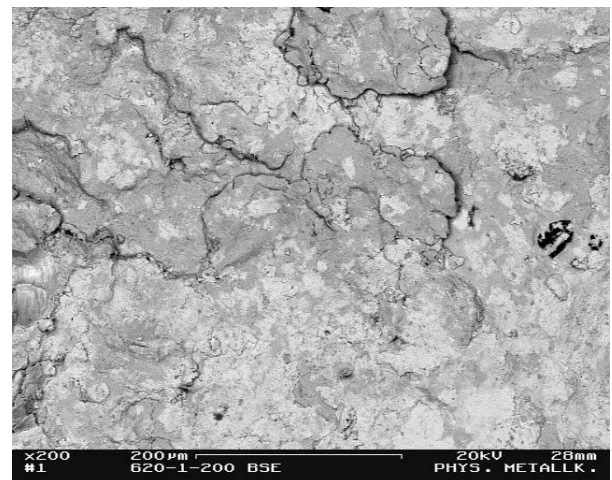
Gravimetrische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der verschiedenen Rohteile zeigen keine signifikanten Unterschiede in Aufbau und Verteilung der Beschichtung. Auf Stirn- und Mantelflächen sind die Schichtgewichte gleich.

6.4.5 Einfluß der Strahlmittelzusammensetzung

Die Zugabe von Stahlkugeln zum Strahlmittel wirkt wie das verbrauchte Strahlmittel abrasiv (Kapitel 6.3.9). Bild 6.32.a zeigt die Oberfläche eines Teils, das in einer mechanischen Strahlanlage mit rundem Strahlmittel in 30 Minuten beschichtet wurde. Das Schichtgewicht beträgt 18 g/m^2 . Die Beschichtung gleicher Teile mit einer Zugabe von 15 Gew% der Stahlkugeln führt zu einem geringeren Schichtgewicht von 15 g/m^2 . Die Anzahl an Rissen in der Oberfläche der Werkstücke ist größer; einzelne Eindrücke der Stahlkugeln sind aufgrund der Oberflächenrauheit jedoch nicht erkennbar (Bild 6.32.b).



6.32.a *Rundes Strahlmittel*



6.32.b *Rundes Strahlmittel mit
zusätzlichen Stahlkugeln*

Bild 6.32 *Einfluß veränderter Strahlmittelzusammensetzung (Tabelle 12.6)*

Schmiermittel verhindern den Beschichtungsvorgang. Mit einer Zugabe von 5 Gew% Graphit zum runden Strahlmittels war nach einer Strahlzeit von 20 Minuten kein Auftrag von Beschichtung meßbar. Probekörper, auf die vor der Strahlbehandlung Graphit oder Molybdändisulfid aufgetragen wurde, wiesen nach 20 Minuten Strahlzeit ein Schichtgewicht von 3 g/m^2 beziehungsweise 2 g/m^2 auf, gereinigte Teile dagegen das gleiche Schichtgewicht wie Teile ohne Schmiermittel (11 g/m^2). Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, daß bei den vorbehandelten Teilen eine Beschichtung nur an Stellen stattfand, an denen kein Graphit beziehungsweise Molybdändisulfid vorhanden ist.

Die Werkstücke weisen durch das vorhergehende Reinigungsstrahlen und die Kollision der Rohteile während der Strahlvorgänge eine höhere Rauheit auf. Die Schichten sind massiv mit einer geringen Zahl von Rissen und die Schichtdicke ist

gleichmäßiger und geringer als bei den Druckluft-Strahlversuchen. Die in mechanischen Strahlanlagen erzeugten Schichtdicken liegen durchweg in der Größenordnung von 5 μm .

6.4.6 Rauheit beschichteter Oberflächen

Tabelle 6.1 enthält die mit mechanischem Tastschnittverfahren berührend und mit konfokaler Profilometrie berührungslos gemessenen Rauheitskennwerte von in mechanischen Strahlanlagen beschichteten Proben. Die häufig verwendeten Rauheitskennwerte R_{max} und R_a sind für beschichtete Oberflächen mehr als doppelt so hoch wie für unbeschichtete. Die Unterschiede zwischen rundem und kantigem Strahlmittel sind bei den Werten für die reduzierte Spitzenhöhe R_{PK} , die Kernrautiefe R_K und die reduzierte Riefentiefe R_{VK} besonders deutlich (DIN 4776). Die zur Beurteilung mechanisch beanspruchter Oberflächen verwendeten Kennwerte liegen für mit dem runden Strahlmittel aufgebrauchte Beschichtungen deutlich höher als für mit dem kantigen Strahlmittel aufgetragene. Die raue Oberfläche der Beschichtung weist Vertiefungen mit einem Durchmesser in der Größenordnung von 10 μm auf. Dies entspricht der Größe der als Schmiermittel aufgetragenen Graphitteilchen mit einem nominellen Durchmesser von 5 μm bis 20 μm . Eine Erhöhung des Schichtgewichts des runden Strahlmittels von 10 g/m^2 auf 17 g/m^2 verändert die Rauheitswerte nur geringfügig. Das Eindringen der mechanischen Tastspitze in die Probenoberfläche (Kapitel 4.5) führt zu geringeren Meßwerten, so daß berührungslose Meßverfahren höhere Werte als das mechanische Tastschnittverfahren liefern.

Meßverfahren	Mechanisch				Optisch		
		Rund		Kantig	Rund		Kantig
Strahlmittel							
Schichtgewicht [g/m^2]	0	10	17	8	10	17	8
R_{max} [μm]	9,7	19,1	17,9	13,9	20,0	22,5	20,1
R_a [μm]	0,7	2,6	2,8	2,0	2,7	3,5	2,6
R_{pk} [μm]	0,5	4,7	3,6	2,4	4,7	6,0	4,4
R_k [μm]	1,1	8,3	8,4	5,4	9,0	11,7	8,0
R_{vk} [μm]	2,8	2,6	2,7	2,9	1,9	2,8	3,5

Tabelle 6.1 Oberflächenrauheit mechanischer Beschichtungen (nach DIN 4776)
(Tabelle 12.7)

6.4.7 Beschichtung von Draht

Für die Herstellung von Schrauben bei der Firma Nedschroef wurde Draht mit einem Durchmesser von 8 mm mit rundem Strahlmittel beschichtet. Bild 6.33 zeigt den Abfall von Schichtgewicht und Flächenbedeckung mit steigender Vorschubgeschwindigkeit. Höhere Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder bewirken stärkeren Schichtauftrag. Der Schichtauftrag sinkt mit dem Reziprokwert der Vorschubgeschwindigkeit.

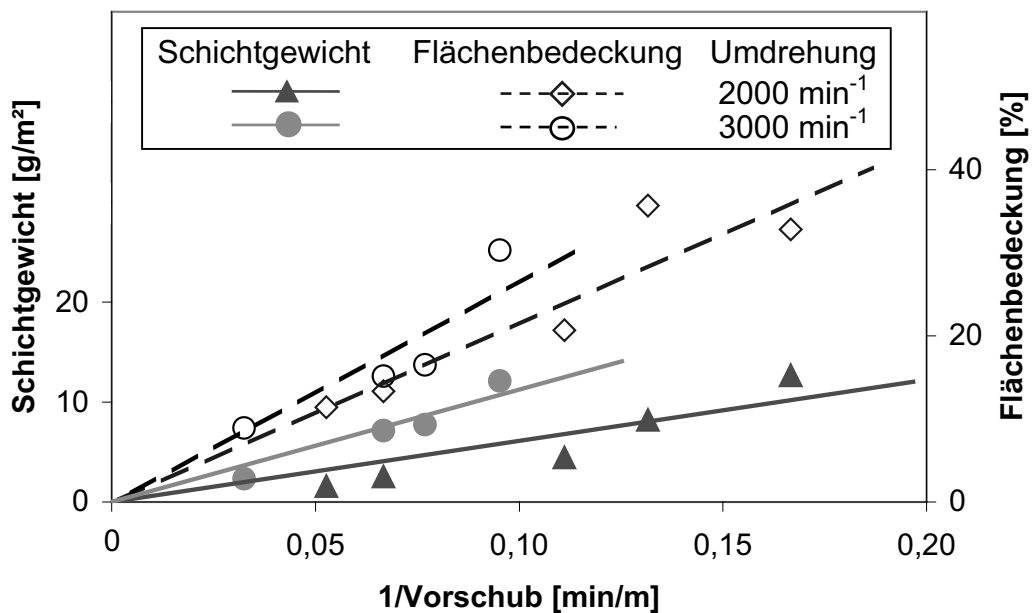


Bild 6.33 *Abhängigkeit von Schichtgewicht und Flächenbedeckung von der Vorschubgeschwindigkeit bei der Beschichtung von Draht mit unterschiedlicher Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder (Tabelle 12.9)*

Bild 6.34 zeigt, daß die Flächenbedeckung wie in den Druckluft-Strahlversuchen mit der Strahlzeit zunächst ansteigt und bei etwa 35 % eine Sättigung erreicht. Auf Proben mit einem Schichtgewicht von 2 g/m² sind nur an wenigen Stellen Partikel des Beschichtungsmaterials mit einer Ausdehnung von 20 µm vorhanden. Im Querschliff sind auf dem gesamten Außenumfang einer Probe mit einem Schichtgewicht von 2 g/m² zwei einzelne Partikel des Beschichtungsmaterials sichtbar.

Mit der geringsten Vorschubgeschwindigkeit von ungefähr 1 m/min wurde mit unbenutztem Strahlmittel beim Einstellen der Strahlanlage ein Schichtgewicht von 150 g/m² aufgetragen. Diese Probe weist lokal Schichtdicken von bis zu 50 µm auf.

Die minimale Schichtdicke beträgt 5 μm . Die mittlere Schichtdicke entspricht der aus Schichtgewicht und Flächenbedeckung errechneten durchschnittlichen Schichtdicke von 37 μm . Auch bei diesem hohen Schichtgewicht sind nicht beschichtete Bereiche vorhanden (Bild 6.35); die Flächenbedeckung beträgt 57 %.

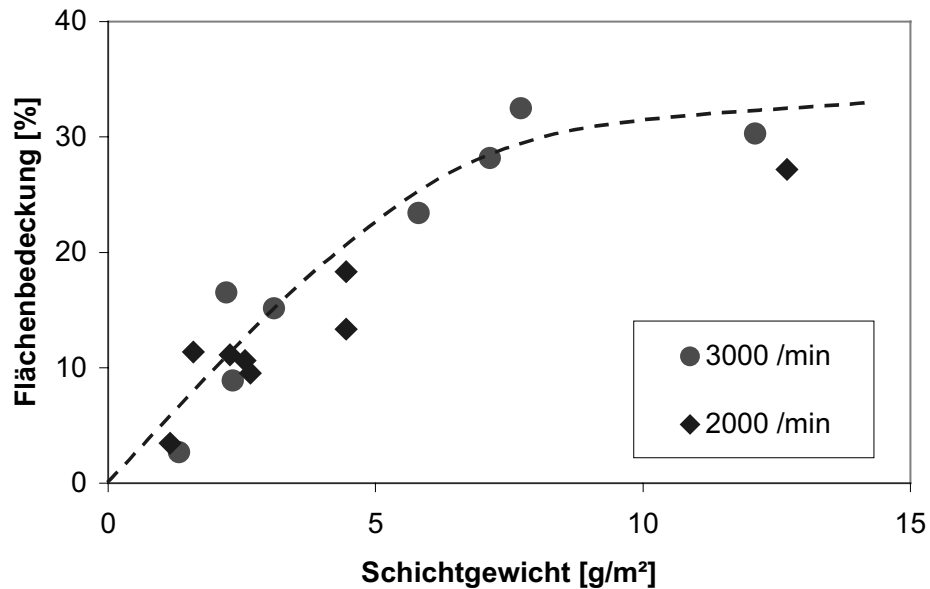
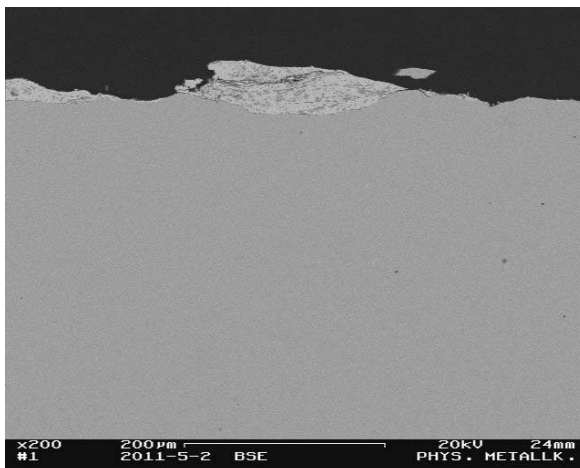


Bild 6.34 *Abhängigkeit der Flächenbedeckung vom Schichtgewicht bei der Beschichtung von Draht mit unterschiedlicher Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder (Rundes Strahlmittel)*



6.35.a *Querschliff*



6.35.b *Aufsicht*

Bild 6.35 *Mit 150 g/m² des runden Strahlmittels beschichteter Draht*

7 Verhalten der Beschichtungen bei der Umformung

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Modellversuche Spiketest und Vorwärtsfließpressen zusammengefaßt. Beschichtungen, die in den Modellversuchen an die Werte der als Referenz dienenden konventionellen Behandlung mit Phosphat und Seife heranreichten, wurden unter industriellen Bedingungen bei den Industriepartnern in der Praxis erprobt.

7.1 Spiketest

7.1.1 Einfluß der Rohteilgröße

Es wurden Spiketests mit Rohteilen von $\varnothing 20 \times 30$ mm und $\varnothing 25 \times 30$ mm durchgeführt. Bild 7.1 zeigt, daß die durch verschiedene Schmiermittel bewirkten Unterschiede in der Spikehöhe für die größeren Rohteile stärker ausgeprägt sind. Für die nachfolgend beschriebenen Spiketests werden Rohteile mit den Abmessungen $\varnothing 25 \times 30$ mm verwendet.

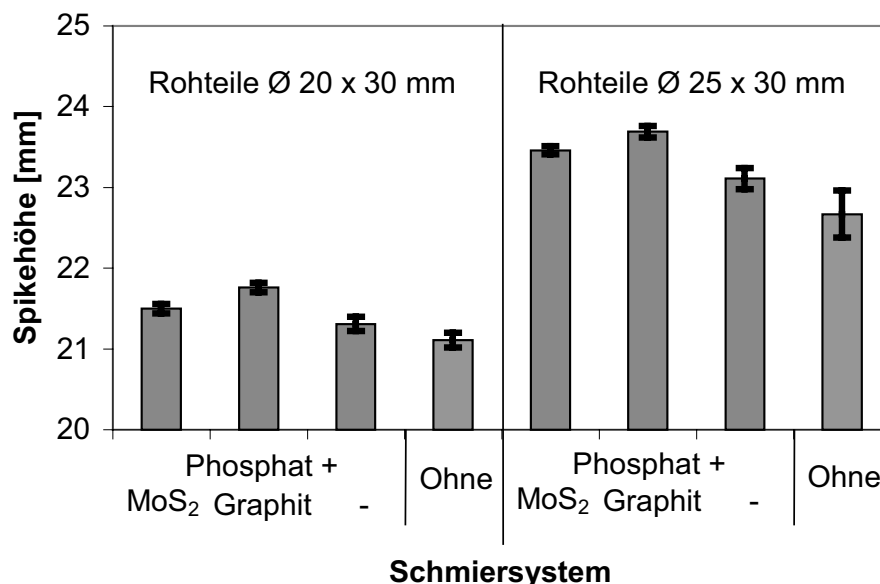


Bild 7.1 *Einfluß der Geometrie der Rohteile auf die Spikehöhen für verschiedene Beschichtungen (Serie A, Tabelle 12.11)*

Die maximalen Unterschiede liegen bei 2 mm oder 20 % der variablen Spikehöhe. Mehrere Versuche mit gleich behandelten Proben zeigen eine geringe Streuung von

etwa $\pm 0,1$ mm. Die Differenzen der Preßkräfte betragen etwa 50 kN oder 4 % der Gesamtkraft. Die Preßkräfte weisen eine stärkere Streuung (etwa ± 10 kN) auf.

7.1.2 Einfluß der Werkzeuggeometrie

Für die Spiketests wurde die kleinste mögliche Spalthöhe zwischen Stempel und Matrize eingestellt, da bei größerer Spalthöhe die Spikehöhe erwartungsgemäß absinkt.

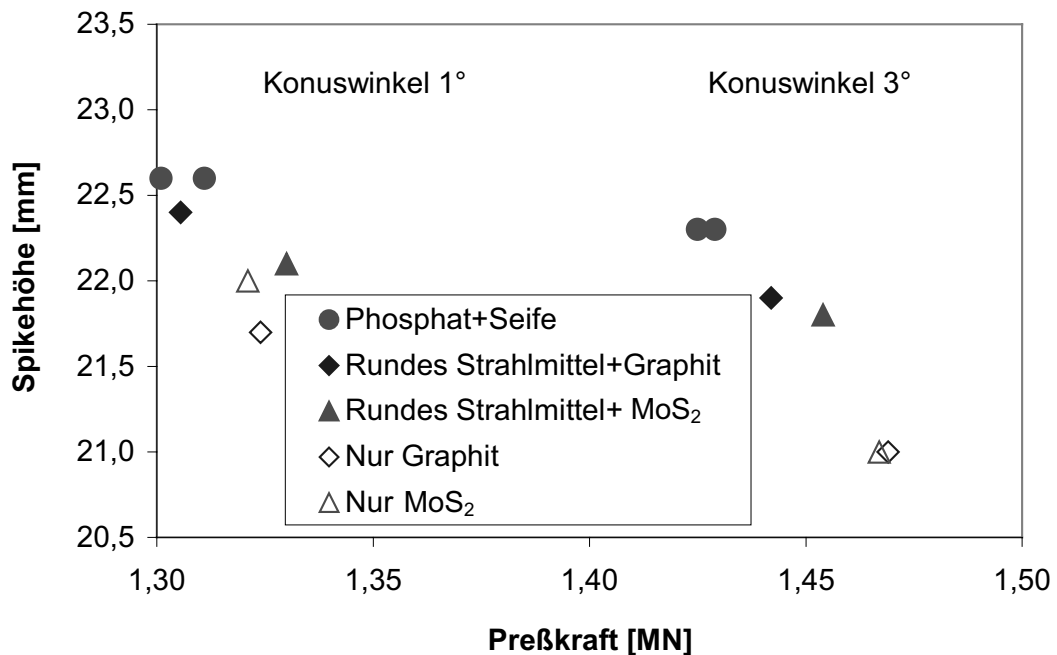


Bild 7.2 *Einfluß des Konuswinkels beim Spiketest (Serie B, Tabelle 12.12)*

Bild 7.2 zeigt den Zusammenhang zwischen Spikehöhe und Preßkraft für Konuswinkel des Werkzeugs von 1° und 3° . Für die nachfolgenden Versuche wurde die Werkzeugvariante mit dem größeren Konuswinkel verwendet, da der größere Winkel zu größeren Unterschieden der Spikehöhen und Preßkräfte bei verschiedener Beschichtung der Proben führt.

7.1.3 Einfluß der Beschichtungen

Eine Schmierung, die zu größeren Spikehöhen führt, äußert sich gleichzeitig auch in einer Verringerung der erforderlichen Preßkraft. Unbeschichtete Proben erreichen

niedrige Spikehöhen (Bild 7.3). Die Kombination der mechanischen Beschichtung mit Schmiermitteln auf Basis von Graphit oder Molybdändisulfid erreicht die gleichen Spikehöhen wie die als Referenz dienende Phosphatierung mit Seife (Bilder 7.3 und 7.4).

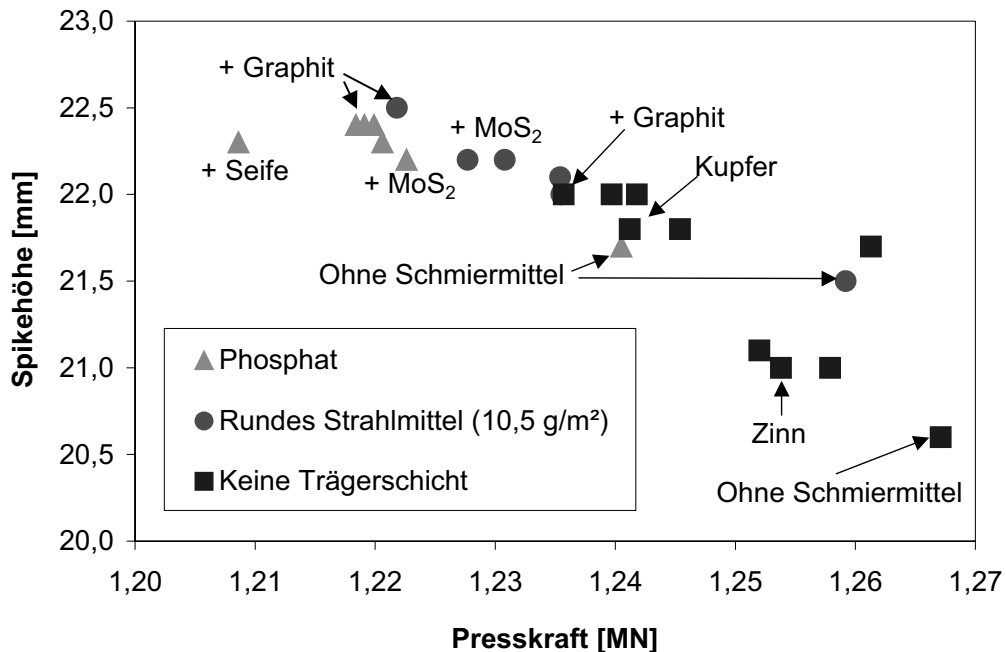


Bild 7.3 *Einfluß verschiedener Schmiermittelarten auf die Spikehöhen (Serie C, Tabelle 12.13)*

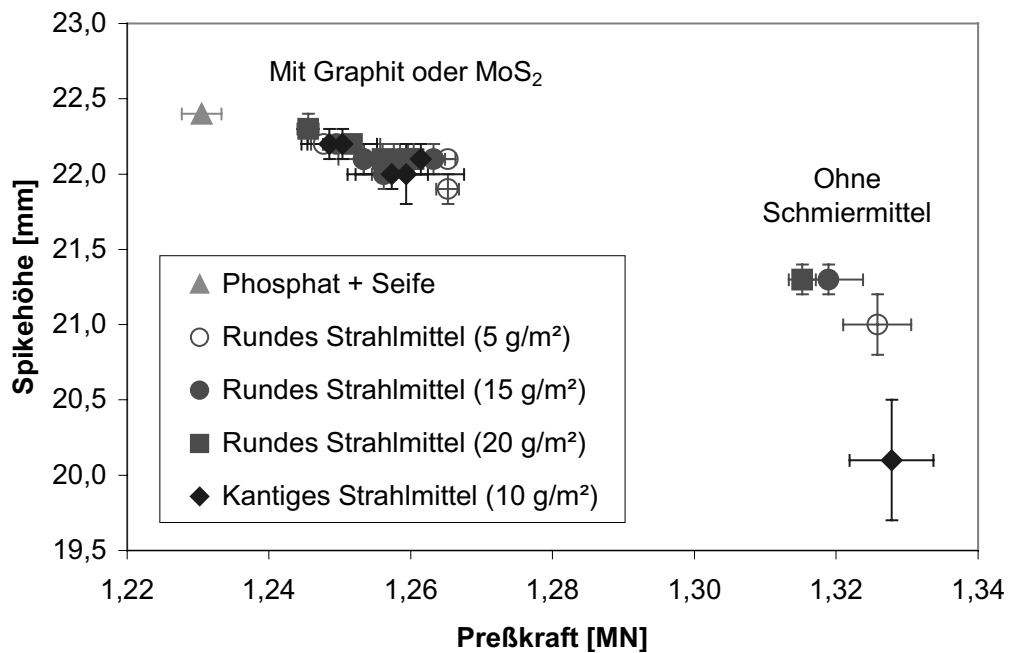


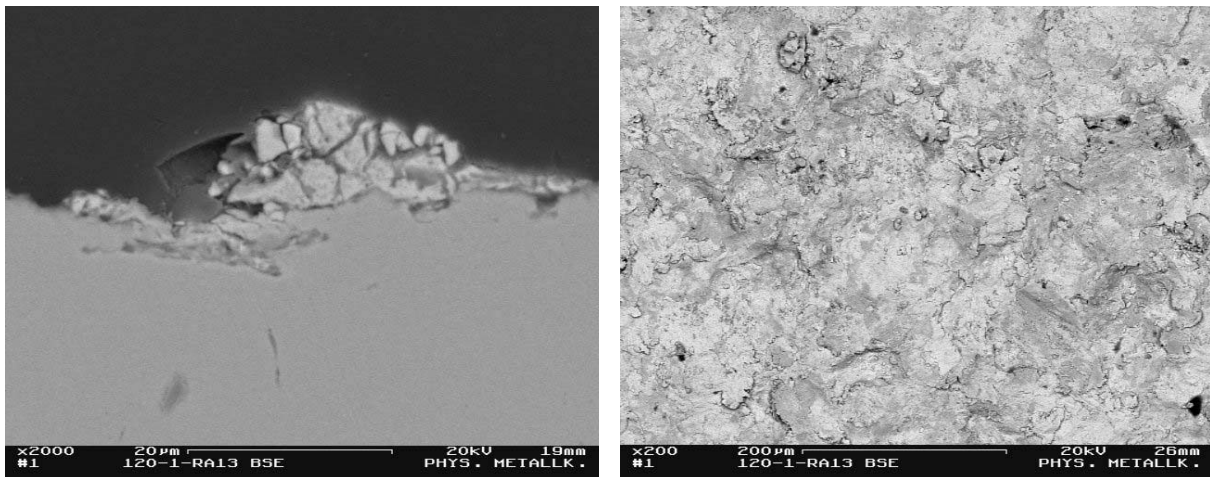
Bild 7.4 *Einfluß verschiedener Schmiermittelvarianten auf Basis von Graphit oder Molybdändisulfid auf die Spikehöhen (Serie D, Tabelle 12.14; Balken: Standardabweichung)*

Mit einer Phosphatbeschichtung oder der mechanisch aufgetragenen Beschichtung ohne zusätzliches Schmiermittel oder verschiedenen Schmiermitteln ohne Trägerschicht werden die Werte der Kombination aus Trägerschicht und Graphit oder Molybdändisulfid nicht erreicht (Bild 7.3). Bild 7.4 zeigt, daß verschiedene Schmiermittel mit unterschiedlicher Größe der Graphit- beziehungsweise Molybdändisulfidteilchen ähnliche Spikehöhen bewirken. Die unterschiedliche Zusammensetzung der Schmiermittel (Tabelle 12.14) hat gegenüber der Wirkung der Trägerschicht keinen signifikanten Einfluß.

7.1.4 Verhalten der mechanischen Beschichtung

Die Untersuchung umgeformter Teile zeigt, daß die mechanisch aufgetragene Beschichtung der Oberflächenvergrößerung des umgeformten Werkstücks folgt. Die beschichteten Stellen werden ausgebreitet und die Dicke der Beschichtung nimmt ab.

Bild 7.5 zeigt Aufsicht und Querschliff eines Rohteils mit einer Flächenbedeckung von 55 %. Die auf der Oberfläche haftenden Partikel des runden Strahlmittels weisen eine Dicke bis zu 10 µm und eine große Anzahl von Rissen auf.



7.5.a Querschliff

7.5.b Aufsicht

Bild 7.5 Querschliff und Aufsicht eines Rohteils für den Spiketest mit einem Schichtgewicht von 10,5 g/m² (rundes Strahlmittel, Serie C)

Bild 7.6 zeigt die Oberfläche des Spikes. An der Spitze, die keinen Kontakt zum Werkzeug hatte, ist die Beschichtung noch vorhanden, an der stark umgeformten

Flanke der Spitze sind dagegen in rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen keine Rückstände der Beschichtung zu finden. Auch Messungen mit EDX und SIMS liefern kein Zinksignal. Rückstände des Schichtmaterials befinden sich nur an geringer verformten Stellen. In Richtung des Übergangs zum Teller ist mit EDX ein Zinksignal meßbar (Bild 7.6.c). Einzelne Partikel des Beschichtungsmaterials sind nicht zu erkennen. Im weiteren Verlauf des Übergangs nimmt die Menge der Rückstände der Beschichtung zu. Einzelne Partikel des Schichtmaterials befinden sich in lokalen Vertiefungen der Werkstückoberfläche. Auf der Oberseite des Tellers ist Beschichtungsmaterial in einer verhältnismäßig gleichmäßigen Schicht mit einer Dicke bis zu 3 μm vorhanden (Bild 7.6.a). Auf der schrägen Fläche des Tellers sind im Querschliff keine Rückstände der Beschichtung mehr zu erkennen.

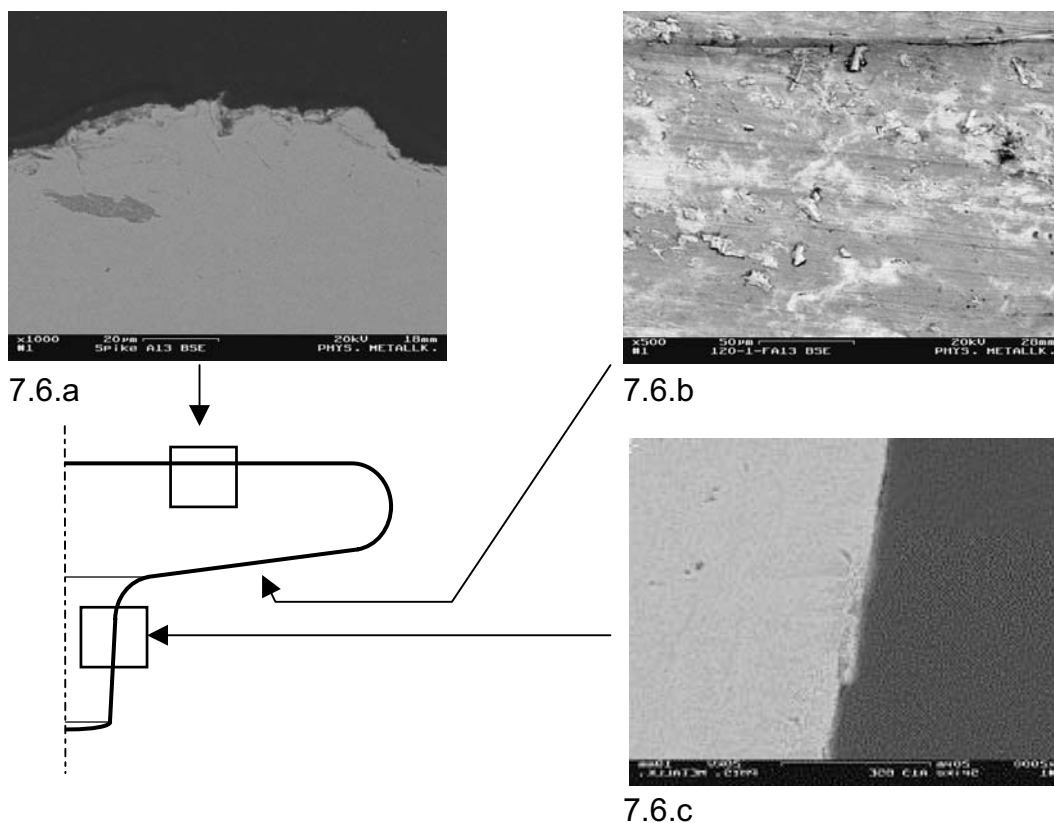


Bild 7.6 Oberfläche des Spike (Beschichtung des Rohteils mit rundem Strahlmittel, $10,5 \text{ g/m}^2$, kein Schmiermittel, Serie A)

Eine Aufsicht auf die schräge Fläche des Tellers (Bild 7.6.b) zeigt, daß das Beschichtungsmaterial durch die Umformung fest auf die Oberfläche gedrückt und verteilt wurde. Die Flächenbedeckung liegt mit 35 % nur noch bei ungefähr der Hälfte des Wertes für das Rohteil. Die im Bild waagrecht verlaufenden Spuren sind durch

den Werkstofffluß bei der Umformung entstanden. Auf der Flanke der Spikespitze ist auch in der Aufsicht kein Beschichtungsmaterial mehr zu finden.

Ein Teil mit höherem Schichtgewicht ($19,3 \text{ g/m}^2$) und größerer Flächenbedeckung (64 %) weist nach der Umformung auf weniger stark verformten Bereichen ebenfalls eine Abnahme der Flächenbedeckung auf etwa die Hälfte auf. Stark umgeformte Stellen weisen wie bei geringerem Schichtgewicht keine Rückstände der Beschichtung auf.

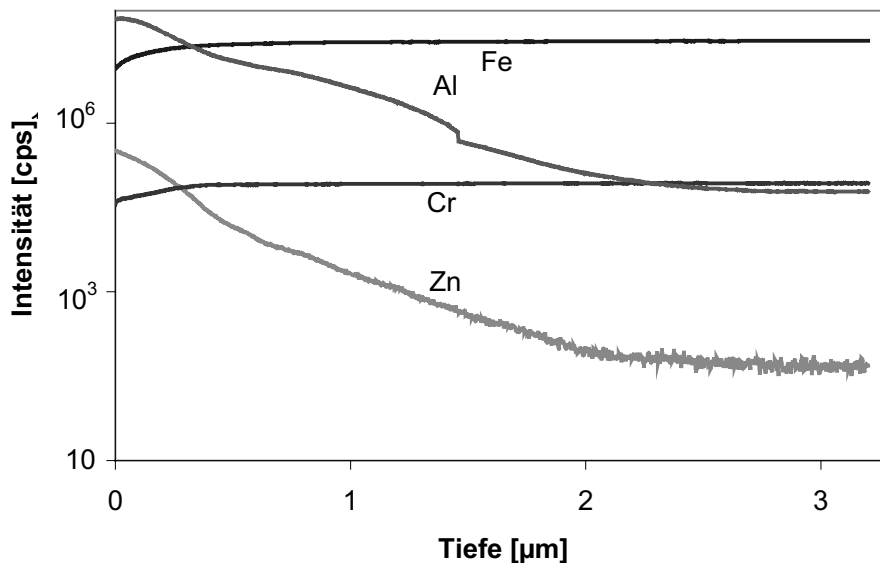


Bild 7.7 Tiefenprofil der Elementkonzentrationen eines umgeformten Spikes (SIMS, gleiche Stelle wie in Bild 7.5.b)

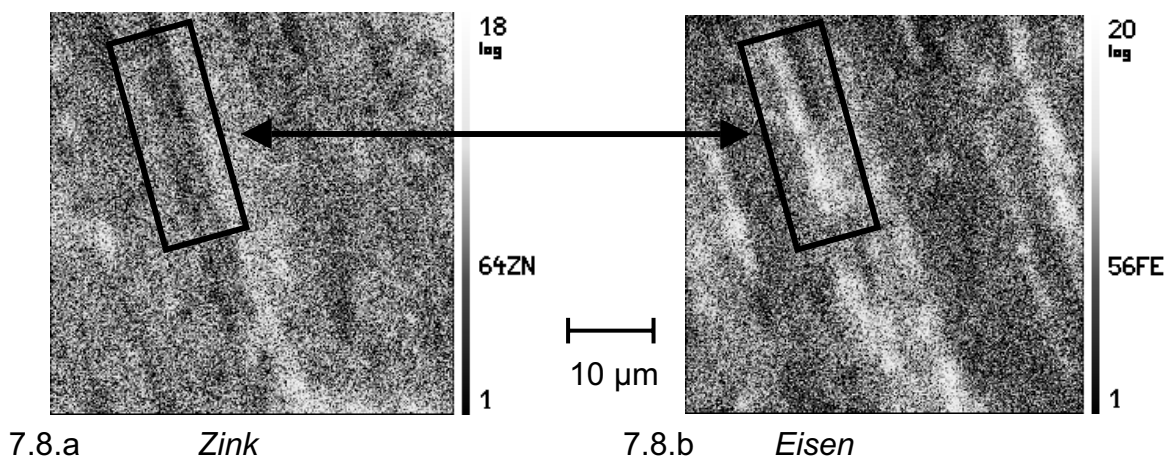


Bild 7.8 Elementverteilung auf umgeformter Oberfläche (SIMS)

Die Untersuchung der schrägen Fläche des Tellers mit Sekundärionen-Massenspektrometrie an einer Stelle mit im BSE-Kontrast erkennbaren Rückständen der Beschichtung ergibt eine mittlere Schichtdicke von 2 µm (Bild 7.7). Bild 7.8 zeigt

die Elementverteilung. Zinkreiche Gebiete decken sich mit Bereichen mit niedrigerem Eisen-Signal.

7.1.5 Einfluß des Schichtgewichts

Zunehmende Schichtgewichte des kantigen Strahlmittels bewirken größere Spikehöhen (Bild 7.9). Für die Spikehöhe sind Art des Strahlmittels, Schichtgewicht und Flächenbedeckung entscheidend. Die Bedingungen während der Beschichtung der Proben wie die Größe der übrigen Rohteile (Geometrie 1 und 2) oder die Geschwindigkeit der Schleuderräder (Tabelle 12.1) zeigen keine Auswirkung.

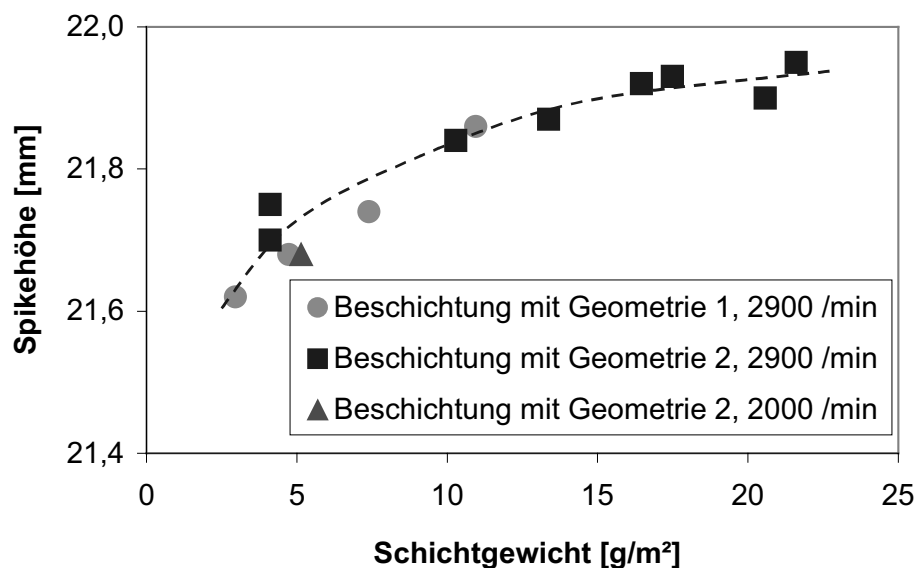


Bild 7.9 Spikehöhen für verschiedene Schichtgewichte des kantigen Strahlmittels und Graphit (30 g/m², Beschichtung der Proben zusammen mit Rohteilen der Geometrie 1 und 2, Tabelle 12.1)

Die Spikehöhe ist für mit dem runden Strahlmittel beschichtete Teile schon bei einem Schichtgewicht von ca. 5 g/m² deutlich größer als für mit dem kantigen Strahlmittel mit ca. 10 g/m² beschichtete (Bild 7.10). Eine Steigerung des Schichtgewichtes bei der Beschichtung mit rundem Strahlmittel bewirkt bis zu einem Wert von 15 g/m² eine weitere Vergrößerung der Spikehöhe. Eine Erhöhung auf ca. 20 g/m² führt zu keiner weiteren Verbesserung.

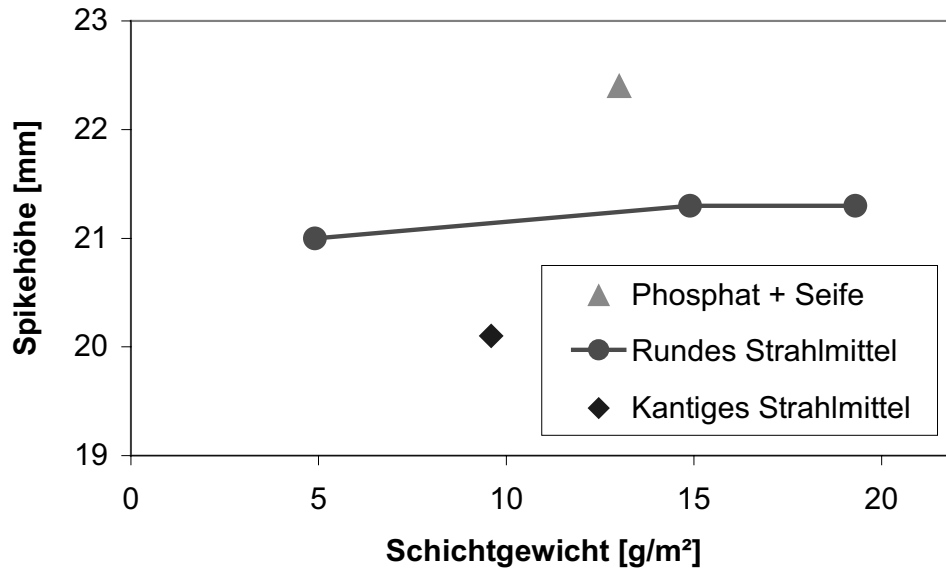


Bild 7.10 Spikehöhen für verschiedene Schichtgewichte (Serie D, Tabelle 12.14)

7.1.6 Einfluß der Flächenbedeckung

Bild 7.11 zeigt den Anstieg der Spikehöhe in Abhängigkeit von der Flächenbedeckung der verschiedenen Beschichtungen. Für die mechanischen Beschichtungen zeigt sich annähernd ein linearer Zusammenhang. Die Extrapolation auf eine Flächenbedeckung von 100 % ergibt eine Spikehöhe, die der experimentell für Phosphatschichten ermittelten entspricht.

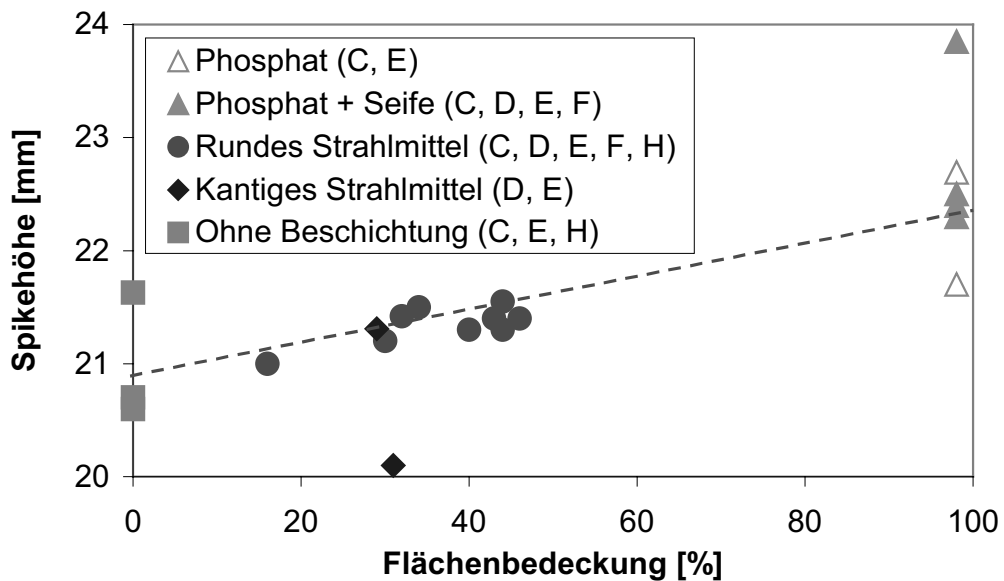


Bild 7.11 Spikehöhen in Abhängigkeit von der Flächenbedeckung für verschiedene Beschichtungen (Mechanische Beschichtungen ohne Schmiermittel, Serien C, D, E, F und H, Tabellen 12.13 bis 12.18)

7.1.7 Einfluß des Schichtgewichts mit Schmiermittel

Die mechanische Beschichtung wirkt als Trägerschicht für das Schmiermittel und verbessert die Schmierwirkung gegenüber Proben ohne Trägerschicht deutlich (Kapitel 7.1.6, Bild 7.11). Die Menge der mechanischen Beschichtung hat dabei nur untergeordneten Einfluß.

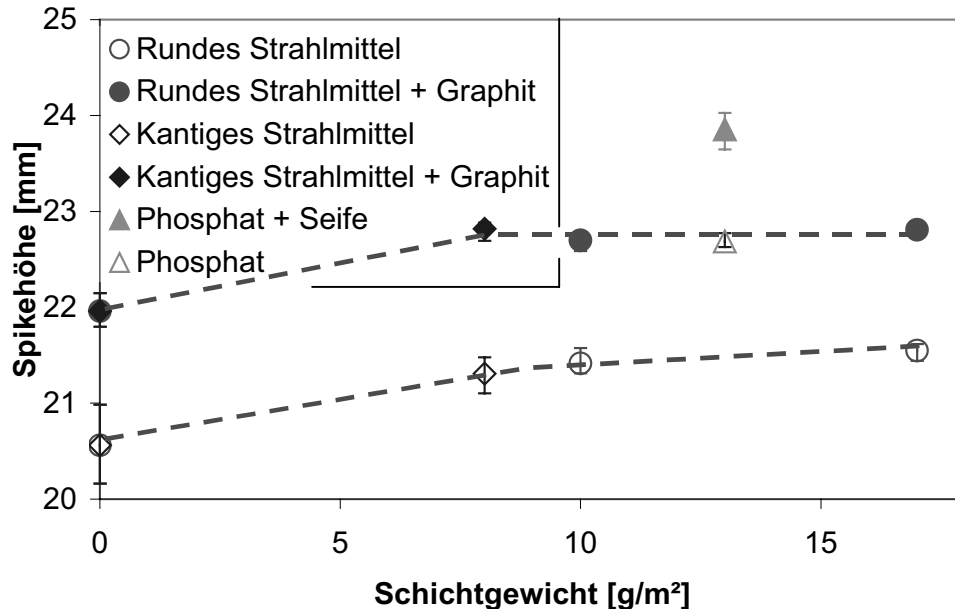


Bild 7.12 Spikehöhen für verschiedene Schichtgewichte (Serie E, Tabelle 12.15)

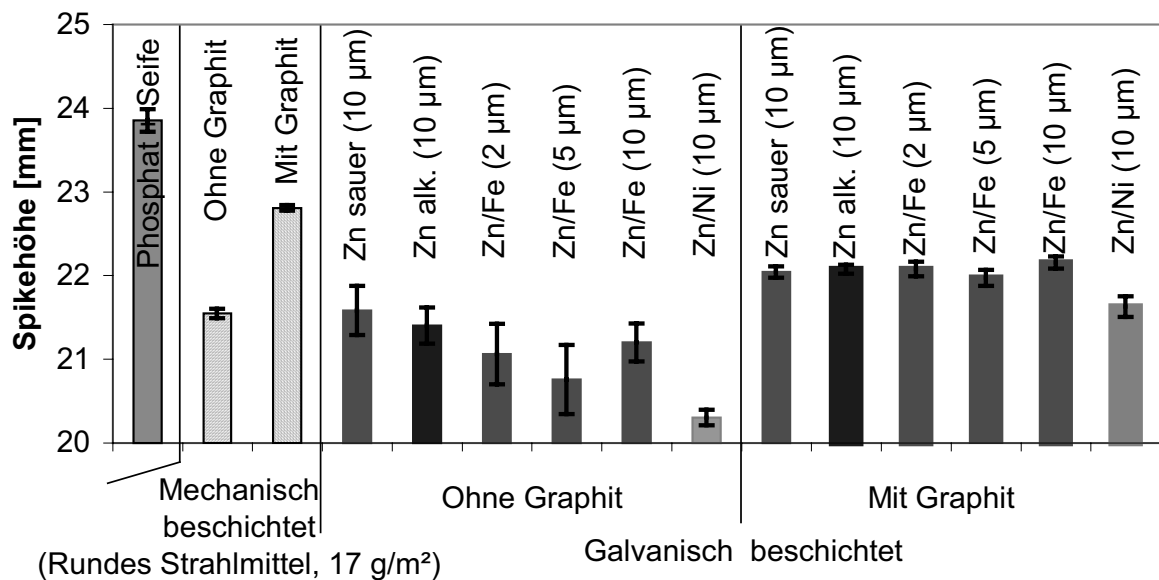


Bild 7.13 Spikehöhen für galvanisch verzinkte Proben mit und ohne Schmiermittel (Serie E, Tabelle 12.15)

Galvanisch verzinkte Proben mit einer geschlossenen Schicht erreichen die gleichen Spikehöhen wie mechanisch beschichtete Proben (Bild 7.13), die Werte weisen jedoch große Streuung auf, obwohl die Schichtdicke auf $\pm 10\%$ konstant ist. Die Schmierwirkung der galvanischen Beschichtung ist aufgrund der geringen Rauheit von $R_a = 0,5\ \mu\text{m}$ bis $1,0\ \mu\text{m}$ und der großen Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug geringer als erwartet. In Verbindung mit Graphit als Schmiermittel werden deutlich geringere Spikehöhen als mit mechanisch beschichteten Proben mit Schmiermittel erreicht. Die glatte Oberfläche der galvanischen Beschichtung führt zu schlechter und ungleichmäßiger Haftung des Graphits.

7.1.8 Härte und Temperatur der umgeformten Teile

Die Härte der Rohteile liegt bei 180 HV1. Der Verlauf der Härte über den Querschnitt der umgeformten Spikes in horizontaler und vertikaler Richtung zeigt Bild 7.14. Es werden Härtewerte zwischen 190 HV1 an der Spikespitze und 320 HV1 im Teller erreicht. Mit Phosphat und Seife sowie mit rundem Strahlmittel und Graphit beschichtete Teile weisen nach der Umformung annähernd gleiche Härteverteilungen auf.

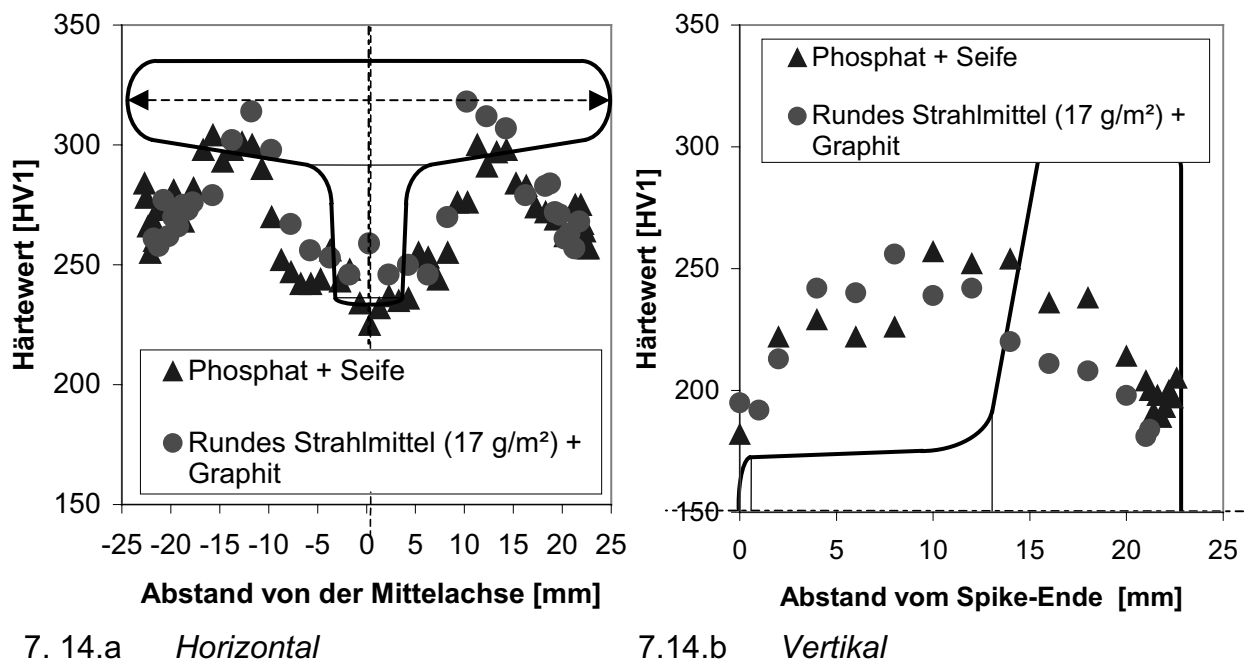


Bild 7.14 Härte der umgeformten Spikes (Serie E)

Bei der Umformung wurden Temperaturen zwischen 94 °C bei unbeschichteten bis 147 °C bei mit kantigem Strahlmittel und Graphit beschichteten Proben gemessen. Die Temperatur steigt gleichmäßig mit der Spikehöhe an. Die Temperaturerhöhung entsteht durch die Verformung, die Auswirkung der Reibung ist gering.

7.1.9 Einfluß der Preßgeschwindigkeit

Bei der Verwendung der konventionellen Behandlung mit Phosphat und Seife führt höhere Preßgeschwindigkeit häufig zu Schwierigkeiten. Mechanische Beschichtungen mit Graphit zeigen bei steigender Preßgeschwindigkeit dagegen keine Abnahme der Schmierwirkung (Bild 7.15). Für mit Phosphat und Seife sowie mit rundem Strahlmittel und Molybdändisulfid behandelte Proben sinkt die erreichte Spikehöhe mit der Preßgeschwindigkeit. Ohne Schmiermittel zeigen Proben, die unter Verwendung des runden Strahlmittels beschichtet wurden, keinen signifikanten Einfluß der Preßgeschwindigkeit. In Verbindung mit Graphit als Schmiermittel erreicht die Beschichtung mit rundem Strahlmittel bei steigender Preßgeschwindigkeit geringfügig größere Spikehöhen.

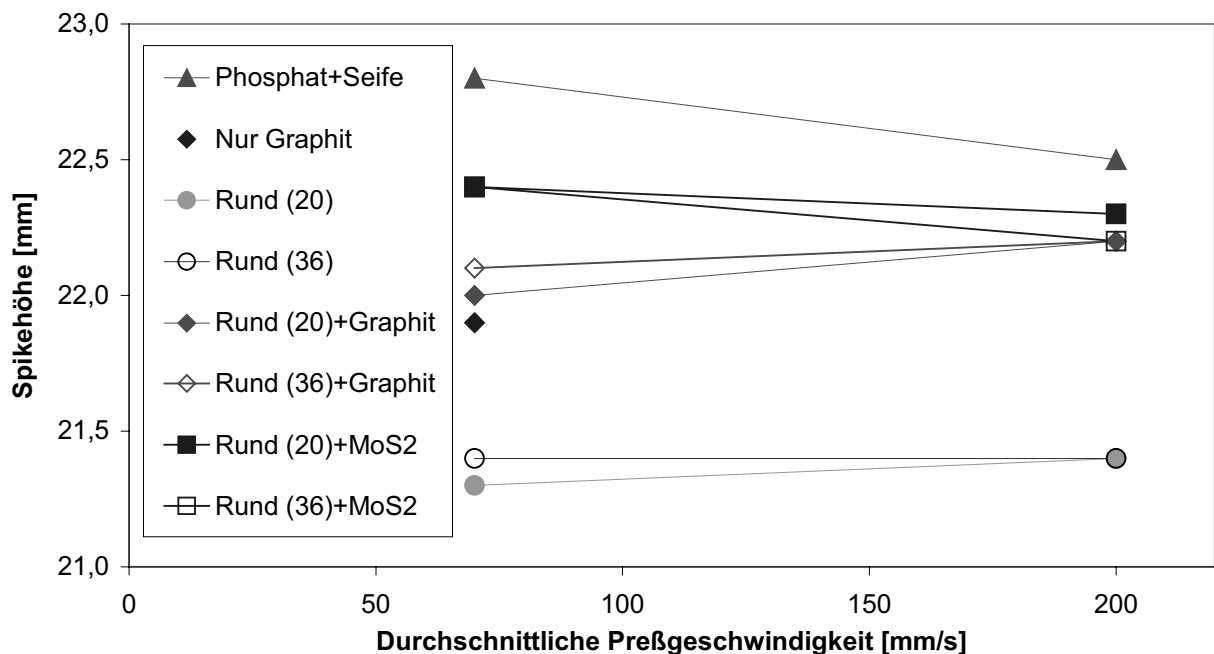


Bild 7.15 Einfluß der Preßgeschwindigkeit (Serie F, Tabelle 12.16)

7.1.10 Einfluß der Schmiermittelmenge

Den Einfluß der Graphitmenge auf die Spikehöhe zeigt Bild 7.16. Bei Verwendung feinerer Graphitpartikel steigt die Spikehöhe mit der Schmiermittelmenge, bei groberen Graphitpartikeln dagegen nicht. Steigende Mengen an Molybdändisulfid bewirken eine Verringerung der Spikehöhe. Nach mechanischer Beschichtung werden mit Graphit deutlich größere Spikehöhen als bei unbeschichteten Proben erreicht.

Die Schmiermittelmenge kann in der Praxis nicht beliebig erhöht werden, da dann ein Teil der Beschichtung beim Einfahren in die Werkzeuge abgestreift wird (Kapitel 7.3.4) und sich Ansammlungen im Werkzeug bilden (Kapitel 7.3.1).

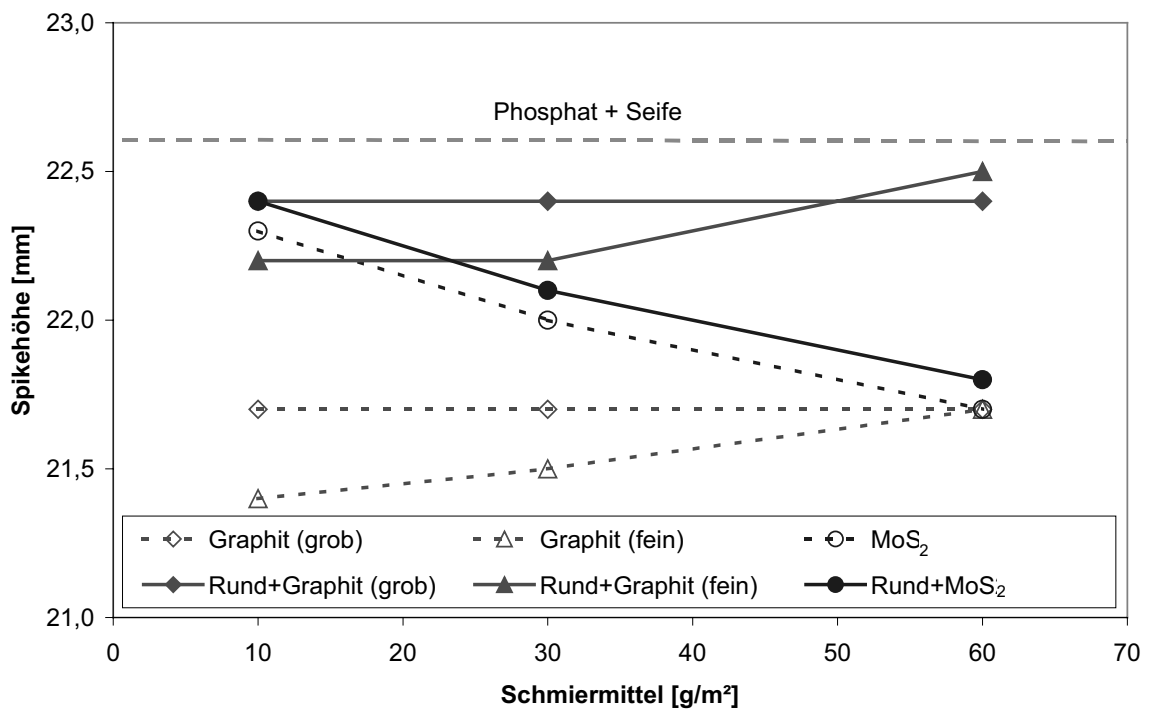


Bild 7.16 Einfluß verschiedener Schmiermittelmengen (Serie G, Tabelle 12.17)

7.1.11 Einfluß von Gesenkschmiermittel

In Versuchen mit Gesenkschmiermittel übertreffen alle Kombinationen der Beschichtung deutlich die Referenz Phosphat und Seife. Die größten Spikehöhen erreicht die Kombination der mechanisch aufgetragenen Trägerschicht mit Graphit als Gesenkschmiermittel. In Vorversuchen zeigten Emulsionen von Graphit in

Wasser die besten Ergebnisse gegenüber Graphit in Öl oder reinen Ölen. In Versuchen mit verschiedenen Beschichtungen der Rohteile erreichen Proben mit mechanischer Beschichtung mit dem runden Strahlmittel und Graphit die Spikehöhen der mit Phosphat und Seife behandelten (Bild 7.17).

Beim Auftrag des Graphits als Gesenkschmiermittel wird die Oberfläche des Werkzeugs gleichmäßig benetzt. Das Wasser dampft vom warmen Werkzeug ab und der Graphit bleibt als trockene Schicht zurück. In Verbindung mit Graphit als Gesenkschmiermittel übertreffen alle Varianten die Beschichtung mit Phosphat und Seife. Sogar unbeschichtete Rohteile erreichen größere Spikehöhen. Eine Vorbehandlung des Rohteils mit Graphit oder Molybdändisulfid verbessert die Schmierwirkung weiter. Eine mechanische Beschichtung des Rohteils unter Verwendung des runden Strahlmittels bewirkt die größten Spikehöhen.

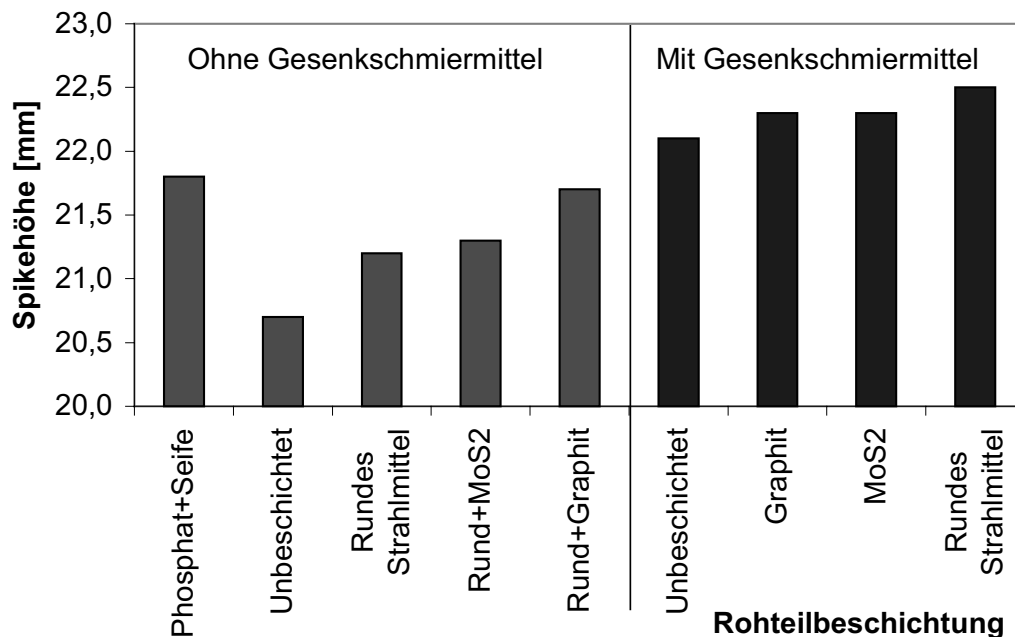


Bild 7.17 *Einfluß von Graphit als Gesenkschmiermittel (Serie H, Tabelle 12.18)*

7.2 Vorwärtsfließpressen

7.2.1 Einfluß der Beschichtungen

Das Vorwärtsfließpressen als ergänzender Modellversuch zur Schmierwirkung zeigt die gleichen Tendenzen wie der Spiketest. Mit Phosphat und Seife behandelte Proben als Referenz erfordern Kräfte von 500 kN (Bild 7.18). Proben mit mechanisch aufgetragener Trägerschicht und Schmiermittel benötigen größere Kräfte, die aber deutlich unter denen für nur mit Schmiermittel versehene Proben liegen. Graphit als Schmiermittel führt auch bei dieser Umformung mit und ohne Trägerschicht zu geringeren Preßkräften als Molybdändisulfid. Die Streuung der Einzelmessungen ist mit < 12 kN gering.

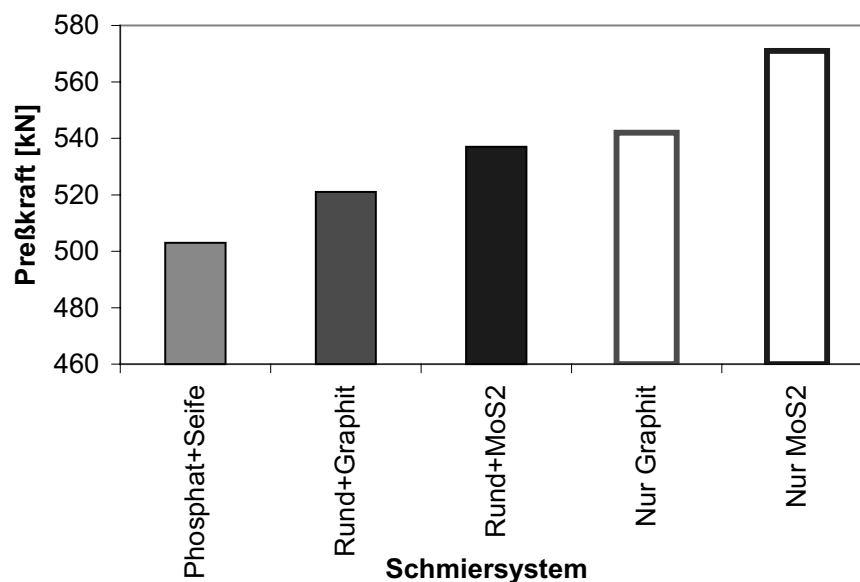


Bild 7.18 *Einfluß verschiedener Schmiersysteme beim Vorwärtsfließpressen (Serie J, Tabelle 12.19)*

7.2.2 Einfluß des Schichtgewichts

Vorwärtsfließpreßversuche bei der Firma Ascoforge mit einer hydraulischen Presse und einer Querschnittsreduktion von 60 % zeigen mit steigendem Schichtgewicht sinkende maximale Preßkräfte (Bild 7.19). Die Unterschiede zwischen den Preßkräften von 656 kN bis 625 kN sind bei diesen Versuchen mit 5 % nur gering.

Mit einem Schichtgewicht von ungefähr 14 g/m^2 des runden Strahlmittels erreicht die mechanische Beschichtung mit Graphit die Werte für die Phosphatierung mit Seife.

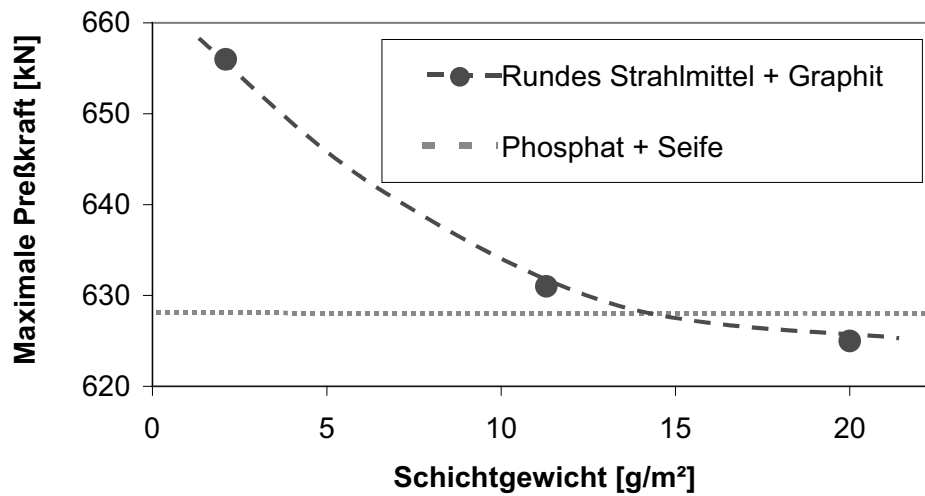


Bild 7.19 *Einfluß des Schichtgewichts beim Vorwärtsfließpressen (Serie K, Tabelle 12.20)*

7.3 Umformversuche in der Industrie

Ausgehend von den Ergebnissen der Modellversuche wurden die mechanischen Beschichtungen mit Graphit als Schmiermittel ausgewählt und in praxisnahen Umformversuchen in der Industrie eingesetzt. Nach einer kurzen Zusammenfassung der umfangreichen erfolgreichen Versuche werden im Folgenden die Ursachen für aufgetretene Beschädigungen analysiert. Eine Übersicht über die Umformversuche gibt Tabelle 12.21, die einzelnen Werte für die verschiedenen Beschichtungen werden jeweils bei den Versuchen angegeben.

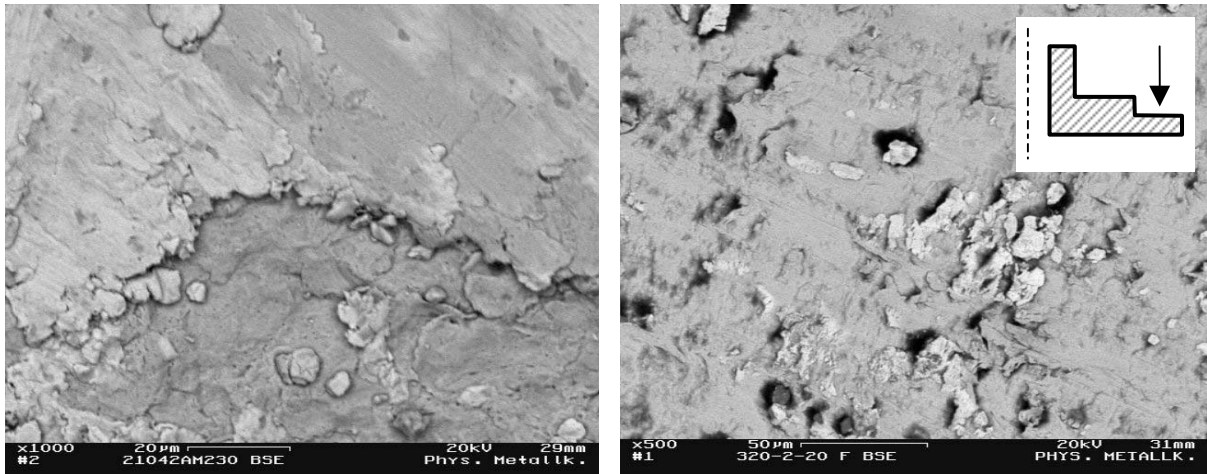
7.3.1 Mechanische Beschichtung mit Schmiermittel

Bei der Firma Hirschvogel wurden 20.000 Deckel aus mit dem kantigen Strahlmittel (12 g/m^2) und Graphit beschichteten Rohteilen unter industriellen Bedingungen erfolgreich produziert. Bei der Firma Ascoforge wurden 1000 Achszapfen aus mit dem kantigen Strahlmittel (12 g/m^2) und Graphit beschichteten Rohteilen hergestellt. Die gemessenen Umformkräfte entsprechen exakt denen für phosphatierte.

Rohteile für Ventildederteller der Firma Sidenor wiesen nach der mechanischen Beschichtung (rundes Strahlmittel, 20 g/m^2) eine deutlich höhere Oberflächenrauheit als die mit Phosphat beschichteten Teile der Serienproduktion auf. Das Beschichtungsmaterial war an erhöhten Stellen der Oberfläche verstärkt aufgetragen und mechanisch verformt (Bild 7.20.a). Auch die Oberflächenrauheit der umgeformten Teile war deutlich höher als die der Serienproduktion mit Phosphat und Molybdändisulfid.

Mit einem Schichtgewicht des runden Strahlmittels von 6 g/m^2 und 10 g/m^2 Graphit lag der äußere Durchmesser der umgeformten Teile unter dem Sollmaß und der Werkzeugverschleiß war hoch (400 Teile). Eine Erhöhung der Schmiermittelmenge führte zu Ansammlungen im Werkzeug, die eine vollständige Ausformung der Teile verhinderten. Teile mit einem Schichtgewicht von 10 g/m^2 des runden Strahlmittels und 10 g/m^2 Graphit konnten ebenso ohne Schwierigkeiten umgeformt werden wie Teile mit einem Schichtgewicht von 8 g/m^2 des kantigen Strahlmittels und Graphit (10 g/m^2). Bei der Produktion von 6.000 Stück lagen Maßhaltigkeit und

Werkzeugverschleiß innerhalb der Sollwerte. Eine Reinigung des Werkzeugs von Graphit war in regelmäßigen Abständen erforderlich. Nach der Umformung lagen Rückstände des Beschichtungsmaterials auf der Oberfläche des äußeren Rings vor allem in Vertiefungen der Werkstückoberfläche vor (Bild 7.20.b).



7.20.a *Beschichtung auf erhöhten Stellen der Rohteiloberfläche*

7.20.b *Rückstände der Beschichtung auf umgeformtem Werkstoff*

Bild 7.20 *Beschichtung des runden Strahlmittels auf Ventildfedertellern (20 g/m², Firma Sidenor)*

7.3.2 Mechanische Beschichtung mit Gesenkschmiermittel

Wurde in der Serienproduktion bei mit Phosphat und Seife beschichteten Rohteilen Gesenkschmiermittel verwendet, so war dies auch bei Rohteilen mit mechanischer Beschichtung und Graphit erforderlich. Bei der Firma Hirschvogel fanden Umformversuche unter industriellen Bedingungen mit Rohteilen mit mechanischer Beschichtung mit dem kantigen Strahlmittel (9 g/m²) und Graphit (20 g/m²) statt. Bei den Getriebewellen, Achszapfen und Wellen kam Öl als Gesenkschmiermittel zum Einsatz. Bei der Umformung von insgesamt 300.000 Teilen traten keine Beschädigungen oder übermäßiger Werkzeugverschleiß auf. Eine Charge der Getriebewellen mit einer mechanischen Beschichtung von nur 6 g/m² konnte unter Verwendung von Gesenkschmiermittel ohne Beschädigung umgeformt werden.

Mit rundem Strahlmittel und Graphit (20 g/m²) beschichtete Rohteile für Getriebewellen konnten mit Gesenkschmiermittel auch nach Reduktion des

Schichtgewichts von 20 g/m² auf 12 g/m² (1200 Teile) beziehungsweise 3 g/m² (40 Teile) problemlos umgeformt werden.

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der umgeformten Teile zeigen glatte Stahloberflächen ohne Rückstände der mechanischen Beschichtung. Eine Verringerung der Werkzeuglebensdauer, die in der Serienproduktion je nach Umformprozeß bei 10⁴ bis 10⁵ Teilen liegt, war bei Einsatz der mechanischen Beschichtung im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht festzustellen.

Die Umformung einer Getriebewelle aus Rohteilen, die mit kantigem Strahlmittel und Graphit beschichtet waren, gelang bei der Firma Ascoforge mit etwa 1000 Stück mit gleichem Werkzeugverschleiß und Maßhaltigkeit der Teile wie die Serienproduktion mit phosphatierten und mit Seife beschichteten Rohteilen. Der Versuch, im Gegensatz zur Serienproduktion auf das Gesenkschmiermittel zu verzichten, führte beim ersten Umformschritt zu einer Maßabweichung der Länge von 50 % gegenüber dem Sollwert. Das schlagende Geräusch beim Auswerfen des Teils wies auf hohe Auswerfkräfte hin.

7.3.3 Umformung von mechanisch beschichtetem Draht

Bei der Umformung des für die Herstellung von Schrauben bei der Firma Nedschroef mechanisch beschichteten Drahts führten Schichtgewichte von 6 g/m² und 8 g/m² bei der Umformung nach 6.500 beziehungsweise 9.000 Teilen zu Verschweißen und Beschädigungen der Teile. Mit einem Schichtgewicht von 10 g/m² konnten vier Serien mit der üblichen Werkzeuglebensdauer von jeweils 10.000 Stück hergestellt werden. In allen Fällen kam, wie in der Serienproduktion mit phosphatiertem und mit Seife beschichtetem Draht, Fließpreßöl als Gesenkschmiermittel zum Einsatz. Bestimmungen des Schichtgewichts nach dem Drahtziehen zeigen einen Verlust an Beschichtungsmaterial bis zu 30 %. Bei der Wärmebehandlung verdampft das zinkreiche Beschichtungsmaterial rückstandsfrei. Eine Versprödung bei der Vergütung wie beim Einsatz von Phosphat tritt mit den mechanischen Beschichtungen nicht auf.

7.3.4 Verhalten der Beschichtung bei mehreren Umformschritten

Gravimetrische Bestimmung des Schichtgewichts zeigen, daß die spezifische Menge des Beschichtungsmaterials und des Schmiermittels in jedem Umformschritt abnimmt (Bild 7.21). Unter Berücksichtigung der Oberflächenvergrößerung zeigt sich jedoch, daß die Gesamtmenge des Beschichtungsmaterials nach dem ersten Umformschritt konstant bleibt. Ein Teil der Beschichtung wird beim Einfahren des Werkstücks in das Werkzeug abgestreift und sammelt sich im Öl neben dem Werkzeug, das ein um den Faktor 3 höheres RFA-Signal für Zink als gefiltertes Öl zeigt.

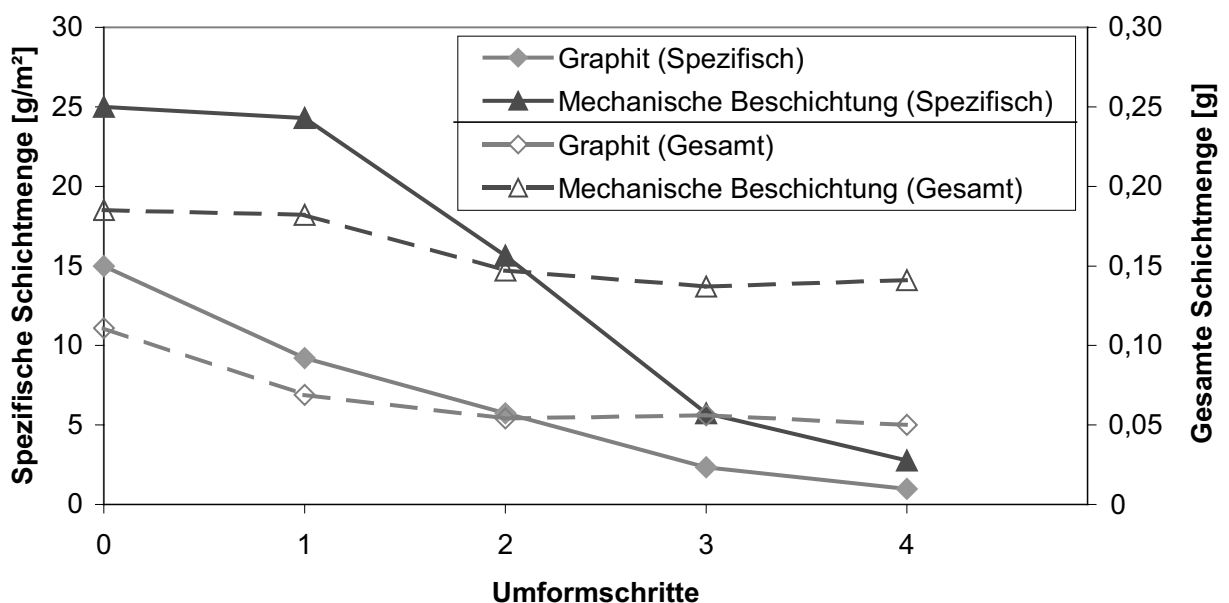


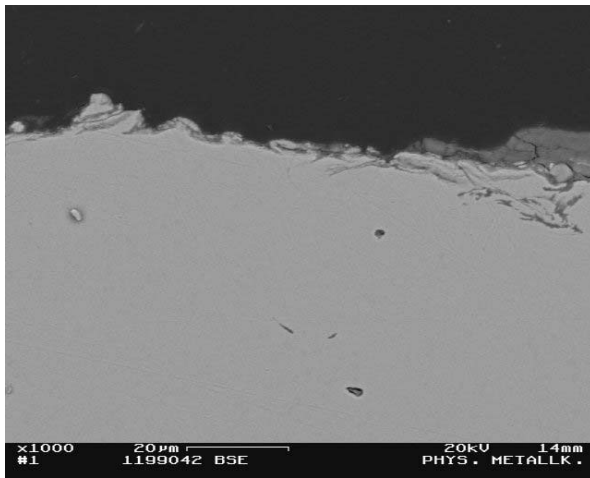
Bild 7.21 Schichtgewicht nach mehreren Umformschritten

7.3.5 Einfluß der Flächenbedeckung

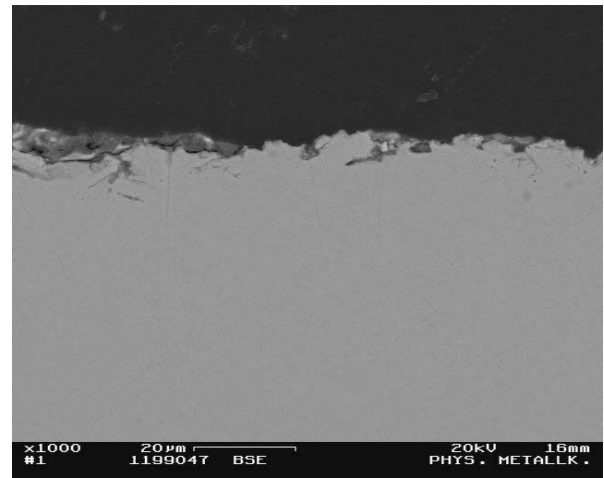
Bei einer Flächenbedeckung von unter 20 % führt die ungleichmäßige Verteilung des Graphits zu einer Beschädigung der Teile bei der Umformung.

Bei der Herstellung von Achszapfen bei der Firma Ascoforge aus mit dem kantigen Strahlmittel (20 g/m²) und Graphit beschichteten Rohteilen lag die Werkzeuglebensdauer bei 900 Teilen. Danach traten in der 5. Umformstufe Beschädigungen der Spitze auf. Mit Phosphat und Seife liegt die Lebensdauer des Werkzeugs bei 10.000 Teilen. Die Oberfläche der Rohteile ist nur teilweise mit einer Beschichtung bedeckt (Bild 7.22.a). Auf den umgeformten Teilen zeigt Bild 7.22.c

tragende Plateaus aus dem Werkstückstahl. Auf ihnen sind keine Rückstände des Beschichtungsmaterials zu finden. In Vertiefungen der Oberfläche liegen Reste der Beschichtung vor.



7.22.a Beschichtung auf Rohteil



7.22.b Beschichtung auf Rohteil

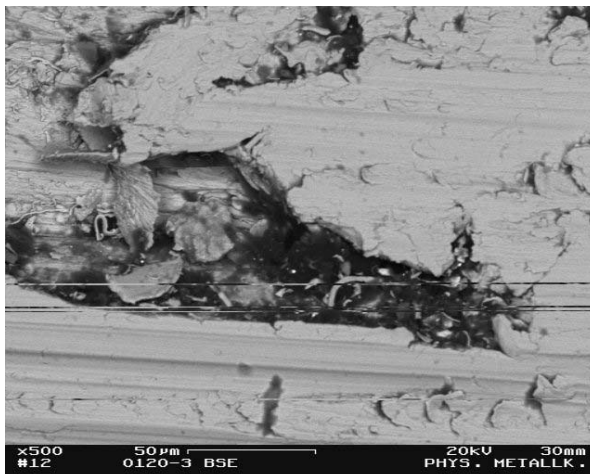
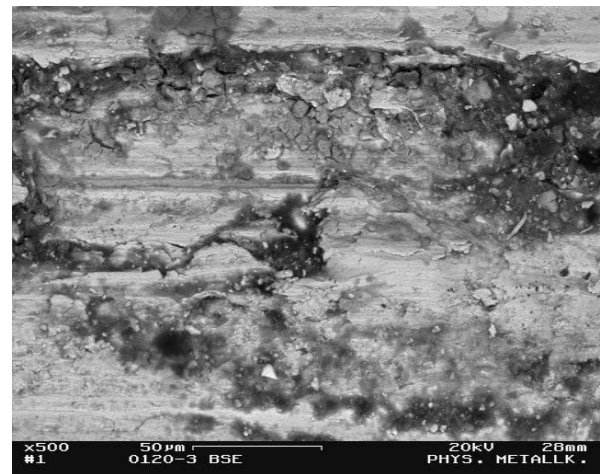
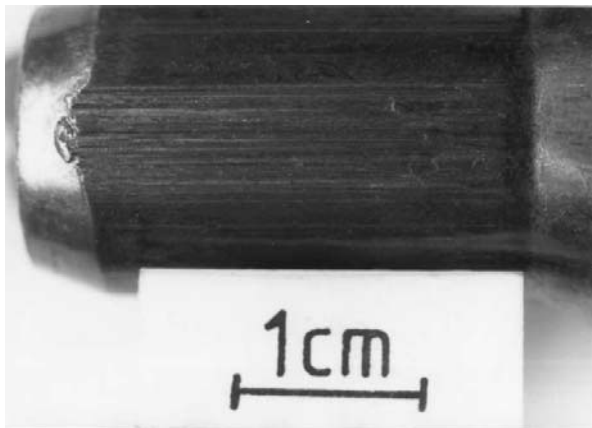
7.22.c Tragende Plateaus auf dem umgeformten Teil
Kantiges Strahlmittel (20 g/m²)7.22.d Stark verformte Oberfläche des umgeformten Teils
Rundes Strahlmittel (9 g/m²)

Bild 7.22 Beschichtung auf bei der Umformung beschädigten Teilen
(Firma Ascoforge)

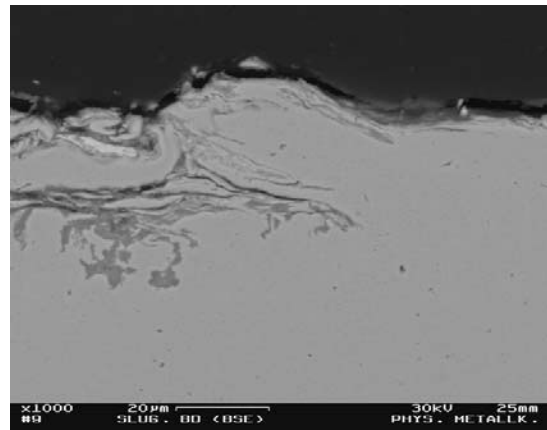
Rohteile, die mit dem runden Strahlmittel mit einem Schichtgewicht von 9 g/m² beschichtet wurden, führten nach 185 Teilen zu einer Beschädigung aller Umformstufen. Das Beschichtungsmaterial und der Graphit sind ungleichmäßig verteilt (Bild 7.22.b). Die Oberfläche des Fertigteils ist stark verformt. Bild 7.22.d zeigt Bruchstücke des Stahls und vereinzelt auch des Beschichtungsmaterials mit einer Größe von 10 µm. Der Anteil an Plateaus ist deutlich geringer als bei den mit kantigem Strahlmittel beschichteten Proben.

7.3.6 Korrosion der Werkstücke

Die Phosphatschicht schützt die Teile vor Korrosion, die mechanischen Beschichtungen aufgrund der geringen Flächenbedeckung jedoch nicht. Die Umformung muß zügig nach der Beschichtung erfolgen.



7.23.a *Bei der Umformung beschädigtes Teil*



7.23.b *Oxideinschlüsse unter der Werkstückoberfläche*

Bild 7.23 *Beschichtung und Gefüge von bei der Umformung beschädigten Teilen (Firma Ascoforge)*

Teile, die nach dem Reinigungsstrahlen oder nach der mechanischen Beschichtung über einen Zeitraum von mehreren Tagen gelagert wurden, führten bei der Umformung zu Beschädigungen. Am Werkzeug anhaftende Partikel erzeugen Kratzer auf den nachfolgenden Teilen (Bild 7.23.a). Im Querschliff sind in Bild 7.23.b Oxideinschlüsse sichtbar. Phosphatierte Teile, bei denen vereinzelt Oxide gefunden wurden (Kapitel 6.1) konnten ohne Beschädigung umgeformt werden.

Ein Salzkammersprühstest an phosphatierten und mit Seife beschichteten Rohteilen zeigte nach 24 Stunden geringe Anrostungen, nach 157 Stunden unverändertes Aussehen und nach 317 Stunden starke Korrosion. Mit den verschiedenen Strahlmitteln und Graphit behandelte Rohteile waren in beiden Fällen schon nach 24 Stunden vollständig angegriffen. Mit dem runden Strahlmittel behandelte Rohteile ohne zusätzliche Beschichtung mit Graphit wiesen erst nach 72 Stunden Anrostungen auf. Umgeformte Teile zeigen unabhängig von der Beschichtung nach 24 Stunden starke Korrosion.

7.3.7 Grenzen der mechanischen Beschichtung

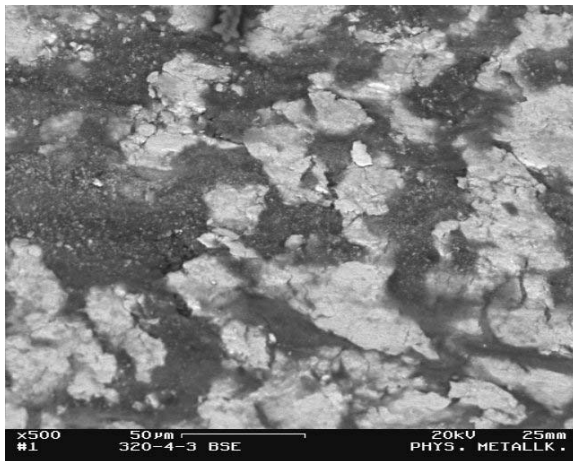
Die Grenzen der Schmierfähigkeit der mechanischen Beschichtung in Kombination mit Graphit wurden bei der Herstellung von Außenteilen von Gleichlaufgelenken durch Rückwärtsfließpressen erreicht. Mit einer Beschichtung mit kantigem Strahlmittel (20 g/m^2) und Graphit sowie zusätzlichem Öl als Gesenkschmiermittel war nach 165 Teilen der Stempel für das Rückwärtsfließpressen durch Verschleiß an der Außenkante unbrauchbar. Die Teile weisen Beschädigungen auf Innen- und Außenseite auf. Die lokale Bestimmung des Schichtgewichts und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, daß die Beschichtung nicht in der Lage ist, der hohen Oberflächenvergrößerung der Innenseite zu folgen. Die Oberflächenrauheit auf der Innenseite ($R_t = 7 \text{ }\mu\text{m}$ bis $R_t = 20 \text{ }\mu\text{m}$) lag deutlich über den Werten von mit Phosphat und Seife beschichteten Teilen ($R_t = 4 \text{ }\mu\text{m}$). Die Preßkräfte waren gegenüber der Produktion mit phosphatierten und mit Seife beschichteten Proben mit Gesenkschmiermittel unverändert.

Rohteile, die mit dem runden Strahlmittel (9 g/m^2) und Graphit beschichtet wurden, führten bei der Umformung des ersten Teils zu sichtbarer Beschädigung des Preßstempels. Nach dem 17. Teil trennte sich das Werkstück nicht mehr vom Stempel.

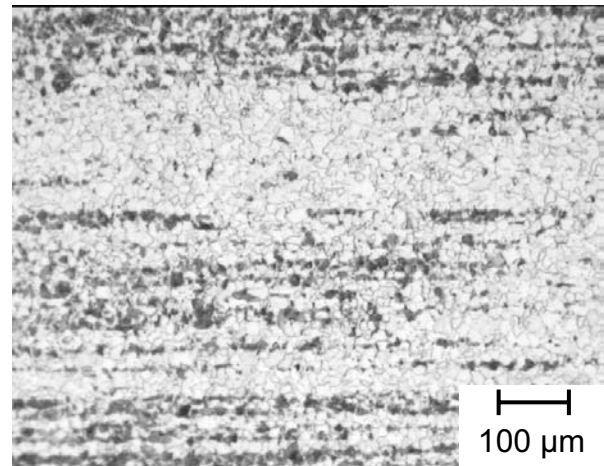
7.3.8 Beschädigungen in der Serienproduktion

Für das Auftreten von Beschädigungen in der Serienproduktion nach der Testphase ist die Ursache häufig nicht die mechanische Beschichtung. Bei der Umformung einer Serie von Getriebewellen kam es in einem Fall zu Fressen zwischen Werkzeug und Werkstück in der vierten Stufe. Die Untersuchung der Beschichtung von 10 g/m^2 des kantigen Strahlmittels und Graphit zeigte keine Unterschiede zu anderen Serien. Vereinzelt sind Oxideinschlüsse unter der Oberfläche der Werkstücke vorhanden. Im dritten Umformschritt wird der Durchmesser der Spitze auf 28 mm auf einer Länge von 10 mm reduziert (Rohteil $\varnothing 37,8 \times 263 \text{ mm}$). Auf der konischen Fläche davor sind in Bild 7.24.a Rückstände der Beschichtung in Vertiefungen der Werkstückoberfläche zu erkennen. Der verjüngte zylindrische Teil eine deutlich geringere Menge an Rückständen auf. Die Oxideinschlüsse und die Rückstände der

Beschichtung treten in der gleichen Form auch bei anderen Serien auf, deren Umformung nicht zu Beschädigungen führte. Der Grund für die Beschädigung bei der Umformung ergibt sich aus der Untersuchung des Gefüges. Vor der Umformung muß der Stahl weichgeglüht werden. In Bild 7.24.b ist im Gefüge des unverformten Rohteils eine zeilenförmige Orientierung und ungleichmäßige Verteilung des Perlits zu erkennen. Die Beschädigung bei der Umformung ist auf die zu kurz durchgeführte Wärmebehandlung zurückzuführen. Der Werkstoff war nicht weichgeglüht und wies daher schlechte Umformbarkeit auf.



7.24.a Rückstände der Beschichtung auf konischer Fläche



7.24.b Gefüge

Bild 7.24 Beschichtung und Gefüge von bei der Umformung beschädigten Teilen (Firma Hirschvogel)

7.4 Umweltbeeinflussung

Die Ergebnisse der Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Strahlmittel mit RFA und Plasmaspektroskopie enthält Tabelle 7.4. Das bisher verfügbare kantige Strahlmittel enthält geringe Mengen an als umweltkritisch einzustufenden Elementen wie Blei und Cadmium, die im runden Strahlmittel nicht auftreten.

Die Messung der Lärmemission der Strahlanlagen zeigte kurzzeitige Spitzen von 100 dB(A) beim Beladen der Anlage. Während des Betriebs liegt die Lärmentwicklung bei 85 dB(A).

Die Ergebnisse der Messung der Staubemissionen der mechanischen Strahlanlagen enthält Tabelle 7.5. Über 90 % der Gesamtmasse der Staubpartikel bestehen aus Eisen oder Zink. Eine Anreicherung anderer Elemente wurde nicht festgestellt. Die im kantigen Strahlmittel vorhandenen umweltgefährdenden Elementen wie Cadmium oder Blei treten in den untersuchten Stäuben nicht in signifikanter Menge auf. Eine als kritisch einzustufende Form der Staubpartikel, vergleichbar zu Fasern, liegt nicht vor. Der zulässige Grenzwert für die Arbeitsplatzbelastung mit zinkhaltigen Stäuben von 5 mg/m³ wird bei allen Messungen deutlich unterschritten.

Element [Gew%]	Stahlkerne des runden Strahlmittels	Rundes Strahlmittel	Kantiges Strahlmittel
Aluminium	0	3,3	1,6
Blei	0	0	0,5
Cadmium	0	0	0,01
Chrom	0,03	0,01	0,1
Eisen	98,6	16,9	22
Kobalt	0,02	0,01	0,02
Mangan	0,62	0,08	0,13
Nickel	0,02	0,02	0,2
Phosphor	0,3	0,25	0,2
Quecksilber	0	0	0
Silizium	0,04	0	0
Zinn	0,004	0	0,01
Zink	0,16	79	75

Tabelle 7.4 Chemische Zusammensetzung der verwendeten Strahlmittel

Anlage	Ort der Messung	Dauer der Messung [min]	Status der Anlage	Partikelgröße [µm]	Konzentration [µg/m³]	
					Fe	Zn
2 (Versuchsbetrieb)	Vor Anlage	20	Nicht in Betrieb	0 - > 25	< 100	< 10
	Vor Anlage	20	In Betrieb	0 - > 25	~ 600	~ 500
	Abluftauslaß	10	In Betrieb	0 - > 25	< 10	< 10
2 (Serienproduktion)	Vor Anlage	20	Nicht in Betrieb	> 25	60	20
				25 - 6,8	30	10
				6,8 - 1,8	70	35
				1,8 - 0,4	75	50
				0,4 - 0,1	60	15
	Vor Anlage	20	In Betrieb mit Chargierung	> 25	75	30
				25 - 6,8	35	10
				6,8 - 1,8	70	35
				1,8 - 0,4	60	50
				0,4 - 0,1	70	10
	Abluftauslaß	20	In Betrieb	> 25	9	< 1
				25 - 6,8	20	< 1
				6,8 - 1,8	2	< 1
				1,8 - 0,4	9	8
				0,4 - 0,1	1	< 1
	Umformpresse	20	In Betrieb	> 25	30	13
				25 - 6,8	10	< 1
				6,8 - 1,8	15	< 1
				1,8 - 0,4	30	2
				0,4 - 0,1	20	6

Tabelle 7.5.a Staubemission der mechanischen Strahlanlage 2

Anlage	Ort der Messung	Dauer der Messung [min]	Status der Anlage	Partikelgröße [µm]	Konzentration [µg/m³]	
					Fe	Zn
1 (Versuchsbetrieb)	Vor Anlage	30	Nicht in Betrieb	> 25	2	2
				25 - 6,8	3	1
				6,8 - 1,8	< 1	1
				1,8 - 0,4	< 1	1
				0,4 - 0,1	7	< 1
	Vor Anlage	20	In Betrieb ohne Chargierung	> 25	6	3
				25 - 6,8	4	1
				6,8 - 1,8	< 1	< 1
				1,8 - 0,4	1	< 1
				0,4 - 0,1	3	1
	Vor Anlage	20	In Betrieb mit Chargierung	> 25	11	4
				25 - 6,8	9	1
				6,8 - 1,8	3	< 1
				1,8 - 0,4	7	2
				0,4 - 0,1	5	2
	Abluftauslaß	30	In Betrieb	> 25	1	< 1
				25 - 6,8	< 1	< 1
6,8 - 1,8				< 1	< 1	
1,8 - 0,4				1	< 1	
0,4 - 0,1				3	1	
3 (Versuchsbetrieb)	Vor Anlage	20	Nicht in Betrieb	> 25	10	1
				25 - 6,8	150	< 1
				6,8 - 1,8	15	< 1
				1,8 - 0,4	10	< 1
				0,4 - 0,1	10	< 1
	Vor Anlage	20	In Betrieb mit stetiger Chargierung	> 25	30	2
				25 - 6,8	8	2
				6,8 - 1,8	15	< 1
				1,8 - 0,4	2	< 1
				0,4 - 0,1	2	15
	Hinter Anlage	20	In Betrieb mit stetiger Chargierung	> 25	35	8
				25 - 6,8	15	6
				6,8 - 1,8	20	< 1
				1,8 - 0,4	3	< 1
				0,4 - 0,1	2	1
	Material-Auslaß	15	In Betrieb mit stetiger Chargierung	> 25	8	2
				25 - 6,8	3	1
6,8 - 1,8				7	2	
1,8 - 0,4				20	3	
0,4 - 0,1				50	9	

Tabelle 7.5.b Staubemission der mechanischen Strahlanlagen 1 und 3

8 Mechanismus der mechanischen Beschichtung

Die Strahlmittelteilchen werden von einem Druckluftstrom oder einem mechanischen Schleuderrad beschleunigt und treffen mit hoher Geschwindigkeit auf die Werkstückoberfläche auf. Das Schalenmaterial wird beim Aufprall plastisch verformt und ein Teil als Beschichtung auf die Werkstückoberfläche aufgetragen. Entscheidenden Einfluß auf die Haftung hat dabei der Oberflächenzustand.

8.1 Rundes Strahlmittel

Beim Aufprall auf die Werkstückoberfläche verlieren die Strahlmittelteilchen einen Teil ihrer Schale (Kapitel 5.3, Bild 5.7). Die kinetische Energie der Strahlmittelteilchen wird in plastische Verformung der Schale umgesetzt. Die Deformation der Schale führt zur Entstehung von Rissen im Bereich der höchsten Scherspannung. Bei senkrechtem Aufprall des Strahlmittels entstehen die höchsten Scherspannungen unter einem Winkel von 45° zur Aufprallrichtung. Im statistischen Mittel sollten bei isotropen Eigenschaften in der Schale des runden Strahlmittels radiale Risse unter einem Winkel von jeweils 45° zur Aufprallrichtung und 90° zueinander auftreten. In der Schale sind jedoch bereits radiale Risse vorhanden. Der Winkel der abgetrennten Schalensegmente ist deshalb meistens etwas kleiner als 90° , die Größe liegt zwischen $50\ \mu\text{m}$ und $200\ \mu\text{m}$ (Kapitel 5.3, Bild 5.7).

In radialer Richtung der Schale weist der Übergang zwischen der Phase δ und den spröden Phasen Γ und Γ_1 nahe dem Stahlkern geringe mechanische Festigkeit auf. Segmente lösen sich daher entlang dieses spröden Bereichs (Kapitel 5.3 Bild 5.7.a). Liegen tangentielle Risse vor, so erfolgt die Abtrennung von Schalenmaterial dort (Kapitel 5.3, Bild 5.7.b).

Die Segmente werden vom auftreffenden Strahlmittelteilchen auf die Werkstückoberfläche gedrückt und stark verformt. Dabei bilden sich Risse und das aufgeschweißte Segment zerbricht in kleinere Stücke mit einer Größe von $10\ \mu\text{m}$ bis $20\ \mu\text{m}$. Ein Teil dieser Stücke haftet als Beschichtung auf der Werkstückoberfläche (Kapitel 6.2, Bild 6.10).

Obwohl neben den durch Abplatzen der Schale entstehenden Stahlkernen noch Bruchstücke des Schichtmaterials vorhanden sind (Kapitel 5.3, Bild 5.8.b), bewirkt der weitere Umlauf keinen Auftrag von Beschichtung. Die kleinen, leichten Bruchstücke werden stärker abgebremst und geraten nur selten zufällig zwischen die Stahlkerne und die Werkstückoberfläche. Die Stahlkerne tragen die Beschichtung stellenweise wieder ab. Bei wiederholtem Umlauf des Strahlmittels nimmt das aufgetragene Schichtgewicht daher ab (Kapitel 6.3.9). In mechanischen Strahlanlagen werden die Stahlkerne durch einen Magnetabscheider abgesondert. Die nicht aufgetragenen Bruchstücke werden bei den Umläufen weiter zerkleinert und als Staub abgesaugt.

Eine Zugabe von Stahlkugeln zum Strahlmittel oder das Strahlen mit einer Mischung aus Stahlkugeln und Zinkpulver als Strahlmittel führen dementsprechend nicht zu einem verstärkten Auftrag von Beschichtungsmaterial (Becker [1965]; Babecki, Haehner [1973]; Kapitel 6.4.5). Der Aufbau des Strahlmittels aus Schale und Kern ist für den Beschichtungsvorgang erforderlich. Erst die Kombination aus der Impulsübertragung der Partikel und dem Abplatzen der Schale führt zur Haftung von Beschichtungsmaterial auf der Werkstückoberfläche.

8.1.1 Haftung auf dem Werkstück und Flächenbedeckung

Bei der mechanischen Beschichtung ergibt sich ein charakteristischer Zusammenhang zwischen Schichtgewicht und Flächenbedeckung (Bilder 8.1 und 8.2). Während das Schichtgewicht ansteigt, erreicht die Flächenbedeckung mit zunehmender Strahlzeit einen Sättigungswert (Kapitel 6.3.3). Die wiederholte Untersuchung einer markierten Stelle der Oberfläche jeweils vor und nach mehreren Beschichtungsvorgängen zeigt, daß bestimmte Bereiche unbeschichtet bleiben (Kapitel 6.3.6). Für dieses Verhalten lassen sich verschiedene Ursachen diskutieren. Neben der möglicherweise nicht vollständigen Überdeckung der Werkstückoberfläche durch Strahlmittelteilchen kommen die unterschiedlich starke Haftung auf weichen und harten Phasen wie Ferrit oder Perlit, Einflüsse der Kristallorientierung sowie lokale Anhäufung von Korrosionsprodukten (Rost, Oxide) in Frage.

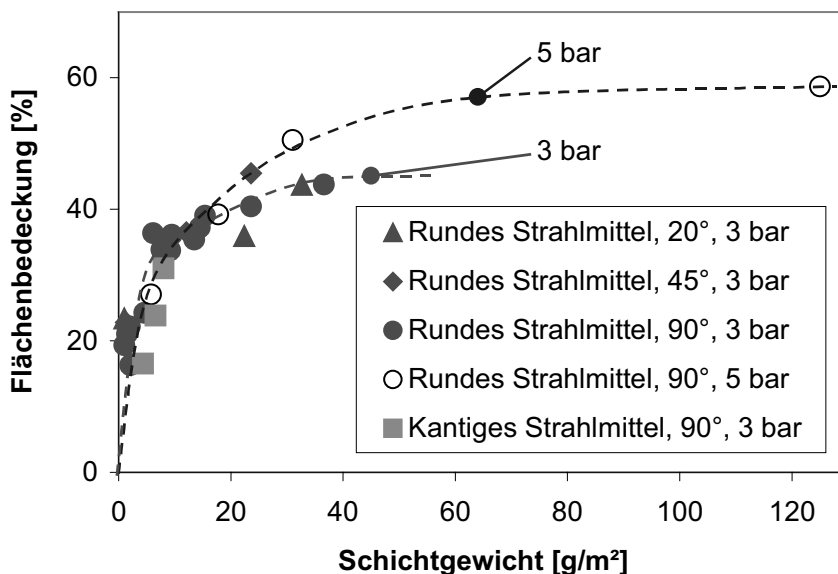


Bild 8.1 Zusammenhang zwischen Schichtgewicht und Flächenbedeckung bei mechanischer Beschichtung in den Druckluft-Strahlversuchen

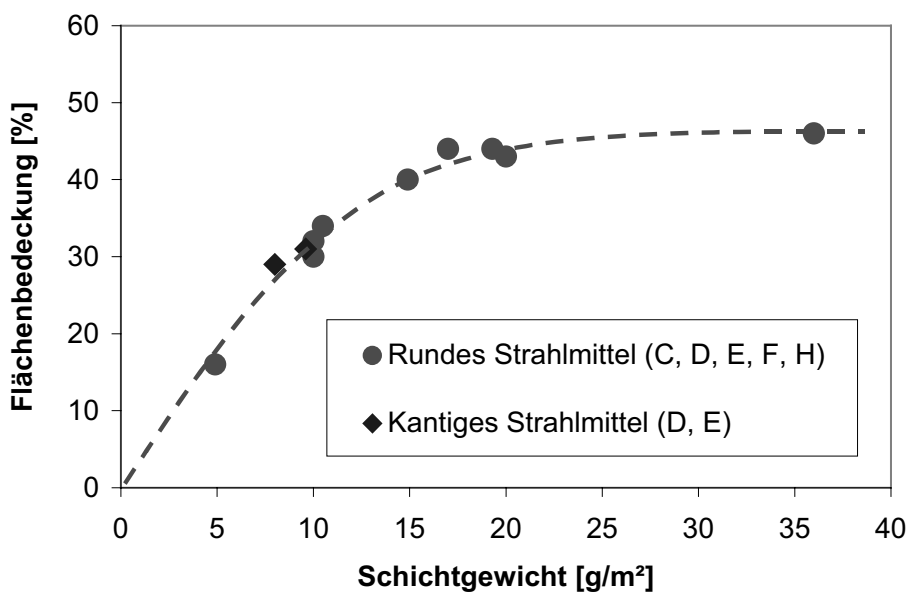


Bild 8.2 Zusammenhang zwischen Schichtgewicht und Flächenbedeckung bei mechanischer Beschichtung in industriellen Strahlanlagen (Proben für die verschiedenen Serien der Spiketests)

Die Überdeckung der Werkstückoberfläche durch Strahlmittelteilchen durch die Druckluft-Strahlpistole ergibt sich aus folgender Abschätzung. In einer Strahlzeit von 120 Sekunden trifft bei einem Durchsatz von 12,5 g/s eine Strahlmittelmenge von 1,5 kg auf die Oberfläche auf. Bei einer spezifischen Teilchenzahl von etwa 700 Teilchen/g entspricht dies einer Gesamtanzahl von etwa 10^6 Teilchen. Die Beschädigungen der Strahlmittelteilchen nach einem Umlauf und die Ausdehnung

des aufgetragenen Beschichtungsmaterials zeigen, daß die Kontaktfläche zwischen Teilchen und Werkstückoberfläche annähernd einem Kreis mit einem Durchmesser von 50 µm und einer Fläche von ungefähr 2000 µm² entspricht. Die gesamte von den Teilchen getroffene Kontaktfläche beträgt damit 2000 mm². Die behandelte Gesamtfläche weist einen Durchmesser von ungefähr 18 mm (Kapitel 3.1) und eine Fläche von 250 mm² auf. Die bestrahlte Fläche wird statistisch also 8 mal von der realen Kontaktfläche überdeckt.

Da der Strahl auf den mittleren Bereich konzentriert ist, liegt die Überdeckung hier noch höher. Die Oberfläche wird in diesem Bereich, an dem auch die Untersuchungen durchgeführt wurden, demnach an jeder Stelle etwa 10 Mal von Strahlmittel getroffen. Die vollständige Aufräuhung von polierten Oberflächen nach dem Strahlvorgang, insbesondere auch in Bereichen, die keine Beschichtung angenommen haben, weist ebenfalls darauf hin, daß alle Stellen mindestens einmal getroffen werden (Kapitel 6.3.2, Bild 6.15 und Kapitel 6.3.6, Bild 6.23). Mangelnde Überdeckung scheidet daher als Ursache für die unvollständige Flächenbedeckung aus.

Die Größe der unbeschichteten Bereiche liegt in der Größenordnung der Korngröße des Werkstücks von etwa 20 µm (Kapitel 6.3.6, Bild 6.23.e). Der Gefügeanteil des Perlits im verwendeten Stahl beträgt ungefähr 15 %, der Flächenanteil der nicht beschichteten Bereiche liegt zwischen 40 % und 55 %. Querschliffe zeigen, daß die Grenzen der beschichteten Bereiche nicht den Phasengrenzen entsprechen. Eine für die Verformung des Perlits nicht ausreichende kinetische Energie der Strahlmittelteilchen und eine Beschichtung ausschließlich der ferritischen Bereiche ist als Ursache für die unvollständige Flächenbedeckung daher ebenfalls auszuschließen. Ein Einfluß unterschiedlicher kristallographischer Orientierung benachbarter Körner auf die Haftung des Beschichtungsmaterials ist zwar denkbar, als Ursache der unvollständigen Flächenbedeckung aber äußerst unwahrscheinlich, weil die Verformungseigenschaften von Ferrit und Perlit keine starke Anisotropie aufweisen.

Als Hauptursache für das Auftreten unbeschichteter Bereiche werden deshalb lokal unterschiedliches Verhalten der Oxidschicht angenommen, die im Kontakt mit der Atmosphäre entsteht und bei der Aufräuhung der Werkstückoberfläche örtlich abgetragen wird. Versuche mit korrodierten Proben zeigen, daß es nicht möglich ist,

alle Korrosionsprodukte mit dem mechanischen Beschichtungsvorgang zu entfernen (Kapitel 6.3.7). Stark oxidierte oder verrostete Oberflächen nehmen kein Beschichtungsmaterial an. Mit höherer kinetischer Energie der Strahlmittelteilchen verschiebt sich der Sättigungswert der Flächenbedeckung zu größeren Werten, da mehr Energie für die Entfernung der Oxidschicht zur Verfügung steht (Kapitel 6.3.5). Auch bei zuvor reinigungsgestrahlten Proben erreicht die Flächenbedeckung der mechanischen Beschichtung keine höheren Sättigungswerte, da die Werkstückoberfläche bei Lagerung an Umgebungsluft spontan oxidiert (Kapitel 6.3.6).

Auf bereits beschichteten Stellen haftet bei weiterem Aufprall von Strahlmittelteilchen zusätzliches Schichtmaterial besser als auf dem Stahl des Werkstücks, weil das vorhandene Schichtmaterial weicher ist (Kapitel 6.3.6, Bild 6.23). Zusätzlich tritt eine Bindung zwischen gleichen Phasen bevorzugt ein (Habig [1968]).

Bis die Flächenbedeckung den Sättigungswert erreicht, steigt das Schichtgewicht linear an, und die Dicke der Beschichtungsinseln wächst. Die Haftung der Beschichtung erfolgt durch ein Reibschweißen. Dafür spricht, daß Verunreinigungen des Strahlmittels oder eine Vorbehandlung der Rohteile mit Graphit oder Molybdändisulfid, die als Schmiermittel bei der Umformung verwendet werden, die Beschichtung verhindern (Kapitel 6.4.5). Die Schmiermittel, die in diesem Fall als Trennmittel wirken, müssen erst durch die mechanische Reinigungswirkung des Strahlvorgangs entfernt werden, bevor eine Beschichtung stattfinden kann. Für den Auftrag von Beschichtungsmaterial ist es daher notwendig, saubere (reinigungsgestahlte) Rohteile zu verwenden.

8.1.2 Einfluß der Härte des Werkstücks

Auf weichen Werkstoffen haftet mechanisch aufgetragenes Beschichtungsmaterial besser als auf harten Werkstoffen. Unter gleichen Strahlbedingungen wird eine höhere Flächenbedeckung erreicht, weil sich die Oberfläche beim Aufprall der Strahlmittelteilchen stärker verformt und vorhandene Oxidschichten von der Werkstückoberfläche abgetragen werden. Bei weicheren Substraten bleiben die mit der Oberfläche verschweißten Segmente der Schalen der Strahlmittelteilchen in

größeren Stücken erhalten. Schichtgewicht und Flächenbedeckung steigen bei Aluminium- und Kupfersubstraten schneller als bei der Beschichtung von Stahl und der Sättigungswert der Flächenbedeckung ist höher (Kapitel 6.3.8, Bild 6.25).

Bei Stahl erfolgt die Beschichtung auf einer reinigungsgestrahnten Werkstückoberfläche langsamer als auf einer polierten, weil die gestrahlte Oberfläche verformungsverfestigt ist (Kapitel 6.3.6, Bild 6.23).

8.1.3 Vergleich des runden und des kantigen Strahlmittels

Die Abtrennung von Segmenten des Schalenmaterials mit einer Größe von 50 μm bis 200 μm ist für die runden Strahlmittelteilchen mit einer massiven Schale typisch, wobei die Anwesenheit der Γ/Γ_1 -Phase am Übergang zum Stahlkern eine wichtige Rolle spielt (Abschnitt 8.1). Bei den kantigen Strahlmittelteilchen erfolgt der Kontakt zwischen Schalenmaterial und Werkstück auf kleiner Fläche, es verschweißen deshalb kleinere Partikel des Beschichtungsmaterials als beim runden Strahlmittel. Beim Aufprall zerbricht die Schale entlang der Phasengrenzen der heterogen aufgebauten Schale (Kapitel 5.3, Bild 5.7). Bei längerer Strahlzeit wirken die polyedrischen Strahlmittelteilchen abrasiv, so daß das Schichtgewicht eine Sättigung erreicht (Kapitel 6.3.2 und 6.4.3).

Bei den runden Strahlmittelteilchen, die ihre Schale zum Teil verloren haben, ist vorstellbar, daß sich während des Fluges der beschädigte Bereich aus der Flugrichtung nach hinten dreht, da die abgerundete Seite der Luft den geringeren Widerstand entgegensetzt und die Drehung den Massenschwerpunkt nach vorn bringt. Deshalb ist die Wahrscheinlichkeit, daß der Aufprall mit einer mit Schalenmaterial bedeckten Stelle erfolgt, so lange hoch, bis die Schale zu mehr als der Hälfte abgetragen ist. Bei den kantigen Strahlmittelteilchen ist dieser Effekt nicht zu erwarten. Die nach dem Abplatzen der Schale zurückbleibenden kantigen Stahlkerne treffen in statistischer Ausrichtung auf die Werkstückoberfläche; schalenfreie Bereiche haben eine stark abrasive Wirkung. Die magnetische Abscheidung der verbrauchten Stahlkerne ist bei kantigem Strahlmittel aufgrund des kleineren Verhältnisses von Schale zu Stahlkern weniger effektiv als beim runden Strahlmittel (Kapitel 5.3).

8.2 Vergleich von Druckluft- und mechanischem Strahlen

Der schnellere Auftrag von Beschichtungsmaterial beim Druckluft-Strahlen ergibt sich aus der höheren Auftreffwahrscheinlichkeit für die Strahlmittelteilchen. Die Aufprallgeschwindigkeiten der Strahlmittelteilchen sind bei beiden Strahlverfahren gleich. Im Folgenden werden die Bedingungen diskutiert, unter denen sich die aus den Druckluft-Strahlversuchen abgeleiteten Ergebnisse und Schlußfolgerungen auf die in mechanischen industriellen Strahlanlagen vorliegenden Verhältnisse übertragen lassen.

8.2.1 Auftreffwahrscheinlichkeit

Gleiche Werte für Flächenbedeckung und Schichtgewicht werden in den Druckluft-Strahlversuchen in kürzerer Strahlzeit als in mechanischen Strahlanlagen erreicht. In den Druckluft-Strahlversuchen wird bei einem Strahlwinkel von 90° eine Fläche A_{DL} von ungefähr 250 mm^2 mit einem Durchsatz $\dot{m}_{DL} = 12,5 \text{ g/s}$ des runden Strahlmittels behandelt. Es ergibt sich ein spezifischer Durchsatz von:

$$\bar{m}_{DL} = \frac{\dot{m}_{DL}}{A_{DL}} = 50 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (8.1)$$

In der mechanischen Strahlanlage (Kapitel 3.1, Anlage 1) wird eine Charge von 100 kg mit einem Durchsatz $\dot{m}_m = 30 \text{ kg/min}$ behandelt. Die bestrahlte Fläche A_m ist unabhängig von Form und Lage der Rohteile (Kapitel 6.4.4) und entspricht dem Querschnitt der Kammer der mechanischen Strahlanlage von ungefähr $0,3 \text{ m}^2$. Es ergibt sich der auf die behandelte Oberfläche bezogene spezifische Durchsatz \bar{m}_m :

$$\bar{m}_m = \frac{\dot{m}_m}{A_m} = 2 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (8.2)$$

Die spezifische Auftreffwahrscheinlichkeit liegt also für das Druckluft-Strahlen ungefähr um den Faktor $\eta_s = \bar{m}_{DL} / \bar{m}_m = 25$ höher als für mechanisches Strahlen. Das Schichtgewicht ist in einer mechanischen Strahlanlage beispielsweise nach einer Strahlzeit von 20 min genauso groß wie beim Druckluft-Strahlen mit einem Strahlwinkel von 90° nach einer Strahlzeit von 45 s (Kapitel 6.3.2, Bild 6.15 und

Kapitel 6.2, Bild 6.10.b). Für Strahlwinkel von 20° entsprechen Flächenbedeckung und Schichtgewicht nach 30 Sekunden den Werten für mechanisch behandelte Teile nach 20 Minuten und mit einem Strahlwinkel von 45° werden die Werte in mechanischen Strahlanlagen in 20 Minuten erreichten nach 30 Sekunden sogar übertroffen (Kapitel 6.3.4).

8.2.2 Aufprallgeschwindigkeit

Bei den Druckluft-Strahlversuchen werden die Strahlmitteilchen von einem Luftstrom mitgerissen. Aus dem Ausströmgesetz nach Bunsen (Hering [1989])

$$v_{aus} = \sqrt{\frac{2(p_{DL} - p_0)}{\rho}} \quad (8.3)$$

läßt sich mit der verallgemeinerten Bernoulli-Gleichung für kompressible Medien

$$\frac{1}{2} v^2 + \int \frac{dp}{\rho} = \text{konstant} \quad (8.4)$$

und der Isentropengleichung

$$pV^\chi = \text{konstant} = \frac{p}{\rho^\chi} \quad \text{mit} \quad \chi = \frac{c_p}{c_p - R} \quad (\text{Isentropenexponent}) \quad (8.5)$$

durch Integration die von Hering [1989] vorgeschlagene Gleichung

$$\frac{1}{2} v^2 + \frac{\chi}{\chi - 1} \cdot \frac{p}{\rho} = \text{konstant} \quad (8.6)$$

ableiten. Das Ausströmen wird als adiabatisch betrachtet, da der Vorgang so schnell erfolgt, daß kein wesentlicher Wärmeübergang aus der Umgebung stattfindet. Die Luft wird vereinfachend als ideales Gas angenommen.

Für das Ausströmen von Druckluft mit dem Druck p_{DL} , der Dichte ρ_{DL} und einer Geschwindigkeit $v_{DL}=0$ aus einem Behälter gegen den Umgebungsdruck p_0 und die Dichte ρ_{Luft} mit der Ausströmgeschwindigkeit v_{aus} gilt:

$$\frac{\chi}{\chi - 1} \cdot \frac{p_{DL}}{\rho_{DL}} = \frac{1}{2} v_{aus}^2 + \frac{\chi}{\chi - 1} \cdot \frac{p_0}{\rho_{Luft}} \quad (8.7)$$

Die Dichte ρ_{DL} der komprimierten Luft ergibt sich aus der Isentropengleichung (8.5)

$$p_0 \cdot V_{Luft}^\chi = \text{konstant} = p_{DL} \cdot V_{DL}^\chi \text{ und } V = \frac{m}{\rho} \quad (8.8)$$

mit $m = \text{konstant}$ zu:

$$\rho_{DL} = \rho_{Luft} \left(\frac{p_{DL}}{p_0} \right)^{\frac{1}{\chi}} \quad (8.9)$$

Aus den Gleichungen (8.7) und (8.9) ergibt sich die Ausströmgeschwindigkeit:

$$v_{aus} = \sqrt{2 \frac{\chi}{\chi - 1} \cdot \frac{p_0}{\rho_{Luft}} \cdot \left[\left(\frac{p_{DL}}{p_0} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} - 1 \right]} \quad (8.10)$$

Für die verwendeten Drücke ergeben sich mit $p_0 = 1 \text{ bar}$, $\rho_{Luft} = 1,29 \text{ kg/m}^3$, $c_p(\text{Luft}) = 1,005 \text{ kJ/kgK}$ und $R(\text{Luft}) = 287 \text{ J/kgK}$ (Kuchling [1991]) die folgenden Ausströmgeschwindigkeiten:

Eingestellter Arbeitsdruck [bar]	Absoluter Arbeitsdruck p_{DL} [bar]	Ausströmgeschwindigkeit v_{aus} [m/s]
3	4	514
5	6	602
6	7	635

Tabelle 8.1 Ausströmgeschwindigkeit von Druckluft

Nach dem Austreten aus der Düse mit dem Durchmesser $d_D = 10 \text{ mm}$ nimmt die Strömungsgeschwindigkeit mit der zurückgelegten Strecke s_{DL} ab. Die Geschwindigkeit in der Strahlmitte v_L beträgt (Beitz [1990]):

$$v_L = \frac{v_{aus} \cdot d_D}{z \cdot s_{DL}} \quad (8.11)$$

Der Faktor z liegt zwischen 0,1 für laminare und 0,3 für turbulente Strömung. Im betrachteten Fall wird $z = 0,3$ für turbulente Strömung mit maximaler Geschwindigkeitsabnahme angenommen.

Die Strahlmittelteilchen werden durch den Strömungswiderstand, den sie dem Luftstrom mit der Strömungsgeschwindigkeit v_{aus} entgegensetzen, beschleunigt. Die Widerstandskraft F_W beträgt abhängig vom Widerstandsbeiwert der kugelförmigen

Strahlmittelteilchen $c_W = 0,4$, der Dichte der Luft $\rho_{Luft} = 1,29 \text{ kg/m}^3$, der Querschnittsfläche A_S der Strahlmittelteilchen mit dem Durchmesser $D_S = 0,7 \text{ mm}$ und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Luftstrom und Teilchen v_b (Kuchling [1991]):

$$F_W = \frac{1}{2} c_W \rho_0 A_S v_b^2 \quad (8.12)$$

mit

$$A_S = \frac{1}{6} \pi D_S^3 \quad (8.13)$$

und

$$v_b = v_{aus} - v_S \quad (8.14)$$

Die Beschleunigung a während des Fluges über die Strecke s_{DL} vom Austritt aus dem Ejektor bis zum Aufprall auf das Werkstück ergibt sich mit der Masse eines Strahlmittelteilchens $M_S = 1,4 \text{ mg}$ zu (Kuchling [1991]):

$$a = F_W / M_S \quad (8.15)$$

Die Geschwindigkeit der Strahlmittelteilchen v_S ergibt sich aus den Gleichungen (8.10) bis (8.15):

$$v_S = \sqrt{2as_{DL}} = \sqrt{\frac{A_S}{M_S} c_W \rho_0 s_{DL} v_b^2}$$

$$v_S = \frac{\sqrt{\frac{A_S c_W \rho_0}{M_S s_{DL}}}}{1 + \sqrt{\frac{A_S}{M_S} c_W \rho_0 s_{DL}}} \cdot \frac{d_D}{m} \cdot v_{aus} \quad (8.16)$$

Mit einem Abstand von der Düse bis zur Probenoberfläche $s_{DL} = 60 \text{ mm}$ ergeben sich die folgenden Aufprallgeschwindigkeiten:

Eingestellter Arbeitsdruck [bar]	Aufprallgeschwindigkeit v_S [m/s]
3	40
5	47
6	50

Tabelle 8.2 *Aufprallgeschwindigkeit der Strahlmittelteilchen beim Druckluft-Strahlen*

Die maximalen Anfangsgeschwindigkeiten v_0 der Strahlmittelteilchen in mechanischen Strahlanlagen ergeben sich aus der Umfangsgeschwindigkeit der Schleuderräder mit einem Durchmesser $D_R = 400$ mm und einer Umdrehungsgeschwindigkeit $N_R = 2000 \text{ min}^{-1}$ beziehungsweise 2900 min^{-1} :

$$v_0 = \pi D_R N_R \quad (8.17)$$

Die Geschwindigkeit der Teilchen verringert sich durch den Luftwiderstand auf dem Weg s_F bis zum Aufprall. Wird dieser Widerstand mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 berechnet und vereinfachend als gleichbleibend angenommen, so ergibt sich die Aufprallgeschwindigkeit v_A aus der Strömungswiderstandskraft nach Gleichung (8.12) als gleichmäßig beschleunigte Bewegung (Kuchling [1991]):

$$v_A = \sqrt{v_0^2 + 2as_F} = \sqrt{v_0^2 - c_w \cdot \rho_{Luft} \cdot s_F \cdot \frac{A_S}{M_S} \cdot v_0^2} \quad (8.18)$$

(Widerstandsbeiwert einer Kugel $c_w = 0,4$; Dichte der Luft $\rho_{Luft} = 1,29 \text{ kg/m}^3$; $s_F = 1$ m; Durchmesser der Teilchen $D_S \approx 0,7$ mm; Masse eines Teilchens $M_S \approx 1,4$ mg)

Die Aufprallgeschwindigkeit der Strahlmittelteilchen in den Druckluft-Strahlversuchen entspricht damit in guter Näherung den Geschwindigkeiten in mechanischen Strahlanlagen (Tabelle 8.3).

Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder N_R [min^{-1}]	Anfangsgeschwindigkeit v_0 [m/s]	Aufprallgeschwindigkeit v_A [m/s]
2000	42	39
2900	61	56

Tabelle 8.3 *Aufprallgeschwindigkeit bei mechanischen Strahlanlagen*

8.2.3 Verformung des Schalenmaterials

Die Aufprallenergie der Strahlmittelteilchen wird in die Verformung der Werkstückoberfläche und das Auseinanderbrechen und, zum größten Teil, die Verformung des Schalenmaterials umgesetzt (Kapitel 8.1). Die kinetische Energie der Strahlmittelteilchen beträgt bei einer Aufprallgeschwindigkeit $v_A = 50$ m/s (Kapitel 8.2.2, Tabelle 8.2):

$$E_A = \frac{1}{2} M_S v_A^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Nm} \quad (8.19)$$

Beim Aufprall wird von der Schale ein Bruchstück in einer Größenordnung von $h_B \times b_B \times l_B = 100 \times 150 \times 150 \mu\text{m}$ abgetrennt. Wird dieses Volumen V_B auf die maximale Dicke der Beschichtungspartikel von $h_S = 20 \mu\text{m}$ verformt, ergibt sich der Umformgrad zu

$$\varphi_B = \ln \frac{h_S}{h_B} = -1,6 \quad (8.20)$$

und mit

$$V_B = h_B b_B l_B,$$

die Umformarbeit (Grüning [1995]):

$$E_U = \frac{1}{\eta_F} V_B k_{fm} \varphi_B = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Nm} \quad (8.21)$$

Der Formänderungswirkungsgrad $\eta_F = 0,6$ berücksichtigt pauschal die durch Reibung auftretenden Verluste (Grüning [1995]). Die mittlere Formänderungsfestigkeit des zinkreichen Schalenmaterials wird als typisch für Zinklegierungen (Meyer-Nolkemper [1978]) zu $k_{fm} = 300 \text{ N/mm}^2$ angenommen.

Die Aufprallenergie reicht aus, um die Bruchstücke des Schalenmaterials der Strahlmittelteilchen vollständig zu verformen und dadurch die Haftung auf der Werkstückoberfläche zu bewirken (Kapitel 8.1.1).

8.3 Kinetik der mechanischen Beschichtung

Im Folgenden werden ausgehend von vereinfachenden Modellbetrachtungen Gleichungen entwickelt, die den Aufbau von Schichtgewicht und Flächenbedeckung bei der mechanischen Beschichtung mit rundem Strahlmittel beschreiben.

8.3.1 Einfluß der Strahlzeit auf die Flächenbedeckung

Die Flächenbedeckung f_B ist von der Strahlzeit t , dem Strahlwinkel α und der kinetischen Energie E_v der Strahlmittelteilchen abhängig. Die Flächenbedeckung f_B ist der Anteil der Fläche A_B , die mit Beschichtungsmaterial bedeckt ist, an der Gesamtfläche A_0 :

$$f_B = A_B / A_0 \quad (8.22)$$

Der Anteil der Fläche A_C , auf den Beschichtungsmaterial aufgetragen werden kann, an der Gesamtfläche A_0 ist der Sättigungswert der Flächenbedeckung F_S :

$$F_S = A_C / A_0 \quad (8.23)$$

Die Geschwindigkeit der Zunahme der beschichteten Fläche dA_B/dt ist proportional zur Größe der noch beschichtbaren Fläche A_U :

$$A_U = A_C - A_B \quad (8.24)$$

$$dA_B/dt = k A_U = k (A_C - A_B) \quad (8.25)$$

Mit den Gleichungen (8.22) und (8.23) ergibt sich:

$$A_0 df_B / dt = k A_0 (F_S - f_B) \quad (8.26)$$

$$df_B / (F_S - f_B) = k dt \quad (8.27)$$

Zur Zeit $t = 0$ ist der Anteil der unbeschichteten Fläche $f_B(t = 0) = 0$. Durch bestimmte Integration folgt aus Gleichung (8.27):

$$\int_0^{f_B} \frac{1}{F_S - f_B} df_B = \int_0^t k dt \quad (8.28)$$

$$-\ln(F_S - f_B) \Big|_{f_B=0}^{f_B} = k t \Big|_0^t \quad (8.29)$$

$$\ln(F_S - f_B) - \ln F_S = -k t \quad (8.30)$$

$$1 - \frac{f_B}{F_S} = e^{-kt} \quad (8.31)$$

$$f_B = F_S (1 - e^{-kt}) \quad (8.32)$$

Mit einem Sättigungswert für die Flächenbedeckung von $F_S = 45\%$ (Strahlwinkel 90° , Beschleunigungsdruck 3 bar) und einem nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate an die Meßwerte für diese Strahlparameter angenäherten Wert für $k = 0,02$ /s ergibt sich der in Bild 8.3 als Strichlinie dargestellte Verlauf. Die berechnete Kurve und die Meßwerte (Bild 8.3) stimmen gut überein.

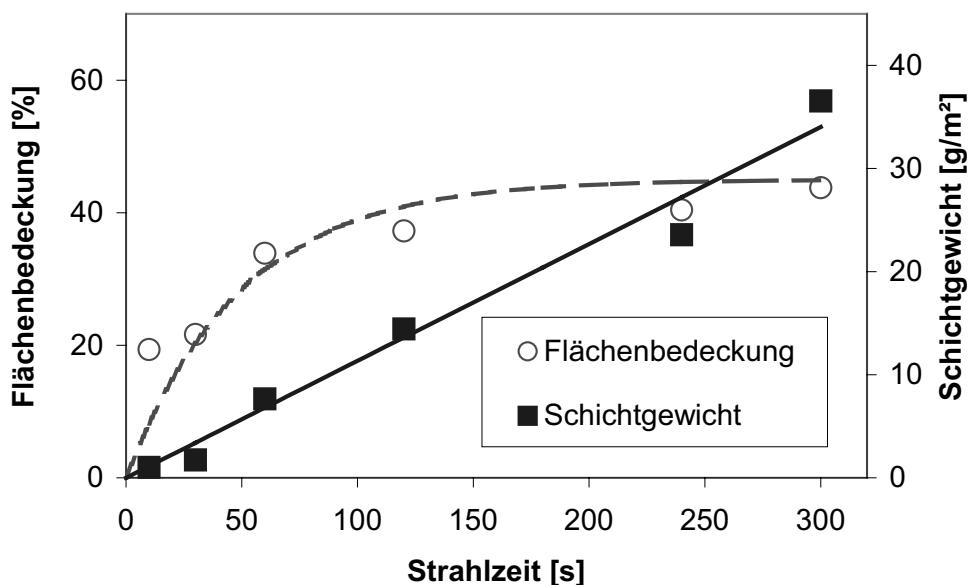


Bild 8.3 *Einfluß der Strahlzeit auf Flächenbedeckung und Schichtgewicht (Vergleich der Ergebnisse der Strahlversuche mit der Rechnung)*

8.3.2 Einfluß des Strahlwinkels auf die Flächenbedeckung

Die Auftraggeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Strahlwinkel (Kapitel 6.3.4, Bild 6.19) ergibt sich aus zwei gegenläufigen Effekten. Mit abnehmendem Einfallswinkel nimmt die Länge des Kontaktweges der Strahlmitteilchen auf der Werkstückoberfläche zu. Gleichzeitig sinkt der auf die Oberfläche wirkende Impulsanteil. Das Zusammenwirken der beiden Effekte ergibt die größte Auftraggeschwindigkeit unter einem Einfallswinkel von 45° .

Die Flächenbedeckung f_B ist von der für das Reibschweißen zur Verfügung stehenden Energie und daher von der auf die Kontaktfläche zwischen Strahlmittelteilchen und Werkstückoberfläche wirkenden Energiedichte abhängig:

$$f_B \sim \frac{E}{A} \quad (8.33)$$

Damit ein Auftrag von Beschichtungsmaterial stattfindet, muß der Quotient aus senkrecht zur Werkstückoberfläche wirkendem Impuls aus dem Energieanteil E_A und der Fläche des Werkstücks A_A , auf die diese Energie wirkt, einen Schwellwert e_0 überschreiten.

$$e_0 = \frac{E_A}{A_A} \quad (8.34)$$

Für den Auftrag von Schalenmaterial ist dagegen der Quotient aus der Energie und der Kontaktfläche des Strahlmittelteilchens entscheidend. Im Gegensatz zur betroffenen Fläche auf dem Werkstück, die vom Strahlwinkel abhängt, ist die betroffene Fläche des Strahlmittelteilchens gleichbleibend, da das Teilchen kugelförmig ist und beim Aufprall abgelenkt wird (Bild 8.4).

$$e_A = \frac{E_A}{A_K} \quad (8.35)$$

Ein Auftrag findet statt, wenn dieser Wert den Schwellwert e_0 überschreitet und die Energiedichte für das Verschweißen ausreicht (Kapitel 8.1.1):

$$f_B = k_\alpha e_A - k_0 e_0 = k_\alpha \frac{E_A}{A_K} - k_0 \frac{E_A}{A_A} \quad (8.36)$$

Der Strahlwinkel bestimmt die Größe der auf der Werkstückoberfläche betroffenen Fläche A_A und die Größe des Anteils der kinetischen Energie, die auf die Oberfläche einwirkt und zur Haftung führt. Bei einem Strahlwinkel $\alpha = 90^\circ$ berühren die Strahlmittelteilchen die Werkstückoberfläche auf einer Fläche des Durchmessers D_A (Bild 8.4). Bei kleineren Strahlwinkeln wird die Länge l_A größer und die betroffene Fläche wächst:

$$l_A = \frac{D_A}{\sin \alpha} \quad (8.37)$$

$$A_A = \pi \frac{l_A}{2} \frac{D_A}{2} = \frac{\pi D_A^2}{4 \sin \alpha} \quad (8.38)$$

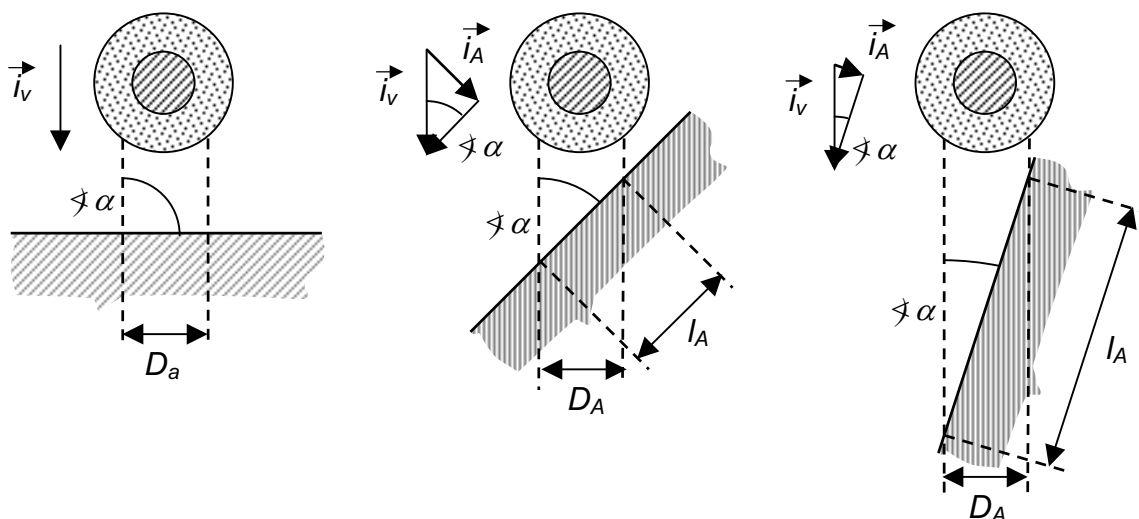
Die betroffene Fläche der Strahlmittelteilchen beträgt:

$$A_K = \frac{\pi}{4} D_A^2 \quad (8.39)$$

Die aus der kinetischen Gesamtenergie E_v der Strahlmittelteilchen resultierende Aufprallenergie E_B , die zum Haften des Beschichtungsmaterials beiträgt, ergibt sich aus dem Impuls i der Strahlmittelteilchen. Die Aufprallenergie wird in Verformung des Schalenmaterials umgesetzt (Kapitel 8.2.3) und der Aufprall kann daher als unelastisch betrachtet werden.

$$i_A = i_v \sin \alpha \quad (8.40)$$

$$E_B = E_v \sin \alpha \quad (8.41)$$



1.1 $\alpha = 90^\circ$

1.2 $\alpha = 45^\circ$

1.3 $\alpha = 20^\circ$

Bild 8.4 Einfluss des Strahlwinkels α auf Kontaktfläche und Aufprallenergie

Mit Gleichung (8.36) ergibt sich:

$$f_B = k_S \frac{E_A}{A_K} - k_A \frac{E_A}{A_A} = \frac{4E_v}{\pi D_S^2} (k_S \sin \alpha - k_A \sin^2 \alpha) \quad (8.42)$$

Mit den Werten aus Tabelle 8.4 ergibt sich der in Bild 8.5 dargestellte Verlauf. Die Variablen wurden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an die Meßwerte

angenähert. Bei kurzen Strahlzeiten haben sich noch keine stabilen Verhältnisse eingestellt. Mit steigender Strahlzeit streben die Variablen gleichbleibenden Werten zu.

Durchmesser der Strahlmittelteilchen (Kapitel 5.2)	D_S	0,7 mm		
Masse der Strahlmittelteilchen (Kapitel 5.2)	M_S	1,4 mg		
Aufprallgeschwindigkeit (Kapitel 8.2.2)	v_S (3bar)	40 m/s		
Strahlzeit	t_S	10 s	30 s	60 s
Variablen	k_S [m/N]	0,031	0,053	0,055
	k_A [m/N]	0,025	0,044	0,044

Tabelle 8.4 Werte für die Berechnung der Flächenbedeckung in Abhängigkeit vom Strahlwinkel

Die Werkstückoberfläche kann lokal als eben und unter dem Strahlwinkel zur Bewegungsrichtung der Strahlmittelteilchen geneigt betrachtet werden. Aufgrund der zylindrischen Form der Rohteile liegen alle Strahlwinkel von 0° bis 90° vor. Bei der vorherrschenden ebenen Lage der Rohteile entspricht der Auftrag in der mechanischen Strahlanlage einem Auftrag im Druckluft-Strahlversuch bei einem mittleren Winkel von 33° .

Mit dieser Rechnung wird der Einfluß des Strahlwinkels auf die Flächenbedeckung ausgehend von einfachen Ansätzen zutreffend beschrieben.

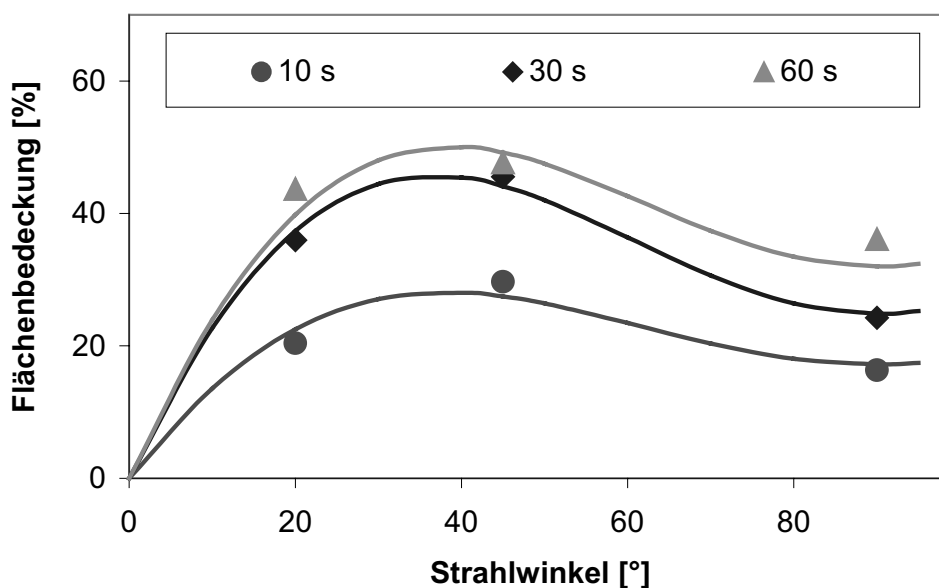


Bild 8.5 Einfluß des Strahlwinkels auf die Flächenbedeckung (Vergleich der Ergebnisse der Strahlversuche mit der Rechnung)

8.3.3 Einfluß der kinetischen Energie auf die Flächenbedeckung

Mit höherer Geschwindigkeit aufprallendes Strahlmittel kann an zusätzlichen Bereichen eine Haftung herbeiführen und bewirkt dadurch einen höheren Sättigungswert der Flächenbedeckung sowie einen schnelleren Anstieg des Schichtgewichts (Bild 8.6). Der Anstieg des Schichtgewichtes mit dem Durchsatz an Strahlmittel verläuft linear. Bei höherer Geschwindigkeit wird von jedem Strahlmittelteilchen im Durchschnitt eine größere Menge an Beschichtungsmaterial aufgetragen.

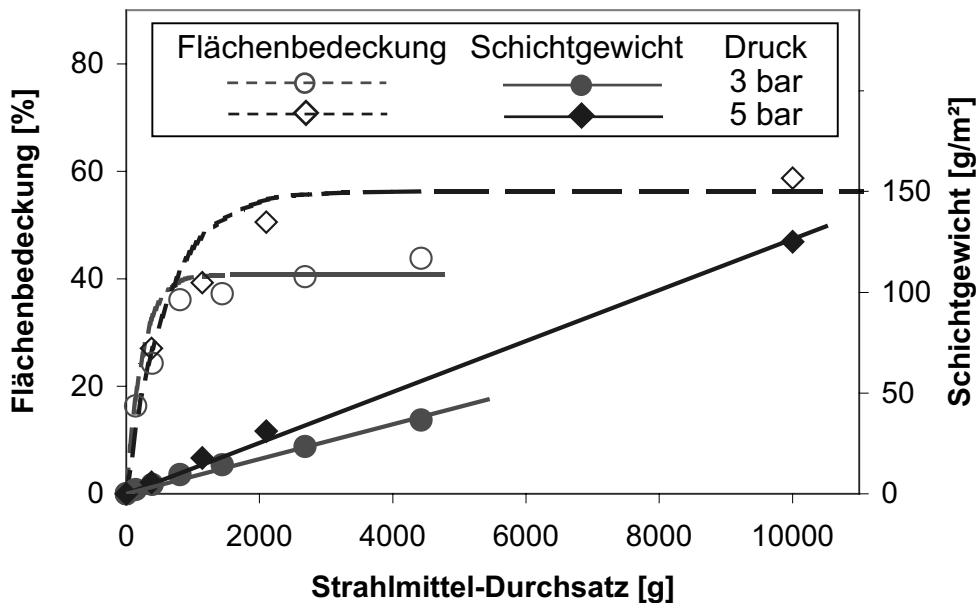


Bild 8.6 *Einfluß der kinetischen Energie der Strahlmittelteilchen auf Flächenbedeckung und Schichtgewicht (Meßwerte und errechnete Kurven)*

Nach Gleichung (8.33) ist der Sättigungswert der Flächenbedeckung F_S bei gleichbleibendem Strahlwinkel nur von der kinetischen Aufprallenergie E_A der Strahlmittelteilchen abhängig:

$$F_S \sim E_A \quad (8.43)$$

Für einen Strahlwinkel von 90° läßt sich die Beziehung auf die Aufprallgeschwindigkeit v_S reduzieren:

$$F_S = k'_v E_A = \frac{1}{2} k'_v M_S v_S^2 = k_v v_S^2 \quad (8.44)$$

Bei Drücken von 3 bar und 5 bar liegen die Aufprallgeschwindigkeiten bei 40 m/s beziehungsweise 47 m/s (Kapitel 8.2.2). Aus den ermittelten Sättigungswerten der Flächenbedeckung ergibt sich:

$$k_v = 0,028 \text{ s}^2/\text{m}^2$$

und

$$F_S [\%] = 0,028 v_S^2 \quad (8.45)$$

Bild 8.7 zeigt diese Beziehung zwischen Geschwindigkeit der Strahlmittelteilchen und Flächenbedeckung. Mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 60 m/s wäre damit für Stahl eine vollständige Flächenbedeckung zu erwarten.

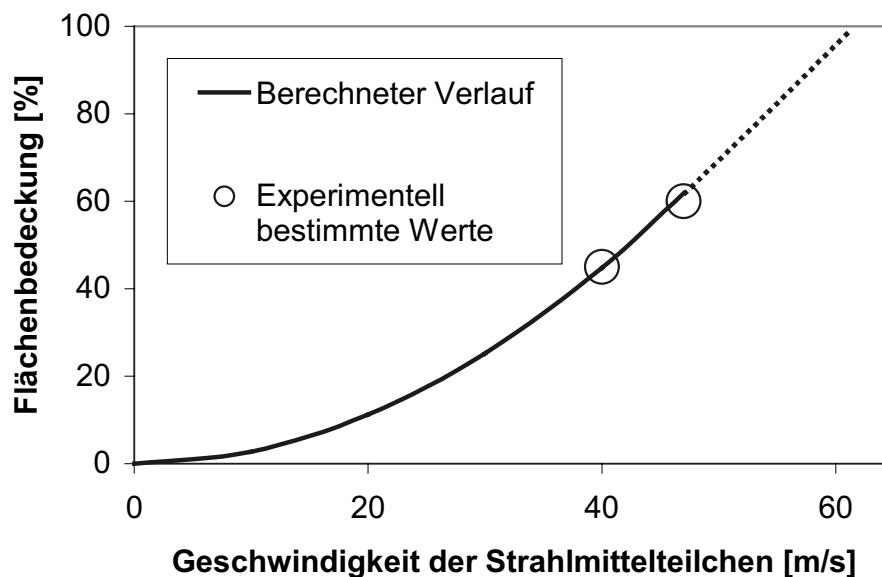


Bild 8.7 *Einfluß der Geschwindigkeit der Strahlmittelteilchen auf den Sättigungswert der Flächenbedeckung bei der Beschichtung von Stahl*

8.3.4 Einfluß der Strahlparameter auf das Schichtgewicht

Das Schichtgewicht m_S wird von der Anzahl der auftreffenden Teilchen, dem Strahlwinkel und der Geschwindigkeit der Strahlmittelteilchen bestimmt (Kapitel 6.3.4 und 8.3.3). Die Anzahl N_A der auf die Fläche A_{DL} auftreffenden Teilchen ergibt sich aus dem Durchsatz an Strahlmittel \dot{m} in Abhängigkeit vom Luftdruck p_{DL} , der spezifischen Menge an Teilchen N_M und der Strahlzeit t :

$$N_A = \frac{N_M}{A_{DL}} \dot{m} t \quad (8.46)$$

Jedes an einer geeigneten Stelle, also im Teil F_S , auf die Werkstückoberfläche treffende Strahlmittelteilchen trägt im Mittel Beschichtungsmaterial (Dichte ρ_S) der Menge M_A auf. Der Vergleich der Größe der von der Schale abgetrennten Segmente mit der Größe der auf beschichteten Oberflächen vorhandenen Inseln zeigt, daß die Bruchstücke nur zu einem Teil aufgetragen werden (Kapitel 5.3 und 6.2). Der mittlere Anteil η_A ist von der Geschwindigkeit der Strahlmittelteilchen und dem Strahlwinkel abhängig (Kapitel 8.3.3).

$$M_A = \eta_A \cdot M_B = \eta_A \cdot h_B \cdot b_B \cdot l_B \cdot \rho_S \quad (8.47)$$

Für das Schichtgewicht m_S ergibt sich mit den Werten aus Tabelle 8.5 die in den Ergebnissen der Beschichtungsversuche (Kapitel 6.3 und 6.4) festgestellte lineare Abhängigkeit von der Strahlzeit (Bild 8.6):

$$m_S = \eta_A \frac{N_S}{A_{DL}} \dot{m} M_B F_S t \quad (8.48)$$

Luftdruck p_{DL}	3 bar			5 bar
	Strahlwinkel α	20°	45°	90°
$\eta_A [10^{-3}]$	2,3	2,7	0,6	2,6
\dot{m} (Kapitel 6.3.2)	13 g/s			33 g/s
F_S (Kapitel 6.3.5)	35 %			60 %
A_{DL} (Kapitel 8.2.1)	250 mm ²			
N (Kapitel 5.2)	700 /g			
h_B (Kapitel 5.2)	100 µm			
b_B (Kapitel 5.2)	150 µm			
l_B (Kapitel 5.2)	150 µm			
ρ_S (Kapitel 5.2)	7,2 g/cm ³			

Tabelle 8.5 Werte für die Berechnung des Schichtgewichtes

8.3.5 Einfluß der Strahlparameter auf die Flächenbedeckung

Aus den Gleichungen (8.33), (8.43) und (8.46) ergibt sich folgende Beschreibung der Flächenbedeckung in Abhängigkeit von den Strahlparametern:

$$f_B(v_S, \alpha, t) = \frac{2M_S v_S^2}{\pi D_S^2} (k_S \sin \alpha - k_A \sin^2 \alpha) \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (8.49)$$

Durchmesser der Strahlmittelteilchen (Kapitel 5.2)	D_S	0,7 mm
Masse der Strahlmittelteilchen (Kapitel 5.2)	M_S	1,4 mg
Aufprallgeschwindigkeit (Kapitel 8.2.2)	v_S (3 bar)	40 m/s
	v_S (5 bar)	47 m/s
Variablen (Kapitel 8.3.1) (Kapitel 8.3.2, Wert für längere Strahlzeit) (Kapitel 8.3.2, Wert für längere Strahlzeit)	k [s^{-1}]	0,056
	k_S [m/N]	0,060
	k_A [m/N]	0,046

Tabelle 8.6 Werte für die Berechnung der Flächenbedeckung

k , k_S und k_A sind aus den Versuchsergebnissen für einen bestimmten Strahlmitteltyp und ein bestimmtes Substrat ermittelte Konstanten. Unter Berücksichtigung der Vereinfachungen ergibt sich mit den Werten aus Tabelle 8.6 für alle Versuchsreihen eine gute Übereinstimmung der Gleichung mit den Ergebnissen der Versuche (Bild 8.8).

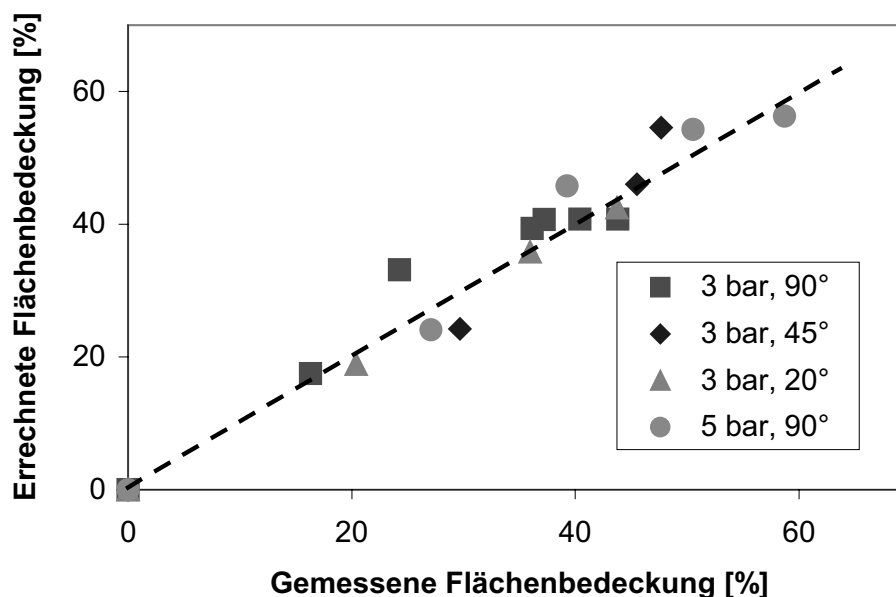


Bild 8.8 Vergleich der Ergebnisse für die Flächenbedeckung in Versuch und Rechnung

9 Wirkung der Beschichtung bei der Umformung

Die Wirkung der verschiedenen Beschichtungen bei der Umformung kann auf eine Reduktion der Flächenpressungen und der Reibung zurückgeführt werden. Das Verschweißen von Werkstück und Werkzeug wird verhindert, wenn die Beschichtung das Verbleiben der Schmiermittel an den belasteten Stellen bewirkt. Die Flächenpressung wird bei Entstehung einer größeren Kontaktfläche durch Verformung der Beschichtung verringert. Eine vollständige Trennung der Festkörperoberflächen durch Schmiermittel ist bei den hohen Flächenpressungen nicht möglich, es liegt immer Mischreibung vor. Eine Beschichtung muß eine geringe Verschweißneigung mit dem Werkzeug besitzen.

9.1 Phosphatierte Rohteile

Eine Phosphatierung der Rohteile verhindert das Verschweißen und bewirkt geringe Umformkräfte. Die Werkstückoberfläche ist gleichmäßig von der Phosphatschicht bedeckt (Kapitel 6.1.1). Bei der Umformung wird die Schicht verformt und durch die Ausbildung einer großen Kontaktfläche die Flächenpressung vermindert (Kapitel 6.1.1, Bild 6.5). Die geringe Scherfestigkeit der Phosphatschicht vermindert die Reibung. Die Schicht geht keine Bindung mit der Werkzeugoberfläche ein. Sie bleibt an die Werkstückoberfläche gebunden und wird bei der Umformung mit dieser größer (Kapitel 6.1.2, Bild 6.8). Bei starker Oberflächenvergrößerung reißt die Beschichtung auf. Die Oberfläche des Werkstücks ist durch die Umformung über der Werkzeugoberfläche geglättet und die Oberflächen berühren sich mit großer Kontaktfläche. Die Flächenpressung verteilt sich auf großer Fläche und es entstehen keine lokalen Extremwerte, die zu einem Verschweißen führen könnten.

Durch zusätzliches Schmiermittel wird die Reibung weiter verringert (Kapitel 7.1.3). Seife als Schmiermittel wird an eine Phosphatschicht chemisch angelagert und ist gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt (Kapitel 6.1), so daß die Beschichtung auch unter hohen Flächenpressungen ein Verschweißen zuverlässig verhindert und die Umformkraft gering bleibt (Kapitel 7.1). Eine vergleichbare Wirkung können nicht fest an die Oberfläche gebundene Schmiermittel nicht erreichen.

9.2 Unbeschichtete Rohteile mit Schmiermittel

Schmiermittel verringern auch bei unbeschichteten Rohteilen die Umformkräfte, können aber allein ein Verschweißen nicht zuverlässig verhindern. Schmiermittel mit hoher Beständigkeit bei großen Flächenpressungen sind Graphit oder Molybdändisulfid; Graphit ist kostengünstig und belastet die Umwelt nicht. Graphit und Molybdändisulfid aus wässriger Suspension haften beim Abfließen des Wassers auf der Oberfläche auch ohne chemische Bindung. Auf Rohteilen mit geringer Oberflächenrauheit bleibt Schmiermittel nur an den Stellen zurück, an denen das Wasser langsam abgelaufen ist. Auf reinigungsgestrahlten Oberflächen verbleibt das Schmiermittel in Vertiefungen der Oberfläche. Die Verteilung ist dann aber ungleichmäßig (Kapitel 7.1).

Bei der Umformung werden die Rauheitsspitzen der Werkstückoberfläche eingeebnet. Die Flächenpressung erreicht an diesen realen Kontaktstellen hohe Werte und es kann zu Verschweißen mit dem Werkzeug kommen. Schmiermittel, das sich in seitlich abgeschlossenen Vertiefungen befindetet, kann nicht ausweichen und überträgt einen Teil der Flächenpressung. Bei Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück wird das Schmiermittel zwischen den Oberflächen verteilt und vermindert die Reibung. Die Umformkraft ist niedriger als für unbeschichtete Rohteile (Kapitel 7.1.3).

9.3 Mechanisch beschichtete Rohteile

Die mechanische Beschichtung der Rohteile vermindert ähnlich wie eine Phosphatschicht die Verschleißneigung und die Umformkräfte. Beim Umformvorgang berühren zunächst mit Beschichtungsmaterial bedeckte Stellen der Werkstückoberfläche das Werkzeug. Das Beschichtungsmaterial ist weicher als Werkzeug und Werkstück und wird bei Oberflächenvergrößerung der Werkstückoberfläche auf dieser verteilt (Kapitel 7.1.4). Bei der Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug haftet das Beschichtungsmaterial fest am Werkstück. Es folgt der Oberflächenvergrößerung des Werkstücks und die Schichtdicke nimmt ab (Kapitel 7.1.4). Aufgrund des inselartigen Charakters kann die Beschichtung den Kontakt des Werkstücks mit dem Werkzeug zwar nicht vollständig verhindern, die Verteilung der Flächenpressung auf größerer realer Kontaktfläche vermindert jedoch die Gefahr des Verschleißens entscheidend. Die Verschleißneigung des Beschichtungswerkstoff mit dem harten Werkzeug ist gering (Kapitel 2.5). Das kantige Strahlmittel hinterläßt auf der Werkstückoberfläche kleinere Bruchstücke des Beschichtungsmaterials mit höherer Härte, die weniger reibungsmindernd wirken (Kapitel 7.1.5).

Die Forderungen nach guter Haftung des Beschichtungsmaterials auf dem Stahl des Werkstücks und gleichzeitig geringer Haftungsneigung auf dem Stahl des Werkzeugs sind gegenläufig. Eine gute Haftung auf dem Werkstück mit vollständiger Flächenbedeckung wird nur durch galvanisches Verzinken erreicht. Galvanisch aufgebraute Beschichtungen zeigen kein Verschleiß, bewirken aber hohe Reibung und stellen in Bezug auf Umweltbeeinflussung und Kosten keine Verbesserung gegenüber der Phosphatierung dar. Auf galvanische Beschichtungen aufgetragene Schmiermittel sind ungleichmäßig verteilt und verbessern die Schmierwirkung nur wenig (Kapitel 7.1.7). Auch die mechanische Beschichtung ist allein kein vollwertiger Ersatz für die Phosphatierung, sie eignet sich aber gut als Trägerschicht für Schmiermittel.

9.4 Mechanisch beschichtete Rohteile mit Schmiermittel

Ein Auftrag von Graphit oder Molybdändisulfid aus wässriger Suspension erzeugt auf mechanisch beschichteten Oberflächen eine größere Schmiermittelmenge und gleichmäßigere Verteilung als auf reinigungsgestrahlten Oberflächen. Das Beschichtungsmaterial verursacht eine größere Rauheit mit Vertiefungen und Kanten (Kapitel 6.4.6), an denen die Schmiermittelteilchen hängen bleiben. Feindisperser Graphit ist gleichmäßiger verteilt als grobe Graphitteilchen (Kapitel 7.1.10). Für die Anlagerung von Schmierstoff ist damit die Flächenbedeckung und weniger das Schichtgewicht der mechanischen Beschichtung entscheidend. Eine Flächenbedeckung von 50 % weist die besten Bedingungen für die Anlagerung von Schmierstoff auf (Kapitel 7.1.6). Eine vollständige Flächenbedeckung mit geringerer Rauheit ist im Interesse einer möglichst hohen Anzahl an Vertiefungen zur Schmierstoffaufnahme sogar nachteilig (Kapitel 7.1.7).

Mechanische Beschichtung der Rohteile und Auftrag von Schmiermittel verhindert ein Verschweißen und bewirkt geringe Reibung mit niedrigen Umformkräften. Aufgrund der höheren Rauheit bilden beschichtete Oberflächen im Kontakt mit dem Werkzeug mehr geschlossene Schmierstofftaschen, aus denen das Schmiermittel seitlich nicht ausweichen kann, als unbeschichtete Oberflächen. Das Beschichtungsmaterial wird bei der Umformung stark verformt, ohne daß es zu einem Verschweißen kommt. Die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug ebnet die Rauheit ein und verteilt das Schmiermittel auf der Oberfläche (Kapitel 7.3.5).

Auf das Werkzeug als Gesenkschmiermittel aufgetragener Graphit wirkt in noch stärkerem Maße reibungsmindernd (Kapitel 7.1.11). Bei beschichteten Werkstücken wird das Schmiermittel während der Umformung in die Fläche des Werkstücks, die das Werkzeug berührt, eingezogen und der Schmierfilm bei der stattfindenden Oberflächenvergrößerung dünner. Die Beschichtung des Werkzeugs stellt zusätzliches Schmiermittel zur Verfügung. Die Kombination der mechanischen Beschichtung mit Graphit als Gesenkschmiermittel ist unter den in dieser Arbeit untersuchten Bedingungen der Behandlung mit Phosphat und Seife deutlich überlegen.

9.5 Beurteilung des Spiketests

Der Spiketest ist als Modellversuch für die Reibungsbedingungen bei der Kaltmassivumformung gut geeignet. Verschiedene Beschichtungen der Rohteile bewirken deutliche Unterschiede in der Spikehöhe. Der Zusammenhang zwischen Spikehöhe und Umformkraft weist bei allen Versuchen einen charakteristischen fallenden Verlauf auf. Eine von der Volumenkonstanz ausgehende Betrachtung beschreibt die Beziehung rechnerisch. Die gemessenen Umformkräfte stimmen gut mit den Ergebnissen des physikalischen Modells überein. Eine von den Umformkräften ausgehende Abschätzung ergibt Reibungskoeffizienten, wie sie nach den Angaben in der Literatur typisch für die Kaltmassivumformung von Stahl sind.

9.5.1 Zusammenhang von Spikehöhe und Umformkraft

Eine Umformung des Werkstoffes findet statt, wenn die Spannung im Werkstoff σ die Formänderungsfestigkeit k_f überschreitet. Die Spannung entsteht durch die Kraft F , die der Stempel auf die waagerechte Querschnittsfläche A des Werkstücks ausübt.

$$\sigma = \frac{F}{A} = k_f \quad (9.1)$$

Die Umformkraft läßt sich also aus der Formänderungsfestigkeit, die vom Werkstoff und dem Umformgrad abhängt, und der Querschnittsfläche berechnen. Die Formänderungsfestigkeit steigt aufgrund der Verfestigung mit fortschreitender Umformung. Der Wert, der nach einer bestimmten Umformung erreicht wird, läßt sich mit Hilfe des Umformgrades aus der Fließkurve ablesen. Im Falle des Spiketests laufen zwei Verformungsarten ab. Der Spike wird durch ein Vorwärtsfließpressen gebildet. Aus den Durchmessern $D_0 = 25 \text{ mm}$; $D_1 = 12,5 \text{ mm}$ ergibt sich ein Umformgrad:

$$\varphi_D = \ln \frac{A_{D_0}}{A_{D_1}} = 1,39 . \quad (9.2)$$

Gleichzeitig fließt der Werkstoff in die Breite und bildet den Teller. Der Umformgrad für dieses Querfließen ergibt sich aus den Höhen $H_0 = 30 \text{ mm}$; $h_1 = 6,4 \text{ mm}$ zu:

$$\varphi_H = \ln \frac{h_0}{h_1} = 1,55 \quad (9.3)$$

Dabei wurde mit $h_1 = 6,4$ mm der kleinste einstellbare Spalt zwischen Stempel und Matrize angenommen. Die höhere Formänderungsfestigkeit resultiert also aus dem Querfließen. Aus der Fließkurve für den verwendeten Stahl C 15 läßt sich die maximale Formänderungsfestigkeit $k_f \approx 770$ N/mm² bestimmen (Lange, Hoang-Vu [1980], Meyer-Nolkemper [1978]).

Auch die waagerechte Querschnittsfläche wächst mit fortschreitender Umformung, so daß die maximale Kraft in der letzten Phase des Umformvorgangs auftritt.

Zur Vereinfachung wird angenommen, daß der Werkstoff sich nach unten auf der Matrize abstützt (Bild 9.2). Der oberhalb des Spikes befindliche Teil nimmt keine Kräfte auf. Die Querschnittsfläche beträgt also:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D_T^2 - D_1^2) \quad (9.4)$$

Der Durchmesser D_1 ist durch das Werkzeug zu $D_1 = 12,5$ mm bestimmt. Der Durchmesser D_T ergibt sich nach der Volumenkonstanz aus dem Volumen des Spike-Rohteils (Bild 9.1) vor der Umformung und dem Volumen des Fertigteils (Bild 9.3). Das Volumen vor der Umformung beträgt:

$$H_2 = H_0 - H_1 = H_0 - \frac{D_0 - D_P}{2} \tan \gamma = H_0 - 1,1 \text{ mm}$$

$$V_0 = \frac{\pi}{4} D_0^2 H_2 + \frac{\pi}{24} \cdot (D_0 - D_1) \cdot \tan \gamma \cdot (D_0^2 + D_0 D_1 + D_1^2) = 14,5 \text{ cm}^3 \quad (9.5)$$

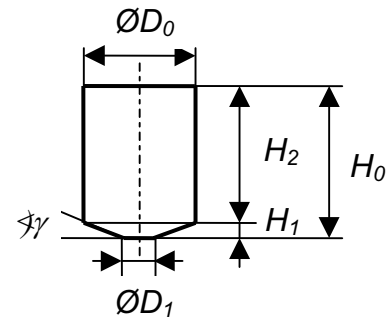


Bild 9.1 *Rohteil*

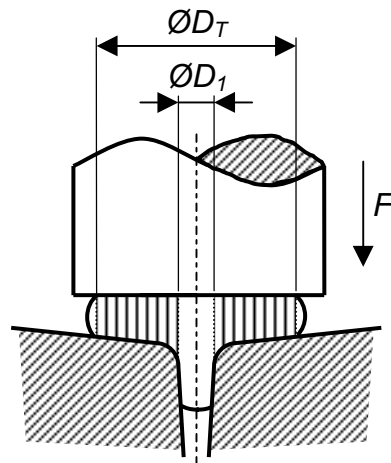


Bild 9.2 *Kraftfluß im umgeformten Spike*

Bei niedriger Reibung fließt mehr Werkstoff in den Spike und vergrößert dessen Höhe h_P , bei hoher Reibung bleibt das Material im Teller und vergrößert dessen Durchmesser D_T . Das Volumen des Spikes V_P beträgt:

$$V_P = \frac{\pi \cdot h_P}{12} [D_1^2 + D_1 \cdot D_P + D_P^2] \quad (9.6)$$

Die Rundung an der Spikespitze kann dabei unberücksichtigt bleiben, da sich ihre Form und damit ihr Volumen mit zunehmender Spikehöhe nur unwesentlich ändert.

Mit einem Konuswinkel $\beta = 3^\circ$ kann folgende weitere Vereinfachung vorgenommen werden:

$$D_P = D_1 - 2h_P \tan \beta \approx D_1 \quad (9.7)$$

$$V_P \approx \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot h_P \quad (9.8)$$

Das Volumen des Materials, das den Radius zum Spike hin ausfüllt, beträgt:

$$V_R = \frac{\pi}{24} h_R [D_1^2 + D_\gamma^2 + D_G^2] \quad (9.9)$$

mit
$$D_G = D_1 + 2R_M - 2\sqrt{R_M^2 - \frac{h_R^2}{4}} \quad (9.10)$$

und
$$h_R = R_M \cdot \cos \gamma \quad (9.11)$$

sowie
$$D_\gamma = D_1 + 2 \cdot R_M \cdot (1 - \sin \gamma) \quad (9.12)$$

Die Variablen $D_1 = 12,5 \text{ mm}$, $R_M = 5 \text{ mm}$ und $\gamma = 10^\circ$ sind durch die Geometrie des Werkzeugs festgelegt.

Das Volumen des anschließenden Kegelstumpfes und des Tellers ergibt sich in Abhängigkeit vom Durchmesser des Tellers D_T . Zur Vereinfachung wird das Volumen einer Scheibe mit dem Durchmesser D_T und eine mittlere Höhe h_A berechnet. Liegt die Höhe in der Mitte der beiden Durchmesser D_T und D_γ , so entspricht das Volumen dieser Scheibe dem von Kegelstumpf und Teller. Die Ausbauchung des Außenrandes bleibt unberücksichtigt:

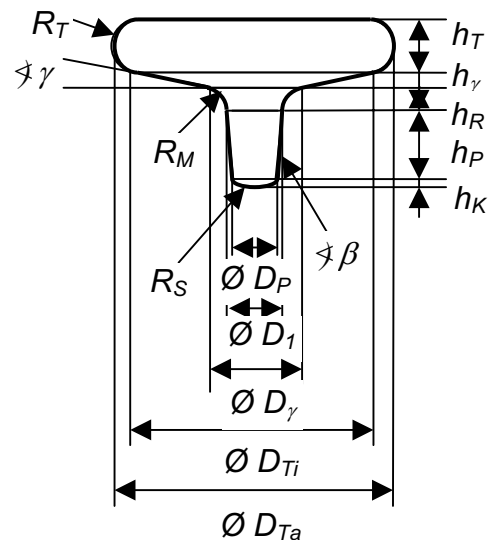


Bild 9.3 Umgeformter Spike

$$h_A = h_T + \frac{1}{4} \tan \gamma (2D_M - D_1 - D_T) \quad (9.13)$$

$$V_A = \frac{\pi}{4} h_A D_T^2 = \frac{\pi}{4} h_T D_T^2 + \frac{\pi}{8} D_M D_T^2 \tan \gamma - \frac{\pi}{16} D_1 D_T^2 \tan \gamma - \frac{\pi}{16} D_T^3 \tan \gamma \quad (9.14)$$

Die Summe aller Teilvolumina des Fertigteils ist konstant und gleich dem Volumen des Rohteils:

$$V_A + V_R + V_P = V_0 \quad (9.15)$$

Der Durchmesser des Tellers liegt immer in der Größenordnung von 43 mm. Alle mittleren Höhen h_A liegen bei 9,3 mm. Werden geringe Variationen der Abmaße vernachlässigt, so ergibt sich:

$$\frac{\pi}{4} h_A D_T^2 + V_R + \frac{\pi}{4} h_P D_1^2 = V_0 \quad (9.16)$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4V_0 - 4V_R - \pi h_P D_1^2}{\pi h_A}} \quad (9.17)$$

Mit Gleichung (9.1) und (9.4) ergibt sich:

$$F = k_f A_T = \frac{4V_0 - 4V_R - h_A D_1^2 - \pi h_P D_1^2}{4h_A} k_f \quad (9.18)$$

Mit $D_1 = 12,5$ mm, $h_A = 9,3$ mm, $k_f = 770$ N/mm² und Werten für h_P von 6 mm bis 8 mm ergeben sich Umformkräfte zwischen 1,08 MN und 1,05 MN. Um absolute Werte für die Spikehöhe zu erhalten, muß zu h_P noch eine im betrachteten Fall konstante Höhe von 15,24 mm addiert werden, die sich aus der Geometrie von Werkzeug und Pressenspalt ergibt.

Die Ergebnisse dieser Abschätzung stimmen gut mit den gemessenen Kräften, die in der Größenordnung von 1,1 MN liegen (Kapitel 7.1), überein. Die einfache Abschätzung der Preßkraft liefert nur für eine Serie der Spiketests den charakteristischen Verlauf der mit steigender Spikehöhe sinkenden Umformkraft (Bild 9.4). Die Preßkräfte der anderen Serien liegen aufgrund von unterschiedlichen Chargen des Probenwerkstoffs deutlich höher.

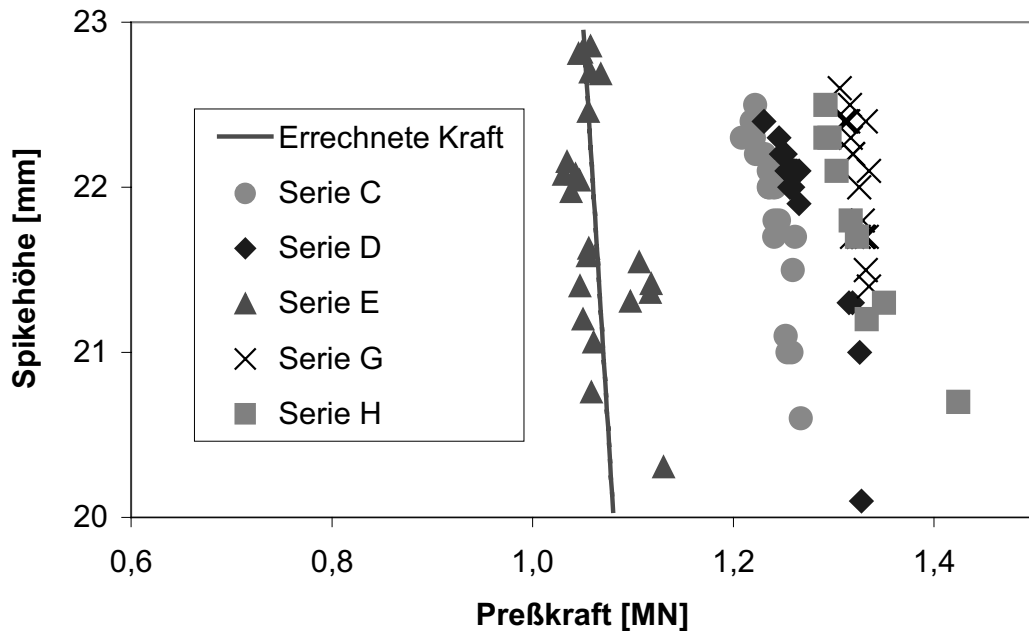


Bild 9.4 Zusammenhang von Spikehöhe und Umformkraft

9.5.2 Reibungskoeffizienten

Der beim den Spiketests zwischen Werkstück und Werkzeug vorliegende Reibungskoeffizient läßt sich aus der Umformkraft für das Fließpressen berechnen.

Nach Grüning [1995] beträgt die Kraft zur reibungsfreien Umformung

$$F_U = A_{D_0} \cdot k_{fm} \cdot \varphi_D \quad \text{mit} \quad \varphi_D = \ln \frac{A_{D_0}}{A_{D_1}} \quad (9.19)$$

Nach Siebel [1932] betragen die Schubkräfte in der Umformzone

$$F_P = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{\varphi_D} \cdot F_U \quad (9.20)$$

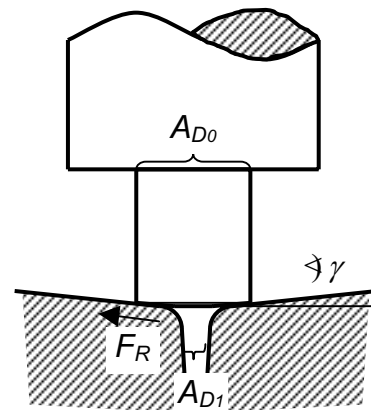


Bild 9.5 Verhältnisse beim Umformvorgang

Die Kraft durch Reibung F_R ergibt sich aus:

$$F_R = F_U \cdot \frac{\mu}{\sin \gamma \cdot \cos \gamma} \quad (9.21)$$

$$F_G = F_U + F_P + F_R \quad (9.22)$$

$$F_G = A_{D_0} \cdot k_{fm} \cdot \varphi_D \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{\varphi_D} + \frac{\mu}{\sin \gamma \cdot \cos \gamma} \right] \quad (9.23)$$

Für die Spiketests (Bild 9.5) ergibt sich nach Gleichung (9.2) ein Formänderungsverhältnis $\varphi_D = 1,39$. Aus der Fließkurve für den verwendeten Stahl C 15 (Grüning [1995], Meyer-Nolkemper [1978]) läßt sich die spezifische Formänderungsarbeit

$$w \approx 780 \text{ N/mm}^3$$

bestimmen. Die mittlere Formänderungsfestigkeit beträgt

$$k_{fm} = w / \varphi_D = 561 \text{ N/mm}^2. \quad (9.24)$$

Mit einem Trichterwinkel von $\gamma = 10^\circ$ und einem angenommenen maximalen Reibungskoeffizient von $\mu = 0,5$ ergibt sich eine größte Umformkraft von

$$F_G = 1526 \text{ kN} \approx 1,5 \text{ MN}.$$

Die durch die Werkstoffumformung bedingte Umformkraft ohne Reibung ergibt sich mit $\mu = 0$ zu

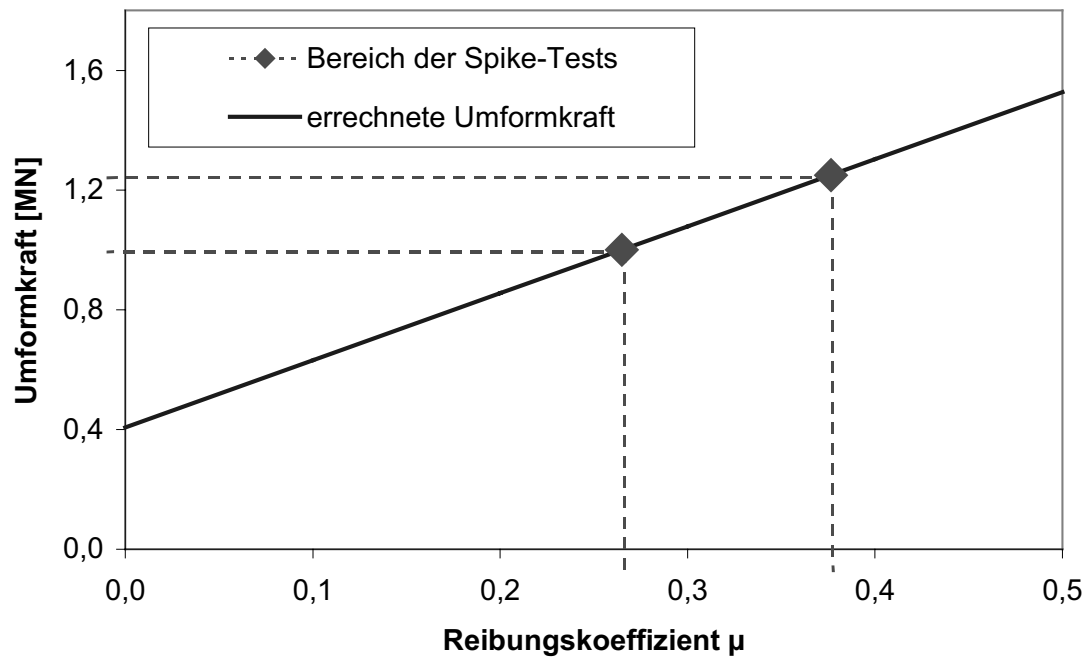
$$F_G = 407 \text{ kN} \approx 0,4 \text{ MN}.$$

Den Anstieg der gesamten Umformkraft mit dem Reibungskoeffizienten zeigt Bild 9.6. Bei den durchgeführten Spiketests wurden Kräfte zwischen 1,2 MN und 1,3 MN gemessen. Aus der Beziehung

$$\mu = \sin \gamma \cdot \cos \gamma \cdot \left[\frac{F_G}{A_{D_0} \cdot k_{fm} \cdot \varphi_D} - 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{\varphi_D} \right] \quad (9.25)$$

ergeben sich Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,27$ für $F_G = 1,0 \text{ MN}$ und $\mu = 0,38$ für $F_G = 1,25 \text{ MN}$. Die errechneten Werte liegen deutlich über den in der Literatur angegebenen von $\mu = 0,1$ bis $0,15$ beim Ringstauchen (Kapitel 2.4).

Die verhältnismäßig geringen Unterschiede der Reibungskoeffizienten in den Versuchsreihen von $0,32$ beziehungsweise $0,37$ für unbeschichtete und $0,27$ beziehungsweise $0,34$ für mit Phosphat und Seife beschichtete Proben weisen darauf hin, daß weniger die Reibungsminderung sondern in erster Linie die Begrenzung der Verschweißneigung entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz der Beschichtung in der Umformpraxis ist.

Bild 9.6 *Umformkraft in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten*

9.6 Umweltbeeinflussung und Kosten

Der wesentliche Vorteil des mechanischen Beschichtungsverfahrens gegenüber der Phosphatierung liegt darin, daß keinerlei Abfallstoffe, insbesondere keine belasteten Abwässer, anfallen. Die abgeschiedenen Stahlkerne und der zum größten Teil aus Zink bestehende Staub können der Wiederverwertung zugeführt werden. Die Staubemissionen der mechanischen Strahlanlagen liegen weit unterhalb der gesetzlich zulässigen Werte (Kapitel 7.4). Das mechanische Beschichtungsverfahren bringt keine Umweltgefährdung mit sich.

Ein weiterer Vorteil des Entfalls der Phosphatschicht ist bei einer Wärmebehandlung der umgeformten Teile gegeben. Bei der Herstellung von Schrauben muß die Phosphatschicht vor der abschließenden Wärmebehandlung entfernt werden, um eine Versprödung der Gewinde durch Eisenphosphide zu verhindern. Bei Verwendung der mechanisch aufgetragenen Beschichtung kann dieser Schritt entfallen.

Der Wirkungsgrad der mechanischen Strahlverfahren von etwa 1 % ergibt sich durch den Quotienten aus auf die Werkstückoberfläche aufgetragenem Beschichtungsmaterial zu dem in Form von Schale der Strahlmittelteilchen zur Verfügung stehenden Schichtmaterial. Im Rahmen der bei den Industriepartnern durchgeführten Untersuchungen lagen die Kosten für eine Anwendung des Verfahrens in der Serienproduktion auf annähernd gleicher Höhe wie die Kosten für die optimierte Phosphatierung.

9.7 Schlußfolgerungen

Die experimentell in Modellversuchen gewonnenen Ergebnisse ergeben folgende Schlußfolgerungen für die Mechanismen der Beschichtung und die Wirkung der Beschichtung auf die Umformung:

1. Die spröde Γ/Γ_1 -Phase zwischen Stahlkern und Schale der Strahlmittelteilchen führt zum definierten Abplatzen des Schalenmaterials beim Aufprall auf die Werkstückoberfläche.
2. Die plastische Verformung der Bruchstücke des Schalenmaterials und der Werkstückoberfläche führt durch lokale Temperaturerhöhung und die Bildung neuer Oberflächen zu einer hohen Verschweißneigung. Die Haftung des Beschichtungsmaterials erfolgt durch ein Reibschweißen auf dem Werkstück.
3. Unterschiedlich starke Oxidation der Werkstückoberfläche führt zu ungleichmäßiger Verschweißneigung und damit zur Existenz nicht beschichteter Bereiche. Der Anteil an beschichteter Oberfläche ist von der Aufprallenergie der Strahlmittelteilchen abhängig.
4. Die reibungsmindernde Wirkung der Beschichtung beruht auf der bevorzugten Verformung des weichen Schichtmaterials bei der Umformung. Das Beschichtungsmaterial folgt dabei der Oberflächenvergrößerung des Werkstücks.
5. Die Beschichtung wirkt zusätzlich zu ihrer eigenen reibungsmindernden Wirkung als Trägerschicht für den als Schmierstoff aufgetragenen Graphit. Die Haftung und gleichmäßige Verteilung von Graphit wird durch die Rauheit der mechanisch aufgetragenen Beschichtung begünstigt.

In Verbindung mit den Ergebnissen aus Versuchen unter industriellen Bedingungen ermöglichen diese Schlußfolgerungen folgende Aussagen für die umformtechnische Anwendung:

6. Für die Kaltmassivumformung von Stahl ist ein reibungsmindernder und trennend wirkender Schmierstoff in gleichmäßiger Verteilung auf der gesamten Oberfläche erforderlich. Die gleichmäßige Verteilung und Haftung von

Festschmierstoffen kann durch eine mechanisch aufgetragene zinkreiche Beschichtung als Trägerschicht gewährleistet werden.

7. Auf die verschiedenen Flächen zylindrischer Rohteile wird durch einen Strahlvorgang in mechanischen Strahlanlagen gleichartige Beschichtung aufgetragen.
8. Die inselartig aufgetragene zinkreiche Beschichtung bietet Graphit als Schmierstoff zusätzliche Vertiefungen für ein Haften durch mechanisches Verhaken. Eine vollständige Flächenbedeckung der Beschichtung ist für eine störungsfreie Umformung nicht erforderlich.
9. Die Kombination aus mechanisch aufgetragener zinkreicher Beschichtung und Graphit als Schmierstoff auf dem Rohteil kann die konventionelle chemische Phosphatierung und Beschichtung mit Seife ersetzen.
10. In Verbindung mit Graphit als Gesenkschmiermittel kann die mechanisch aufgetragene Beschichtung die Phosphatierung und Beschichtung mit Seife in Bezug auf die Spikehöhe sogar übertreffen.
11. Wenn Teile in feuchter Atmosphäre oder über längere Zeit gelagert werden, beeinträchtigt die Bildung von Korrosionsprodukten die Wirkung der Beschichtung.
12. Die mechanisch aufgetragene zinkreiche Beschichtung mit Graphit als Schmiermittel ist für Stauchen, Vorwärtsfließpressen und einfache Rückwärtsfließpreßvorgänge gut geeignet. Die Grenze der Leistungsfähigkeit dieses Schmierystems wird bei Rückwärtsfließpressen mit hohem Umformgrad erreicht.

10 Zusammenfassung

Durch ein mechanisches Strahlverfahren lassen sich Oberflächenbeschichtungen erzeugen, die in Verbindung mit Schmiermitteln die umweltschädliche Phosphatierung bei der Kaltmassivumformung von Stahl ersetzen können. Zum Einsatz kommen Strahlmittel, die aus Stahlkernen mit zinkreichen Schalen bestehen. Die verschiedenen Strahlmittel und ihr Verhalten während des Strahlvorgangs wurden licht- und elektronenmikroskopisch sowie durch Härtemessung und Phasenbestimmung mit Röntgenbeugung charakterisiert. Die Schale eines neu entwickelten kugelförmigen Strahlmittels ist massiv und besteht vorwiegend aus der weichen Zink-Eisen-Phase δ . Am Übergang zwischen Schale und Kern befindet sich die spröde, eisenreichere Phase Γ . Beim Auftreffen der durch ein Schleuderrad beschleunigten Strahlmittelteilchen auf die Werkstückoberfläche platzt ein Teil der Schale entlang dieser Schicht ab und wird durch den Impuls der Strahlmittelteilchen teilweise oder ganz durch ein Reibschweißen auf die Werkstückoberfläche aufgetragen.

Zur Untersuchung des Einflusses von Menge, Energie und Einfallwinkel der auftreffenden Strahlmittelteilchen auf den Auftrag von Beschichtungsmaterial dienten Modellversuche mit einer druckluftbeaufschlagten manuellen Strahlvorrichtung und Versuche mit industriell eingesetzten mechanischen Strahlanlagen. Proben aus Stahl, Kupfer und Aluminium wurden unter verschiedenen Einfallwinkeln und mit unterschiedlicher kinetischer Energie des Strahlmittels behandelt. Die Bestimmung von Schichtgewicht und Flächenbedeckung der aufgetragenen Schichten erfolgte durch Einsatz von gravimetrischen und rasterelektronenmikroskopischen Verfahren.

Auf Aluminium und Kupfer entsteht nach ausreichender Strahlzeit eine annähernd vollständige Flächenbedeckung, auf Stahl wird dagegen nur ein Teil der Oberfläche mit einer Beschichtung bedeckt. Die Flächenbedeckung erreicht einen Sättigungswert, während das Schichtgewicht linear mit der Strahlzeit zunimmt. Der Sättigungswert wird von der kinetischen Aufprallenergie der Strahlmittelteilchen bestimmt. Der Auftrag von Beschichtungsmaterial erreicht für einen Einfallwinkel der Strahlmittelteilchen von 45° ein Maximum. Es konnte gezeigt werden, daß die Verformbarkeit des Werkstoffs die Verschweißneigung und damit den Auftrag von Beschichtungsmaterial wesentlich beeinflusst. Nur wenn die Verformung der

Werkstückoberfläche lokal ausreicht, um Oxidschichten zu entfernen, findet ein Verschweißen und damit eine Beschichtung statt.

Zur Prüfung des Einflusses der Beschichtungen auf die Umformeignung kamen Spiketest und Vorwärtsfließpressen zum Einsatz. Beschichtete Proben erreichen deutlich geringere Umformkräfte und größere Spikehöhen als unbeschichtete. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen umgeformter Proben zeigen, daß die inselartige Beschichtung bei der Umformung erhalten bleibt. Die Umformkräfte und die lokale Flächenpressung werden reduziert, so daß sich die Verschweißneigung mit dem Werkzeug deutlich vermindert.

Die Anlagerung von Festschmiermitteln wie Graphit wird durch die Topographie des Beschichtungsmaterials verbessert. In Verbindung mit Schmiermitteln erzielen mechanisch beschichtete Proben vergleichbare Umformkräfte und Spikehöhen wie die als Referenz dienenden, phosphatierten und mit Seife behandelten Proben. Damit konnte festgestellt werden, daß eine vollständige Bedeckung der Werkstückoberfläche mit dem mechanisch aufgetragenen Beschichtungsmaterial für die Funktion als Trägerschicht für ein Schmiermittel nicht erforderlich ist. Industrielle Umformversuche zeigen die Anwendbarkeit des Verfahrens bei verschiedenen Fertigungsarten. Die Grenze wird beim Rückwärtsfließpressen mit hoher Oberflächenvergrößerung erreicht.

Über die Prüfung der technischen Eignung und der Entwicklung einer qualitativen Vorstellung des Ablaufs der Beschichtung sowie des Wirkens der Schichten bei der Umformung wurden auf empirischem Weg halbquantitative Ansätze für den Einfluß der Parameter des Beschichtungsvorgangs und die Umformkraft erstellt. Eine Betrachtung der Umformgeometrie beschreibt die im betrachteten Bereich linear mit steigender Umformkraft abnehmende Spikehöhe. Die Ergebnisse der Druckluft-Strahlversuche sind unter Berücksichtigung der Aufprallbedingungen mit denen der mechanischen Strahlanlagen vergleichbar. Mit den erstellten Gleichungen ist eine Vorhersage der zu erwartenden Flächenbedeckung und Schichtgewicht in Abhängigkeit von den verschiedenen Strahlparametern möglich. Die Flächenbedeckung und das Schichtgewicht werden mit zunehmendem Einfluß von Strahlzeit, Strahlwinkel und kinetischer Energie der Strahlmitteilchen bestimmt.

Die umweltschädlichen Emissionen des Strahlverfahrens wurden durch gezielte chemische Analyse der Strahlmittel mittels Plasmaspektroskopie beurteilt. Die

Gehalte an umweltgefährdenden Elementen wie Cadmium oder Blei liegen unterhalb der zulässigen Grenzwerte. Staub stellt die einzige Emission des Strahlverfahrens dar. Durch Messungen mit einem massendispersiven Impactor und Analyse der Teilchen mittels Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse konnte nachgewiesen werden, daß die Emissionen weit unterhalb der zulässigen Grenzwerte bleiben. Das neue Verfahren bringt keine als kritisch einzustufenden Umweltbelastungen mit sich.

11 Literaturverzeichnis

- Adachi, Y., Arai, M. [1998]: „Transformation of Fe-Al Phase to Fe-Zn Phase on Pure Iron During Galvanizing“, Materials Science and Engineering A254, 305-310
- Alkhimov, A.P., Papyrin, A. N., Kosarev, V. F., Nesterovich, N. I., Shushpanov, M. M. [1994]: „Gas-Dynamic Spraying Method for Applying a Coating“, United States Patent Nr. 5,302,414
- Al-Obaid, Y. F. [1995]: „Shot Peening Mechanics: Experimental and Theoretical Analysis“, Mechanics of Materials 19, 251-260
- Babecki, A. J., Haehner, C. L. [1973]: „Metal Plating“, United States Patent Nr. 3,754,976
- Balbach, R. [1988]: „Verbesserte Tiefzieheigenschaften von Aluminium-Feinblech durch Optimierung der Oberflächengeometrie“, Aluminium 64, 529-532
- Bartz, W. (Hrsg.) [1980]: „Gesichtspunkte für die gezielte Auswahl von Schmierstoffen für die Umformung - Teil II“, Blech Rohre Profile 27, 1, 36-41
- Bartz, W. [1987]: „Tribologie und Schmierung in der Umformtechnik“, Expert-Verlag, Sindelfingen
- Batchelor, A. W., Stachowiak, G. W. [1995]: „Tribology in Materials Processing“, Journal of Materials Processing Technology 48, 503-515
- Bay, N. [1994]: „The State of the Art in Cold Forging Lubrication“, Journal of Materials Processing Technology 46, 19-40
- Becker, G. [1965]: „Improvements in or Relating to Processes for Coating Steel Surfaces with Layers of Corrosion-Resisting Metal“, Hüttenwerk Oberhausen, GB Patent Nr. 1,041,620, London
- Beitz, W., Küttner, K-H. [1990]: „Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau“, Springer-Verlag, Berlin, B 53
- Bender-Christensen, B. [1973]: „Process and Composition for Blast-Cleaning and Corrosion-Protecting Metal Surfaces“, United States Patent Nr. 3,765,923
- Bowden, F. P. , Tabor, J. D. [1950]: „The Friction and Lubrication of Solids“, Clarendon Press, Oxford
- Buckley, D. H., Johnson, R. L. [1968]: „The Influence of Crystal Structure and some Properties of Hexagonal Metals on Friction and Adhesion“, Wear 11, 405-419
- Burgdorf, M. [1967]: „Über die Ermittlung des Reibwertes für Verfahren der Massivumformung durch den Ringstauchversuch“, Industrie-Anzeiger 89, 39, 799-804

- Crafoord, R. [1990]: „Environmental Aspects on Surface Treatments for Cold Forging“, International Cold Forging Group, Proceedings of the 23th Plenary Meeting, Helsinki, International Cold Forging Group, Paris
- DeWit, K., DeCooman, B. C., DeBoeck, A. [2000]: „Reassessment of the Zn-Fe Phases in Electro-deposited Zn-Fe Layers“, Zeitschrift Metallkunde 91, 421-428
- DIN 50 988 [1988]: „Messung von Schichtdicken, Bestimmung der flächenbezogenen Masse von Zink- und Zinnschichten auf Eisenwerkstoffen durch Ablösen des Schichtwerkstoffes, Maßanalytisches Verfahren“, Deutsche Norm
- DIN EN ISO 2064 [1994]: „Metallische und andere anorganische Schichten, Definitionen und Festlegungen, die die Messung der Schichtdicke betreffen“, Europäische Norm
- DIN EN ISO 2819 [1994]: „Metallische Überzüge auf metallischen Grundwerkstoffen, Galvanische und chemische Überzüge, Überblick über die Methoden der Haftfestigkeitsprüfung“, Europäische Norm
- DIN EN ISO 3892 [1994]: „Konversionsschichten auf metallischen Werkstoffen, Bestimmung der flächenbezogenen Masse der Schichten, gravimetrische Verfahren“, Europäische Norm
- Dubar, L., Bricout, J. P., Wierre, C., Meignan, P. [1998]: „New Surface Processes for Cold Forging of Steel“, Surface Coatings and Technology 102, 159-167
- Dubois, A., Wierre, C., Bricout, J. P., Oudin, J., Meignan, P. [1995]: „Testing of New Non Polluting and Non Reactive Coatings for Tube Drawing and Similar Processes“, Proceedings of the 28th Plenary Meeting, Denmark, International Cold Forging Group, Paris
- Dubois, A., Lazarotto, L., Dubar, L., Oudin, J. [2002]: „A Multi-Step Lubricant Evaluation Strategy for Wire Drawing-Extrusion-Cold Heading Sequence“, Wear 249, 951-961
- Ebert, M., Dahmen, J., Hoffmann, P., Ortner, H. M. [1997]: „Examination of Clean Room Aerosol Particle Composition by Total Reflection X-Ray Analysis and Electron Probe Microanalysis“, Spectrochimica Acta Part B 52, 967-975
- Engel, U., Hinsel, C. [1995]: „Tool Life in Cold Forging“, International Cold Forging Group, Proceedings of the 28th Plenary Meeting, Denmark, International Cold Forging Group, Paris
- Evans, T. R., Gesick, N. S. [1969]: „Production of Encapsulated Powders“, United States Patent Nr. 3,447,950

- Franzen, A. [1998]: „Untersuchungen zur Entzinkung von beschichtetem Stahlband durch thermische Behandlung im festen Zustand“, Dissertation Technische Universität Clausthal
- Fridici, V., Fouvry, S., Kapsa, P. [2001]: „Effect of Shot Peening on the Fretting Wear of Ti-6Al-4V“, *Wear* 250, 642-649
- Geiger, M., Engel, U., Niederjorn, S., Pfestorf, M. [1995]: „Experimental Investigation of the Contact Phenomena in Cold Forging“, Proceedings of the 28th Plenary Meeting, Denmark, International Cold Forging Group, Paris
- Geiger, R. [1982]: „Oberflächenbehandlung für das Kaltmassivumformen von Stahl“, *Draht* 33, 627-629 und 674-677
- Gmelin [1978]: „Handbuch der anorganischen Chemie“, Band 59 (Fe), Springer-Verlag, Heidelberg
- Gräbener, T. [1983]: „Entwicklung und Anwendung neuer Schmierstoffprüfverfahren für die Kaltmassivumformung“, Berichte aus dem IFU, Universität Stuttgart, Springer-Verlag, Heidelberg
- Griffiths, B. J., Gawne, D. T., Dong, G. [1996]: „The Erosion of Steel Surfaces by Grit-Blasting as a Preparation for Plasma Spraying“, *Wear* 194, 95-102
- Gronostajski, J. Z. [1995]: „Behaviour of Coated Steel Sheets in Forming Processes“, *Journal of Materials Processing Technology* 53, 167-176
- Grüning, K. [1995]: „Umformtechnik“, Vieweg, Wiesbaden
- Habig, K.-H. [1968]: „Zur Struktur- und Orientierungsabhängigkeit der Adhäsion und Gleitreibung von Metallen“, *Materialprüfung* 10, 417-419
- Harada, Y., Mori, K.-I., Maki, [1998]: „Lining of Metal Plates with Foils Using Hot Shot Peening“, *Journal of Materials Processing Technology* 80-81, 309-314
- Harris, A. F., Beevers, A. [1999]: „The Effects of Grit-Blasting on Surface Properties for Adhesion“, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19, 445-452
- Haupt, H. J. [1979]: „Oberflächenvorbehandlung für das Kaltmassivumformen“, *WT Zeitschrift für industrielle Fertigung*, 69, 555-558
- Hemyari, D. [1999]: „Methode zur Ermittlung von Konstitutivmodellen für Reibvorgänge in der Massivumformung bei erhöhten Temperaturen“, Dissertation Technische Universität Darmstadt, Shaker-Verlag, Aachen
- Hering, E., Martin, R., Stohrer, M. [1989]: „Physik für Ingenieure“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 115, 132 und 168
- Hermann, H., Hildebrand, M [1996]: „Untersuchungen zur Bestimmung der lokalen Schmierfilmdicke beim Ziehen von Profilen“, *MEFORM 96 Schmierung bei den*

- Prozessen der Warm- und Kaltumformung, Technische Universität Bergakademie Freiberg
- Hillery, M. T., McCabe, V. J. [1995]: „Wire Drawing at Elevated Temperatures Using Different Die Materials and Lubricants“, Journal of Materials Processing Technology 55, 53-57
- Hinsel, C. [1997]: „Fatigue of PVD and CVD Coated Tool Steel for Cold Forging“, Wire 47, 6, 30-33
- Horlacher, U. [1989]: „Prüfung des Einflusses von Schmierstoffadditiven auf das Tribosystem bei der Kaltmassivumformung“, Dissertation Universität Stuttgart
- Hortig, D. [2000]: „Werkzeugbeschichtungen mit Trockenschmierstoffeigenschaften für das Tiefziehen“, Dissertation Technische Universität Darmstadt
- Hu, Z. M., Dean, T. A. [2000]: „A Study of Surface Topography, Friction and Lubricants in Metalforming“, International Journal of Machine Tools and Manufacture 40, 1637-1679
- ICFG International Cold Forging Group [1990]: „ICFG Cold Forging Tribology Guideline No 1“, Document 1/1990, CIRP, Paris
- ICFG International Cold Forging Group [1991]: „ Lubrication Aspects in Cold Forging of Carbon Steels and Low Alloy Steels“, Document 8/1991, CIRP, Paris
- ICFG International Cold Forging Group [1995]: „Lubrication Aspects in Cold Forging of Aluminium and Aluminium Alloys“, Document 10/1995, CIRP, Paris
- Isogawa, S., Kimura, A. [1992]: „Proposal of an Evaluating Method on Lubrication“, Annals of the CIRP 41, 263-266
- Jeong, D. J., Kim, D. J., Kim, J. H., Kim, B. M., Dean, T. A. [2001]: „Effects of Surface Treatments and Lubricants for Warm Forging Die Life“, Journal of Materials Processing Technology 113, 544-550
- Kaysser, F. [1972]: „Über die Kennzeichnung der Auflagestärken von Phosphatschichten durch Angabe der Flächengewichte und der Schichtdicken“, Galvanotechnik 63, 11-23
- Kivviviuri, [1998]: „Testing for Cold Forgeability“, Proceedings of the 31st Plenary Meeting, Gothenburg, International Cold Forging Group, Paris
- Klocke, F., Raedt, H.-W. [2000]: „Entwicklung von Hartstoffschichten für die umweltfreundliche Kaltumformung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode“, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 31, 801-804
- Kobayashi, M., Matsui, T., Murakami, Y. [1998]: „Mechanism of Creation of Compressive Residual Stress by Shot Peening“, International Journal of Fatigue 20, 5, 351-357

- Koch, M., Ebersbach, U., Müller, A. [1994]: „Untersuchungen an Chrom-PVD-Schichten auf Messingsubstraten“, Praktische Metallographie Sonderband 25, 97-106
- Koyama, T. [1993]: „Lubricants for Cold Forging of Aluminium“, Proceedings of the Cold Forging Tribology Congress, International Cold Forging Group, Paris
- Kraft, O., Volkert, C. A. [2001]: „Mechanical Testing of Thin Films and Small Structures“, Advanced Engineering Materials 3, 99-110
- Krušič, V., Kuzman, K [1993]: „Cold Radial Extrusion in Automotive Industry“, International Cold Forging Group, Proceedings of the 26th Plenary Meeting, Osaka
- Kuchling, H. [1991]: „Taschenbuch der Physik“, Fachbuchverlag Leipzig, 583-599
- Kudo, H., Takahashi, A. [1990]: „Cold Forging Technology in the Japanese Automotive Industry“, Proceedings of the 23th Plenary Meeting, Helsinki, International Cold Forging Group, Paris
- Lahoti, G. D., Pauskar, P. M. [2000]: „Cold Forging in the United States of America- State-of-the-Art, Trends and Future Developments“, VDI-Berichte 1555, VDI-Verlag, Düsseldorf, 31-50
- Lange, K., Hoang-Vu, K. [1980]: „Kaltgesenkschmieden – eine fertigungstechnische Alternative für kleine, genaue Formteile“, Werkstatttechnik 70, 569-574
- Lazzarotto, L. [1997]: „Caractérisation des Performances des Huiles de Frappe à Froid par le Test de Compression-Translation“, Rapport CETIM, Nr. 178 801, Saint-Etienne, 39-41
- Lazzarotto, L. et al. [1997]: „Identification of Coulomb's Friction Coefficient in Real Contact Conditions Applied to a Wire Drawing Process“, Wear 211, 54-63
- Lazzarotto, L., Dubar, L., Dubois, A., Ravassard, P., Bricout, J. P., Oudin, J. [1998]: „A Selection Methodology for Lubricating Oils in Cold Metal Forming Processes“, Wear 215, 1-9
- Lehnert, W., Hildebrand, M. [1996]: „Umformtechnische Vorgänge in der Wirkfuge unter Berücksichtigung der Bedeutung der Schmierstoffe“, Tagungsband MEFORM 96 Schmierung bei den Prozessen der Warm- und Kaltumformung, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 1-11
- Lippmann, H. , Mahrenholtz, O. [1967]: „Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe“, Springer-Verlag, Berlin
- Löffler, F. [1999]: „Methods to Investigate Mechanical Properties of Coatings“, Thin Solid Films 339, 181-186
- Massalski, T. B., Murray, J. L., Bennett, L. H., Baker, H. [1986]: „Binary Alloy Phase Diagrams“, American Society for Metals, Metals Park

- Mayrhofer, K. [1983]: „Kaltfliesspressen von Stahl und Nichteisenmetallen“, Springer-Verlag, Berlin
- Meyer-Nolkemper, H. [1978]: „Fließkurven metallischer Werkstoffe“, Hannoversches Forschungsinstitut für Fertigungsfragen, Hannover
- Mitterer, C., Barbist, R., Björk, T., Sundqvist, M., Bergström, J., Hagler, J. [1997]: „A Comparative Study on the Evaluation of the Tribological Behaviour of Polymer/Zinc Coated Steel Sheets“, *Wear* 210, 88-95
- Mizuno, T., Mulki, H. [1996]: „Changes in Surface Texture of Zinc-Coated Steel Sheets Under Plastic Deformation“, *Wear* 198, 176-184
- Monaghan, J., O'Reilly, M. [1996]: „The Influence of Lubrication on the Surface Finish of Cold Forged Components“, *Journal of Materials Processing Technology* 56, 678-690
- Montmitonnet, P., Delamare, F., Rizoulières, B. [2000]: „Transfer Layer and Friction in Cold Metal Strip Rolling Processes“, *Wear* 245, 125-135
- Mulki, H., Mizuno, T. [1996]: „Contact Mechanics of Zinc-Coated Steel Sheets“, *Wear* 199, 260-267
- Mumme, F., Jungblut, F. [2000]: „Innovative PVD Coatings for Optimized Production Processes“, *VDI-Berichte 1555*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 211-226
- Münz, W.-D., Nayal, G., Smith, I. J. [2000]: „PVD Coatings Designed for Cold Forging Processes“, *VDI-Berichte 1555*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 227-242
- Nakamura, T., Zhang, Z.-L., Itoh, M., Kimura, H., Iida, [1998]: „Comparative Evaluation of Various Lubricants for Cold Forging Processes of Aluminium Alloys by Different Friction Testing Methods“, *Proceedings of the 31st Plenary Meeting*, Gothenburg, International Cold Forging Group, Paris, 1-13
- Nakamura, T. [1999]: „Lubrication Behaviour of Solid Lubricants in Upsetting Process by FEM Simulations“, *Proceedings of the 32nd Plenary Meeting*, Ljubljana, International Cold Forging Group, Paris, 1-11
- Nakamura, T., Wang, T., Sampath, [2000]: „Determination of Properties of Graded Materials by Inverse Analysis and Instrumented Indentation“, *Acta Materialia* 48, 4293-4306
- Nedschroef [2001]: „Final Technical Report“, BRITE/EURAM Project No 4792, Helmond
- Nehrenberg, H., Gothe, W. [1996]: „Die Herstellung von Rohren und Drähten mit Hilfe anorganischer Trägerschichten und Schmierstoffen“, *Tagungsband MEFORM 96 Schmierung bei den Prozessen der Warm- und Kaltumformung*, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 1-19

- Nishimura, T., Sato, T., Hoke, K., Tada, Y. [1995]: „A Method for the Evaluation of Lubrication Using Injection Upsetting“, Journal of Materials Processing Technology 53, 712-725
- Omori, S., Watanabe, M., Oboshi, F. [1987]: „Blast Material for Mechanical Plating and Continuous Mechanical Plating Using the Same“, United States Patent Nr. 4,714,622
- Omori, S., Kieffer, J. M. [2000]: „Cold Dry Plating Process for Forming a Polycrystalline Structure Film of Zinc-Iron by Mechanical Projection of a Composite Material“, United States Patent Nr. 6,015,586
- Onodera, S., Sawai, K. [1994]: „Modern Cold Forging Applications for the Manufacture of Complex Automotive Parts“, Journal of Materials Processing Technology 46, 169-183
- Oppen, D. [1984]: „Chemische Verfahren der Oberflächenbehandlung zur Erleichterung des Kaltumformens von Stahl“, Draht 35, 341-345 und 396-400
- Persson, U., Chandrasekaran, H., Merstallinger, A. [2001]: „Adhesion between some Tool and Work Materials in Fretting and Relation to Metal Cutting“, Wear 249, 293-301
- Petzow, G., Effenberg, G. [1992], „Ternary Alloys“, Vol. 5, Verlag VCH, Weinheim
- Pfedorf, M., Staeves, J., Wagner, [1997]: „Definition von 3-D-Oberflächenkenngrößen“, Stahl und Eisen 117, 7, 89-94
- Pöhlandt, K. [1992]: „Coating of Tools for Cold Forging“, Proceedings of the 25th Plenary Meeting, Darmstadt, International Cold Forging Group, Paris, 1-12
- Pöhlandt, K. [1994]: „Werkstoffe und Werkstoffprüfung für die Kaltmassivumformung“, Expert-Verlag, Renningen
- Reichelmann, E. [1976]: „Probleme und Lösungen beim Umformen von Getriebe- und Hinterachsgetriebewellen aus Zahnradvergütungs und Einsatzstählen“, VDI-Berichte Nr. 266, VDI-Verlag, Düsseldorf, 85-88
- Renaudin, J. F., Batit, G., Bournicon, C. [1990]: „A Simulation of Cold Forging Operations for Testing the Tribological Properties of Solid Lubricant Coatings“, Advanced Technology of Plasticity, 1, 47-52
- Rooyen, G. T. van, Backofen, W. A. [1960]: „A Study of Interface Friction in Plastic Compression“, International Journal of Mechanical Sciences 1, 1-27
- Rupp, M. [1997]: „Möglichkeiten und Grenzen der Kaltmassivumformung zinkphosphatschichtfreier Drähte“, Dissertation Technische Universität Darmstadt, Shaker-Verlag, Aachen

- Saiki, H., Ngaile, G., Ruan, L. [1997]: „Influence of Die Geometry on the Workability of Conversion Coatings Combined With Soap Lubricant in Cold Forming of Steels“, Journal of Materials Processing Technology 63, 238-243
- Saiki, H., Ngaile, G., Ruan, L., Marumo, Y. [1998]: „A Tribo-Testing Method for High-Performance Cold forging Lubricants“, Proceedings of the 31st Plenary Meeting, Gothenburg, International Cold Forging Group, Paris, 1-11
- Saiki, H., Marumo, Y., Minami, A., Sonoi, T. [2001]: „Effect of the Surface Structure on the Resistance to Plastic Deformation of a Hot Forging Tool“, Journal of Materials Processing Technology 113, 22-27
- Sakurai, H., Soga, R. [2001]: „Evolution of Cold Forging Technology in Honda Motor“, Proceedings of the Joint Meeting with Japanese Forging Group of JSTP, Tsukuba, International Cold Forging Group, Paris, 1-14
- Scheil, E., Wurst, H. [1937]: „Über die Reaktion des Eisens mit flüssigem Zink“, Zeitschrift für Metallkunde 29, 7, 224-229
- Schmidt, U., Bodschinna, H., Schneider, U. [1987]: „Funktionsgerechte Rauheitskennwerte durch Auswerten der Abbott-Kurve“, Antriebstechnik 26, 9, 65-69 und 10, 55-59
- Schmoeckel, D., Gärtner, R., Rupp, M. [1998]: „Trends in der Tribologie“, Umformtechnik 4, 42-46
- Schramm, J [1937]: „Über eine neue Phase im System Eisen-Zink“, Zeitschrift für Metallkunde 29, 222-224
- Sheljaskow, S. [1993]: „Manufacture of Near-Net Shape Forgings through Warm Forging“, Proceedings of the 26th Plenary Meeting, Osaka, International Cold Forging Group, Paris
- Sheljaskow, S. [1994]: „Current Level of Development of Warm Forging Technology“, Journal of Materials Processing Technology 46, 3-18
- Siebel, E. [1932]: „Die Formgebung im bildsamen Zustande“, Verlag Stahleisen, Düsseldorf
- Singer, F. [1934]: „Verfahren zur Vorbehandlung von Eisen- und Stahlwerkstücken für die spanlose Formgebung, z. B. das Ziehen, Strecken, Walzen“, Deutsches Reichspatent Nr. 673 405
- Skov-Hansen, P., Bay, N., Grønbæk, J., Brøndsted, P. [1999]: „Fatigue in Cold-Forging Dies: Tool Life Analysis“, Journal of Materials Processing Technology 95, 40-48
- Sobis, T. [1996]: „Geometrische Oberflächeneigenschaften bei Mischreibung“, Tribologie und Schmierungstechnik, 43, 4, 191-197

- Société Nouvelle de Métallisation [1960]: „La Métallisation en Mécanique“, 4^{ème} Edition, Paris
- Staia, M. H., Ramos, E., Carrasquero, A., Roman, A., Lesage, J., Chicot, D., Mesmacque, G. [2000]: „Effect of Substrate Roughness Induced by Grit Blasting upon Adhesion of WC-17% Co Thermal Sprayed Coatings“, *Thin Solid Films* 377-378 und 657-664
- Steenberg, T., Olsen, J. S., Christensen, E., Bjerrum, N. [1999]: „Estimation of Temperature in the Lubricant Film during Cold Forging of Stainless Steel Based on Studies of Phase Transformations in the Film“, *Wear* 232, 140-144
- Steinhoff, K., Schuleit, N. [2000]: „Thermal Implantation of Metal Carbide Particles - A New Surface Treatment for Cold Forging Tools“, *VDI-Berichte* 1555, VDI-Verlag, Düsseldorf, 243-258
- Syahbuddin, Munroe, P. R., Laksmi, C. S., Gleeson, B. [1998]: „Effects of 0.1 and 0.2 wt% Aluminium Addition to Zinc on the Interdiffusion between Zinc and Iron at 400 °C“, *Materials Science and Engineering A251*, 87-93
- Syahbuddin, Munroe, P. R., Gleeson, B. [1999]: „The Development of Fe-Zn Intermetallic Compounds in Solid Fe/Zn and Fe/Zn-Al Diffusion Couples During Short Term Annealing at 400 °C“, *Materials Science and Engineering A264*, 201-209
- Tamura, T., Azushima, A. [1993]: „Lubricant Performance in Aluminium Cold Forging“, *Proceedings of the Cold Forging Tribology Congress, International Cold Forging Group, Paris*, 1-6
- Tiesler, N., Engel, U. [2000]: „Microforming - Size Effects in Friction and their Influence on Extrusion Processes“, *Advanced Technology of Plasticity, Springer-Verlag, Berlin*, 889-894
- Vasquez, V., Hannan, D., Altan, T. [2000]: „Tool Life in Cold Forging - An Example of Design Improvement to Increase Service Life“, *Materials Processing Technology* 98, 90-96
- Vetter, H. [1977]: „Neues Schmierverfahren zum Kaltfließpressen von Stahl“, *Industrie Anzeiger* 99, 409-411
- Vey, R. [1994]: „Surface Treatment prior to Cold Forging“, *Proceedings of the 27th Plenary Meeting, Padua, International Cold Forging Group, Paris*, 1-9
- Vogel, H.-R., Reichert, J., Eickemeyer, J. [1996]: „Tribologisch und antikorrosiv wirkende Beschichtungen für die Kalmassivumformung“, *MEFORM 96 Schmierung bei den Prozessen der Warm- und Kaltumformung, Technische Universität Bergakademie Freiberg*

- Wagener, H.-W. (Hrsg.) [1999]: „Tribologische Untersuchungen zur Kaltmassivumformung“, Shaker Verlag, Aachen
- Watanabe, M., Nagano, Y., Shimoyama, H., Osaka, T. [1994]: „Mechanical Plating Method for Forming a Zinc Alloy Film by Ejecting Heat Treated Powder“, United States Patent Nr. 5,354,579
- Weber, S. [1997]: „Bestimmung von Eisen und Identifizierung von Eisenverbindungen in partikulären Aerosolen“, Dissertation Technische Universität Darmstadt
- Weinhold, H., Kieselstein, S., Kurze, B., Zschorn, G., Hübner, A. [1996]: „Ein neues Druckschmiersystem beim Drahtziehen - Auswirkungen auf Verfahren und Werkstoff“, Tagungsband MEFORM 96 Schmierung bei den Prozessen der Warm- und Kaltumformung, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 1-14
- Widmark, M., Melander, A. [1999]: „Effect of Material, Heat Treatment, Grinding and Shot Peening on Contact Fatigue Life of Carburised Steels“, International Journal of Fatigue 21, 309-327
- Wolf, J. [1996]: „Bestimmung partieller Reibkoeffizienten beim Kaltfließpressen von Stahl und Sondermetallen“, Dissertation Universität Kassel

12 Anhang

12.1 Auftrag von Beschichtungen

Geometrie	Rohteil Durchmesser [mm]	Rohteil Höhe [mm]	Rohteil Gewicht [g]	Strahl-anlage, Strahlmittel	Umdrehungs-geschwindigkeit des Schleuderrades [min ⁻¹]
1	38	264	2300	2, kantig	2900
2	34	74	525		2900
					2000
3	28	7	35	1, rund	2000
4	30	60	390		
5	37	260	2300		

Tabelle 12.1 *Rohteile verschiedener Geometrie für Beschichtungsversuche in mechanischen Strahlanlagen (Kapitel 6.4.4)*

Rohteil Durchmesser [mm]	Rohteil Höhe [mm]	Strahl-anlage	Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder [min ⁻¹]	Strahlzeit [min]	Schichtgewicht [g/m ²]
38	263	1	2000	10	2
31	62		3000	720	90
38	263		2000	35	21
		2	2900	20	8

Tabelle 12.2 *Beschichtungsversuche in mechanischen Strahlanlagen mit unterschiedlichen Strahlparametern (Kapitel 6.2)*

Rohteil Durchmesser [mm]	Rohteil Höhe [mm]	Strahl-anlage	Chargengewicht [kg]	Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder [min ⁻¹]	Strahlzeit [min]	Schichtgewicht [g/m ²]
38	263	1	20	3000	20	13
			40			
			60			
			80			

Tabelle 12.3 *Beschichtungsversuche in mechanischen Strahlanlagen mit unterschiedlichem Chargengewicht (Kapitel 6.4.1)*

Rohteil Durchmesser [mm]	Rohteil Höhe [mm]	Strahl-anlage	Umdrehungs-geschwindigkeit der Schleuderräder [min^{-1}]	Strahl-zeit [min]	Energieaufnahme des Schleuderrad-antriebs [W]
38	263	1	3000	35	150
					270
					420
					600
					630
					780
					940
					1120

Tabelle 12.4 *Beschichtungsversuche in mechanischen Strahlanlagen mit unterschiedlichem Strahlmitteldurchsatz (Kapitel 6.4.2)*

Rohteil Durchmesser [mm]	Rohteil Höhe [mm]	Strahl-anlage	Umdrehungs-geschwindigkeit der Schleuderräder [min^{-1}]	Strahl-zeit [min]	Rohteile
38	264	2	2900	5-60	gestrahlt
34	74		2000	20	
34	74	2	2900	5-20	geschliffen

Tabelle 12.5 *Beschichtungsversuche in mechanischen Strahlanlagen mit unterschiedlicher Strahlzeit (Kapitel 6.4.3)*

Rohteil Durchmesser [mm]	Rohteil Höhe [mm]	Strahl-anlage	Umdrehungs-geschwindigkeit der Schleuderräder [min^{-1}]	Strahl-zeit [min]	Verunreinigung
38	263	1	2000	30	Keine
					Strahlmittel mit Stahlkugeln (\varnothing 1,6 mm)
				20	Strahlmittel mit 5 Gew.% Graphit
					Teile mit Graphit
					Teile mit MoS_2
Teile gereinigt					

Tabelle 12.6 *Beschichtungsversuche in mechanischen Strahlanlagen mit gezielten Verunreinigungen (Kapitel 6.4.5)*

Rohteil Durchmesser [mm]	Rohteil Höhe [mm]	Strahl-anlage	Umdrehungs-geschwindigkeit der Schleuderräder [min ⁻¹]	Strahl-zeit [min]	Schicht-gewicht [g/m ²]
25	30	1	2000	20	10
				30	17
		2	2000	20	8

Tabelle 12.7 *Beschichtungsversuche in mechanischen Strahlanlagen zur Bestimmung der Oberflächenrauheit (Kapitel 6.4.6)*

Serie	Rohteil Durchmesser [mm]	Rohteil Höhe [mm]	Strahl-anlage	Strahl-mittel	Umdrehungs-geschwindigkeit des Schleuderrades [min ⁻¹]	Strahl-zeit [min]	Schicht-gewicht [g/m ²]		
(A)	Ø 20 und Ø 25 x 30, nur Phosphat)								
B	25	30	1	rund	2000	20	10		
C					3000	15	10,5		
D					2000	10	4,9		
					3000	20	14,9		
						30	19,3		
E					2	kantig	2900	20	9,6
					1	rund	3000	15	10,3
								25	17
2					kantig	2900	20	8	
F					1	rund	3000	30	20
	45	36							
G	2000	20	10						
H		20	10						
J		15	10						
K	20	20	1	rund	2000	5	2,3		
					3000	10	4,2		
						15	11,3		
					30	20			

Tabelle 12.8 *Beschichtung der Rohteile für Umform-Modellversuche in mechanischen Strahlanlagen (Kapitel 7.1)*

Geschwindigkeit der Schleuderräder [1/min]	Vorschub [m/min]	Gesamtlänge des Drahtes [m]	Staub aus Filter [kg]	Schichtgewicht [g/m ²]	Flächenbedeckung [%]
2000	6	650	64,2	12,7	32,8
	7,6	1440	86,0	8,2	35,7
	9	290	13,4	4,4	20,7
	15	540	21,5	2,6	13,3
	19	290	9,3	1,6	11,4
3000	(~ 1)	(2)	-	(147,5)	(56,8)
	10,5	300	16,6	12,1	30,3
	13	300	14,0	7,7	16,5
	15	300	1,8	7,7	15,1
	30,8	340	7,6	2,3	8,9
Phosphatiert				13,3	~ 98

Tabelle 12.9 *Beschichtung von Draht (rundes Strahlmittel, Kapitel 6.4.7)*

12.2 Verhalten der Beschichtungen bei der Umformung

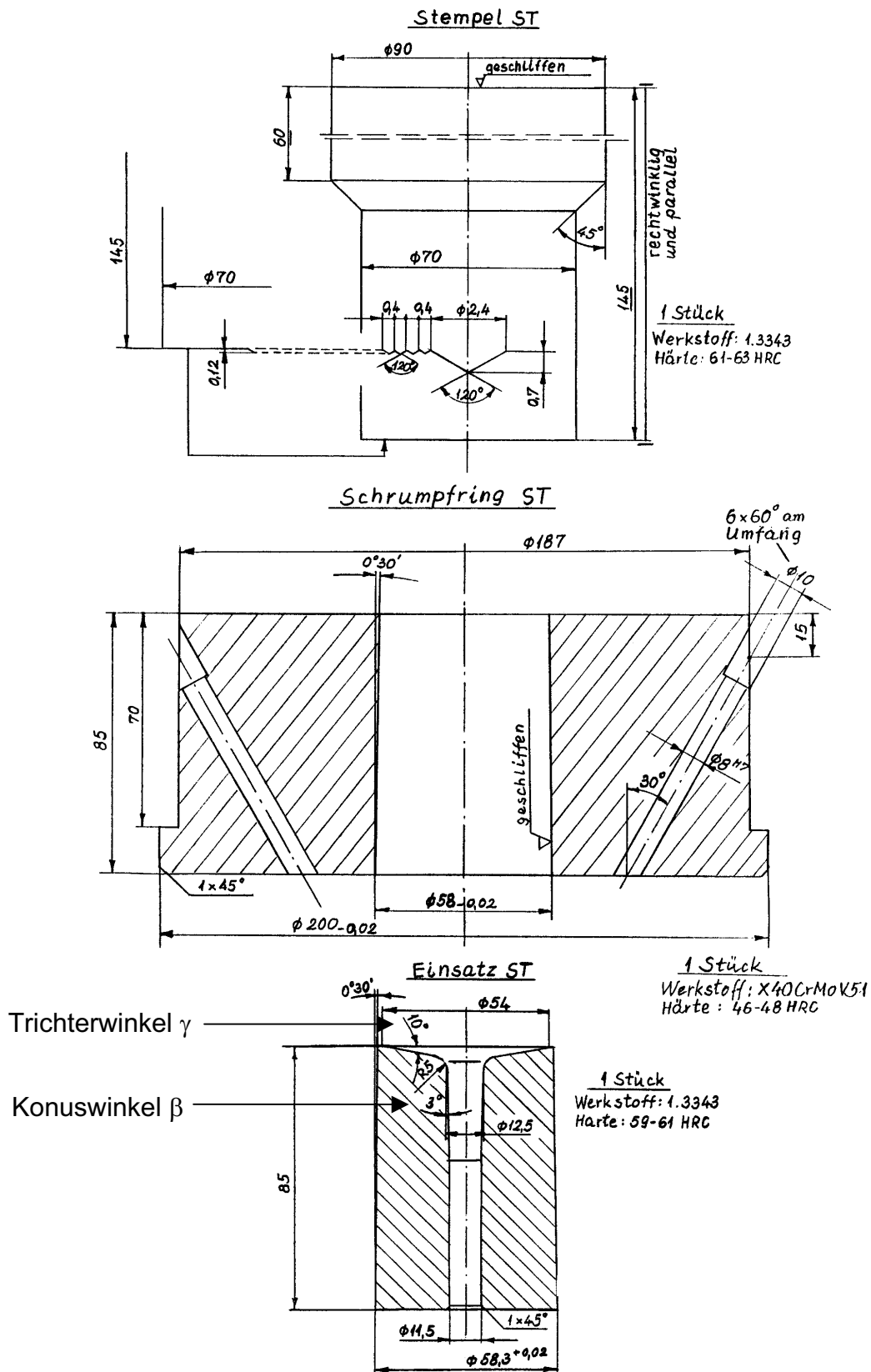


Bild 12.1 Werkzeuge für den Spiketest

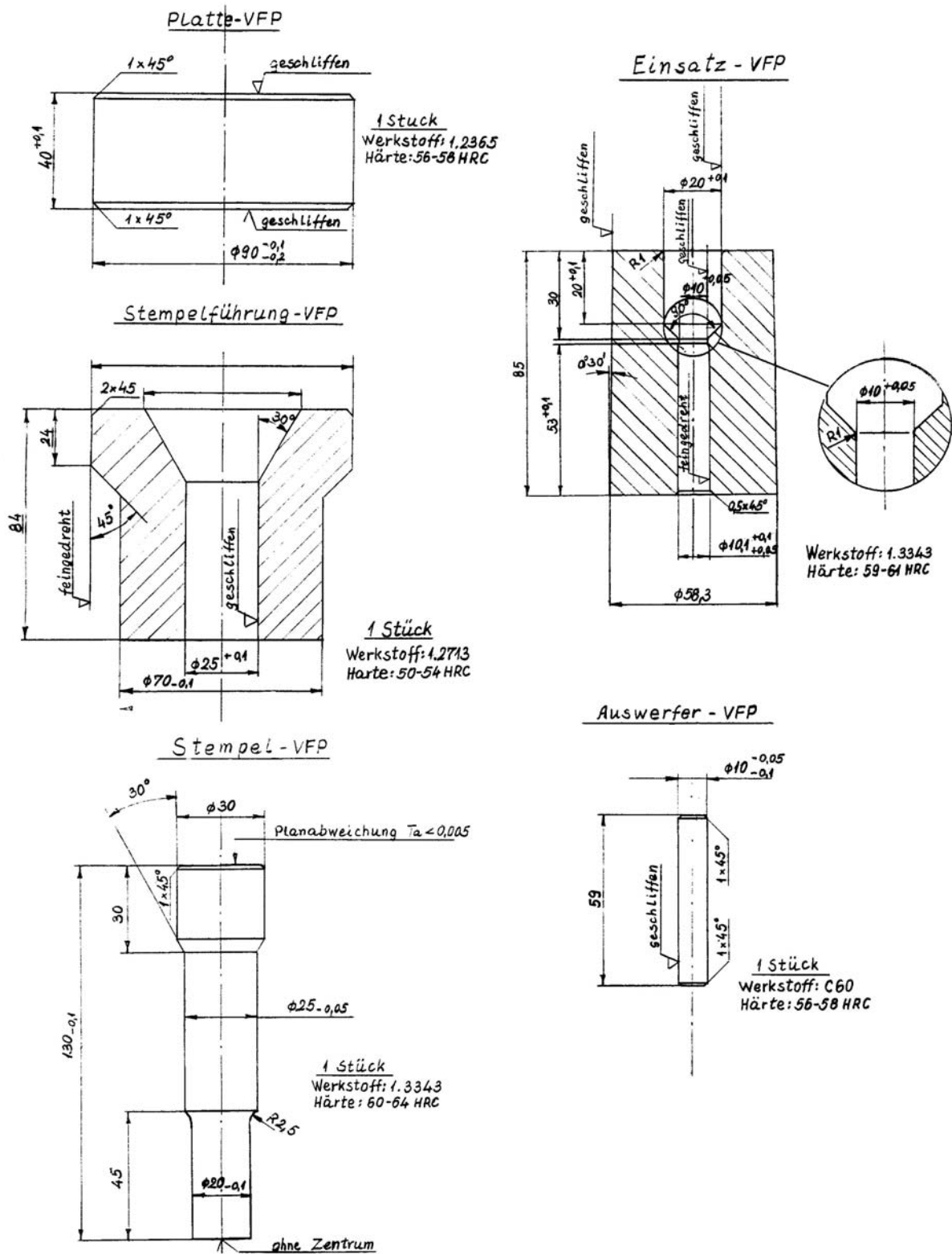


Bild 12.2 Werkzeuge für das Vorwärtsfließpressen

Maximale Preßkraft	6 MN
Pressenhub	148 mm
Verstellweg des Preßkopfs	50 mm
Hubzahl	20 - 42 /min
Aufspannplatte	630 x 900 mm
Preßschlitten	540 x 600 mm
Abstand der Säulen	650 mm
Durchmesser des Auswerfers	40 mm
Weg des Auswerfers	70 mm
Maximale Kraft des Auswerfers	350 kN

Tabelle 12.10 Technische Daten der Presse für Umformversuche

Rohteilgröße [mm]	Beschichtung	Menge [g/m ²]	Schmiermittel	Menge [g/m ²]
Ø 20 x 30	Phosphat	10	Ohne	0
			Graphit (FC400)	20
			MoS ₂ (MD15)	20
	Unbeschichtet	0	Ohne	0
Ø 25 x 30	Phosphat	10	Ohne	0
			Graphit (FC400)	20
			MoS ₂ (MD15)	20
	Unbeschichtet	0	Ohne	0

Tabelle 12.11 Spiketests mit unterschiedlicher Rohteilgröße (Serie A)

Beschichtung	Menge [g/m ²]	Schmiermittel	Menge [g/m ²]	Konuswinkel
Phosphat	13	Seife		1°
Rundes Strahlmittel	10	Graphit (FC400)	20	
		MoS ₂ (MD15)	20	
Unbeschichtet	0	Graphit (FC400)	20	
		MoS ₂ (MD15)	20	
Phosphat	13	Seife		
Rundes Strahlmittel	10	Graphit (FC400)	20	
		MoS ₂ (MD15)	20	
Unbeschichtet	0	Graphit (FC400)	20	
		MoS ₂ (MD15)	20	

Tabelle 12.12 Spiketests mit unterschiedlichem Konuswinkel der Matrize (Serie B)

Beschichtung	Menge [g/m ²]	Schmiermittel (Bezeichnung der Firma Acheson)	Menge [g/m ²]
Keine	0	Ohne	0
		Graphit (FC400)	57
		Graphit (FC402)	36
		MoS ₂ (MD15)	15
		MoS ₂ (MD16)	15
		MoS ₂ (MD25)	21
		Zinn (GO644)	24
		Kupfer (Flockig, in Öl, GO609C)	43
		Kupfer (Dendritisch, in Öl, GO608C)	40
		Öl	20
Phosphat	(20 µm)	Ohne	0
		Seife	
		Graphit (FC400)	57
		Graphit (FC402)	36
		MoS ₂ (MD15)	15
		MoS ₂ (MD16)	15
		MoS ₂ (MD25)	21
Rundes Strahlmittel	10,5	Ohne	0
		Graphit (FC400)	57
		Graphit (FC402)	36
		MoS ₂ (MD15)	15
		MoS ₂ (MD16)	15
		MoS ₂ (MD25)	21

Tabelle 12.13 Spiketests (Serie C)

Beschichtung	Menge [g/m ²]	Schmiermittel (Bezeichnung der Firma Acheson)	Menge [g/m ²]
Phosphat	(20 µm)	Seife	
Rundes Strahlmittel	4,9	Ohne	0
		Graphit (grob, FC400)	49
		Graphit (fein, FC402)	21
		MoS ₂ (MD15)	33
		MoS ₂ (MD16)	27
		MoS ₂ (MD25)	34
	14,9	Ohne	0
		Graphit (grob, FC400)	49
		Graphit (fein, FC402)	21
		MoS ₂ (MD15)	33
		MoS ₂ (MD16)	27
		MoS ₂ (MD25)	34
	19,3	Ohne	0
		Graphit (grob, FC400)	49
		Graphit (fein, FC402)	21
		MoS ₂ (MD15)	33
		MoS ₂ (MD16)	27
		MoS ₂ (MD25)	34
Kantiges Strahlmittel	9,6	Ohne	0
		Graphit (grob, FC400)	49
		Graphit (fein, FC402)	21
		MoS ₂ (MD15)	33
		MoS ₂ (MD16)	27
		MoS ₂ (MD25)	34

Tabelle 12.14 Spiketests (Serie D)

Beschichtung	Menge	Schmiermittel (Bezeichnung der Firma Acheson)	Menge [g/m ²]
Phosphat	13 g/m ²	Ohne	0
		Seife	
Rundes Strahlmittel	10,3 g/m ²	Ohne	0
	17 g/m ²		
	10,3 g/m ²	Graphit (FC402)	15
	17 g/m ²		
Kantiges Strahlmittel	8 g/m ²	Ohne	27
		Graphit (FC402)	15
Unbeschichtet	0	Ohne	0
		Graphit (FC402)	15
Galvanisch Zn sauer	10 µm	Ohne	0
Galvanisch Zn alk.	10 µm		
Galvanisch Zn/Fe	2 µm		
	5 µm		
	10 µm		
Galvanisch Zn/Ni	10 µm		
Galvanisch Zn sauer	10 µm	Graphit (FC402)	15
Galvanisch Zn alk.	10 µm		
Galvanisch Zn/Fe	2 µm		
	5 µm		
	10 µm		
Galvanisch Zn/Ni	10 µm		

Tabelle 12.15 Spiketests (Serie E)

Beschichtung	Menge [g/m ²]	Schmiermittel	Menge [g/m ²]
Phosphat	13	Seife	
Unbeschichtet	0	Graphit (FC400)	20
Rundes Strahlmittel	20	Ohne	0
	36		
	20	Graphit (FC400)	20
	36		
	20	MoS ₂ (MD15)	
	36		

Tabelle 12.16 *Spiketests mit veränderter Preßgeschwindigkeit (jeweils durchschnittlich 70 und 200 mm/s, Serie F)*

Beschichtung	Menge [g/m ²]	Schmiermittel	Menge [g/m ²]
Unbeschichtet	0	Graphit (FC400)	10
			30
			60
		Graphit (FC402)	10
			30
			60
		MoS ₂ (MD15)	10
			30
			60
Rundes Strahlmittel	10	Graphit (FC400)	10
			30
			60
		Graphit (FC402)	10
			30
			60
		MoS ₂ (MD15)	10
			30
			60

Tabelle 12.17 *Spiketests mit unterschiedlicher Schmiermittelmenge (Serie G)*

Beschichtung	Menge [g/m ²]	Schmiermittel	Menge [g/m ²]	Gesenkschmiermittel
Phosphat	13	Seife		ohne
Unbeschichtet	0	Ohne	0	
		Graphit (FC400)	20	
		MoS ₂ (MD15)	20	
Rundes Strahlmittel	10	Ohne	0	Graphit
Unbeschichtet	0	Ohne	0	
		Graphit (FC400)	20	
		MoS ₂ (MD15)	20	
Rundes Strahlmittel	10	Ohne	0	

Tabelle 12.18 *Spiketests mit Gesenkschmiermittel (Serie H)*

Beschichtung	Menge [g/m ²]	Schmiermittel	Menge [g/m ²]
Phosphat	13	Seife	
Rundes Strahlmittel	10	Graphit (FC400)	20
		MoS ₂ (MD15)	
Unbeschichtet	0	Graphit (FC400)	
		MoS ₂ (MD15)	

Tabelle 12.19 *Vorwärtsfließpressen mit unterschiedlichen Beschichtungen (Serie J, mechanische Presse)*

Beschichtung	Menge [g/m ²]	Schmiermittel	Menge [g/m ²]
Phosphat	10	Seife	
Rundes Strahlmittel	2,3	Graphit (FC400)	23
	4,2		
	11,3		
	20,0		

Tabelle 12.20 *Vorwärtsfließpressen mit unterschiedlichem Schichtgewicht der mechanischen Beschichtung (Serie K, hydraulische Presse)*

Firma	Werkstücke	Maße des Rohteils [mm]	Gewicht [g]	Werkstoff	Menge	Fließpreßvorgang
Hirschvogel	Getriebe- welle	Ø 38 x 252,7	2290	16 MnCrS5	165800	vorwärts
	Deckel	Ø 56 x 41,8	810	20 MnCr5	5300	quer
	Deckel	Ø 43 x 36	410	14 MnCrBS 44	13800	quer
	Achszapfen	Ø 34 x 72,8	51	42 CrMoS4	54440	vorwärts und quer
	Welle	Ø 42 x 80,3	886	C 45	42920	vorwärts
	Getriebe- welle	Ø 36 x 260	2300	16 MnCrS5	160	vorwärts
Ascoforge	Achszapfen	Ø 32 x 61,5	390	27MnCr5	1395	vorwärts und quer
	Getriebe- welle	Ø 36,1 x 259,7	2028	27MnCr5	1000	vorwärts
	Gleichlauf- gelenk	Ø 77,3 x 41,4	1515	27MoCr4	1500	rückwärts
Sidenor	Ventilfeder- teller	Ø 24 x 8	31	12NC3	4000	vorwärts, quer und Lochen
Nedschroef	Schrauben	Draht Ø 8	17,6	34Cr4	40000	vorwärts und quer

Tabelle 12.21 Umformversuche in industrieller Praxis

13 Formelzeichen

a	Beschleunigung
A	Fläche, allgemein
A_A	Beim Aufprall betroffene Fläche der Probe
A_B	Beschichtete Fläche
A_C	Fläche, auf die Beschichtungsmaterial aufgetragen werden kann
A_{DL}	In Druckluft-Strahlversuchen behandelte Fläche
A_K	Beim Aufprall betroffene Fläche des Strahlmittelteilchens
A_m	In industriellen Strahlanlagen behandelte Fläche
A_S	Querschnittsfläche der Strahlmittelteilchen
A_U	Fläche, die bei gegebenen Strahlparametern noch beschichtbar ist
A_0	Gesamtoberfläche der Probe
A_{D_0}	Horizontale Querschnittsfläche des Rohteils für den Spiketest
A_{D_1}	Horizontale Querschnittsfläche der Spikespitze in Höhe des Matrizentrichters
b_B	Mittlere Breite der Bruchstücke der Schale der Strahlmittelteilchen
c_p	Spezifische isobare Wärmekapazität
c_W	Widerstandsbeiwert der Strahlmittelteilchen
\bar{d}_B	Mittlere rechnerische Schichtdicke
d_D	Durchmesser der Druckluftdüse
\bar{d}_S	Mittlere flächenbezogene Schichtdicke
D_A	Durchmesser der Kontaktfläche zwischen Strahlmittelteilchen und Probenoberfläche
D_G	Mittlerer Durchmesser des gerundeten Abschnitts der Spikespitze
D_M	Durchmesser einer Scheibe mit dem Volumen des Spiketellers
D_P	Durchmesser des äußeren Endes der Spikespitze

D_R	Durchmesser der Schleuderräder in industriellen Strahlanlagen
D_S	Durchmesser der Strahlmittelteilchen
D_T	Mittlerer Durchmesser des Spiketellers
D_{Ti}	Durchmesser des zylindrischen Abschnitts des Spiketellers
D_{Ta}	Außendurchmesser des Spiketellers
D_0	Durchmesser des Rohteils für den Spiketest
D_1	Innendurchmesser des Matrizentrichters für den Spiketest
D_γ	Außendurchmesser des gerundeten Abschnitts der Spikespitze
e_A	Spezifische Energie beim Auftrag von Beschichtungsmaterial
e_0	Schwellwert der spezifischen Energie für den Auftrag von Beschichtungsmaterial
E	Kinetische Energie der Strahlmittelteilchen
E_A	Aufprallenergie der Strahlmittelteilchen
E_B	Energie, die zur Haftung des Beschichtungsmaterials beiträgt
E_U	Umformarbeit bei Auftrag der Beschichtung
E_v	Kinetische Energie der Strahlmittelteilchen
f_B	Flächenbedeckung der Beschichtung
F	Kraft, allgemein
F_G	Gesamte Umformkraft
F_P	Schubkraft in der Umformzone
F_R	Kraft durch Reibung bei der Umformung
F_S	Sättigungswert der Flächenbedeckung der Beschichtung
F_U	Kraft zur reibungsfreien Umformung
F_W	Luftwiderstandskraft der Strahlmittelteilchen
h_A	Höhe einer Scheibe mit dem Volumen des Spiketellers
h_B	Mittlere Höhe der Bruchstücke der Schale der Strahlmittelteilchen

h_K	Höhe des äußeren Endes der Spikespitze
h_P	Höhe des geraden Abschnitts der Spikespitze
h_R	Höhe des gerundeten Abschnitts der Spikespitze
h_S	Maximale Dicke der Beschichtungspartikel
h_T	Höhe des zylindrischen Abschnitts des Spiketellers
h_1	Höhe des Spalts zwischen Stempel und Matrize beim Spiketest
h_γ	Höhe des konischen Abschnitts des Spiketellers
H_0	Höhe des Rohteils für den Spiketest
H_1	Höhe des zylindrischen Abschnitts des Rohteils für den Spiketest
H_2	Höhe des konischen Abschnitts des Rohteils für den Spiketest
i	Impuls eines Strahlmittelteilchens
i_A	Impuls der Strahlmittelteilchen senkrecht zur Probenoberfläche
i_v	Gesamtimpuls der Strahlmittelteilchen
k	Konstante für den Einfluß der Strahlzeit auf die Flächenbedeckung
k_A	Konstante für den Einfluß des Strahlwinkels auf die Flächenbedeckung (Energiedichte für die Probenoberfläche)
k_f	Formänderungsfestigkeit
k_{fm}	Mittlere Formänderungsfestigkeit
k_S	Konstante für den Einfluß des Strahlwinkels auf die Flächenbedeckung (Energiedichte für das Strahlmittelteilchen)
k_v	Konstante für den Einfluß der kinetischen Energie der Strahlmittelteilchen auf die Flächenbedeckung
l_A	Länge der Kontaktfläche zwischen Strahlmittelteilchen und Probenoberfläche
l_B	Mittlere Länge der Bruchstücke der Schale der Strahlmittelteilchen
\dot{m}_{DL}	Strahlmittel-Durchsatz in Druckluft-Strahlversuchen
\overline{m}_{DL}	Strahlmittel-Durchsatz in Druckluft-Strahlversuchen, bezogen auf die behandelte Fläche
\dot{m}_m	Strahlmittel-Durchsatz in industriellen Strahlanlagen

\bar{m}_m	Strahlmittel-Durchsatz in industriellen Strahlanlagen, bezogen auf die behandelte Fläche
m_S	Spezifisches Schichtgewicht der Beschichtung
M_A	Masse des aufgetragenen Beschichtungsmaterials
M_B	Mittlere Masse der Bruchstücke der Schale der Strahlmittelteilchen
M_P	Masse der beschichteten Probe
M_S	Mittlere Masse eines Strahlmittelteilchens
M_0	Masse der unbeschichteten Probe
N_A	Anzahl der aufprallenden Strahlmittelteilchen
N_M	Spezifische Anzahl der Strahlmittelteilchen
N_R	Umdrehungszahl der Schleuderräder in industriellen Strahlanlagen
p	Druck, allgemein
p_{DL}	Druck der Druckluft
p_0	Umgebungsdruck (Normaldruck)
R	Gaskonstante
R_M	Radius des Matrizentrichters
R_S	Radius des äußeren Endes der Spikespitze
R_T	Radius des Außenkante des Spiketellers
s_{DL}	Weg des Luftstroms
s_F	Flugweg der Strahlmittelteilchen in industriellen Strahlanlagen
t	Strahlzeit
v	Geschwindigkeit, allgemein
v_A	Aufprallgeschwindigkeit der Strahlmittelteilchen in industriellen Strahlanlagen
v_{aus}	Geschwindigkeit der ausströmenden Druckluft
v_b	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Luftstrom und Strahlmittelteilchen
v_{DL}	Geschwindigkeit der komprimierten Druckluft

v_S	Aufprallgeschwindigkeit der Strahlmittelteilchen beim Druckluft-Strahlen
v_0	Anfangsgeschwindigkeit der Strahlmittelteilchen in mechanischen Strahlanlagen
V	Volumen, allgemein
V_A	Volumen des Spiketellers
V_B	Mittleres Volumen der Bruchstücke der Schale der Strahlmittelteilchen
V_{DL}	Volumen der komprimierten Druckluft
V_{Luft}	Volumen der Luft bei Normaldruck
V_P	Volumen des konischen Abschnitts der Spikespitze
V_R	Volumen des gerundeten Abschnitts der Spikespitze
V_0	Volumen des Rohteils für den Spiketest
w	Spezifische Formänderungsarbeit
z	Faktor für Strömungsverhältnisse

α	Strahlwinkel
β	Konuswinkel der Matrize für den Spiketest
γ	Trichterwinkel der Matrize für den Spiketest
η_A	Anteil des aufgetragenen Beschichtungsmaterials an der Masse der Bruchstücke des Schalenmaterials
η_F	Formänderungswirkungsgrad
η_S	Effektivitätsfaktor zwischen Druckluft-Strahlversuchen und industriellen Strahlanlagen
μ	Reibungskoeffizient
ρ	Dichte, allgemein
ρ_{DL}	Dichte der komprimierten Druckluft
ρ_{Luft}	Dichte der Luft bei Normaldruck
ρ_S	Dichte des Beschichtungsmaterials
σ	Spannung
φ_B	Umformgrad beim Auftrag der Beschichtungspartikel
φ_D	Umformgrad des Vorwärtsfließpressens beim Spiketest
φ_H	Umformgrad des Querfließens beim Spiketest
χ	Isentropenexponent

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Zeitraum von Juli 1999 bis April 2003 am Institut für Physikalische Metallkunde der Technischen Universität Darmstadt angefertigt. Sie entstand im Rahmen des BRITE/EURAM-Projektes „Effective ecologically beneficial process for surface coating and lubrication of steels in cold forging (HEPSCOS)“ in Zusammenarbeit mit den Firmen Acheson Colloiden B. V., Niederlande; Acheson France S. A., Ascoforge Safe S. A. und Ascométal Creas, Frankreich; Hirschvogel Eisenach GmbH; Nedschroef Helmond B.V., Niederlande sowie Sidenor S. A., Spanien.

Mein Dank gilt

Herrn Professor Dr. H. E. Exner für die Möglichkeit, diese Arbeit an seinem Institut durchführen zu können sowie für sein Interesse und seine Diskussionsbereitschaft,

Herrn Professor Dr. H. M. Ortner für die Möglichkeit, an seinem Institut verschiedene Untersuchungen durchführen zu können sowie für sein Interesse und die Übernahme des Mitberichts,

Herrn Dr. C. Müller für sein Interesse, seine Unterstützung und die vielen richtungsweisenden Diskussionen,

Herrn Dr. S. Sheljaskow für die Anregung des Projektes, sein Interesse und seine vielfältige Unterstützung,

Herrn Dr. R. Blümke, Herrn Dr. O. Pompe und Herrn Dr. M. Rettenmayr für ihr Interesse und die zahlreichen Diskussionen,

Herrn Dr. D. M. Kok, Herrn Dr. J. M. Kieffer, Herrn Dr. H. Gankema, Herrn M. Robelet, Herrn M. Koutzevol, Herrn Dr. F. Schmieder, Herrn Dr. H. Nägele, Herrn F. Kersten, Herrn Dr. R. Hop sowie Herrn C. Bertrand für die gute Zusammenarbeit innerhalb des Projektes,

Herrn Dr. M. Silomon und der Firma Atotech GmbH für die galvanische Verzinkung, Frau Dr. C. Brockmann, Frau J. Saroukh, Herrn Dr. S. Flege und Herrn Dr. M. Heck für die Unterstützung bei den Untersuchungen am Institut für Chemische Analytik,

Frau P. Neuhäusel, Frau C. Wasmund und Herrn H. Lehmann für die Unterstützung bei der Probenpräparation und dem Aufbau der Versuchseinrichtungen,

Herrn J. Korzer und seinen Mitarbeitern für die Herstellung der Meßeinrichtung und die Unterstützung beim Aufbau der Versuchseinrichtungen,

Frau F. Rüggeberg, Herrn S. Weber und Herrn C. Körber für die Probenpräparation, sowie allen Mitarbeitern des Instituts für Physikalische Metallkunde für die gute Zusammenarbeit.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, daß ich meine Dissertation selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe.

Ich habe bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen.

Darmstadt, 15. Mai 2003

Peter Marx