

Einfluss des Strahlmittels beim Druckluftstrahlen

Am Beispiel der Entlackung von definiert lackierten Werkstücken wurde der Einfluss des Strahlmittels auf das Bearbeitungsergebnis untersucht. Dabei wurden auch die Entlackungskosten bewertet.

In der Industrie wird das Druckluftstrahlen mit festen Strahlmitteln hauptsächlich zur Vorbehandlung von Metalloberflächen für nachfolgende Beschichtungsprozesse sowie zur Reinigung für die Wieder- und Weiterverwendung von Erzeugnissen eingesetzt. Dazu werden je nach Anwendungsfall Strahlmittel unterschiedlicher Härte beigemischt. Der Einfluss des Strahlmittels auf das Bearbeitungsergebnis kann durch Reinigungsleistung, die Randzonenbeeinflussung sowie die Oberflächenrauheit und -topographie des Strahlgutes bestimmt werden.

Anhand von Untersuchungen zum Entfernen von auf unterschiedlichen Werkstoffen definiert aufgetragenen Lackschichten, wurden am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin verschiedene Strahlmittel technologisch und wirtschaftlich verglichen. Dabei wurden die beständigen Strahlmittel runder und kantiger Stahlguss, Glasperlen, Normalkorund und Duroplast sowie das flüchtige Strahlmittel Trockeneis in seiner charakteristischen Pelletform untersucht.

Technologische Grundlagen

Druckluftstrahlen mit festen Strahlmitteln

Das Druckluftstrahlen mit festen Strahlmitteln wird zur Bearbeitung von Oberflächen eingesetzt. Der Abtrag des Strahlgutes erfolgt durch ein dem Druckluftstrahl beigemischt Strahlmittel. Die Beimischung des Strahl-

mittels in den Druckluftstrom erfolgt mittels zwei Prinzipien. Zum einen kann das Strahlmittel aus einem unter Druck stehenden Behälter über ein Dosierventil zugeführt werden, zum anderen kann es durch die Verwendung einer Injektordüse drucklos angesaugt werden. Das Strahlmittel wird durch den Druckluftstrahl in Richtung des Strahlgutes beschleunigt. Durch den Aufprall des Strahlmittels auf die zu bearbeitende Oberfläche des Strahlgutes kann

- ◆ beim Reinigungsstrahlen der Oberflächenzustand des Strahlgutes,
- ◆ beim Oberflächenveredelungsstrahlen die Rauheit der Oberfläche,
- ◆ beim Verfestigungsstrahlen die mechanischen Eigenschaften in der Oberflächenrandzone und
- ◆ beim Umformstrahlen die Strahlgutform verändert werden.

Das Druckluftstrahlen mit festen Strahlmitteln zeichnet sich neben den geringen Investitionskosten und der hohen Flexibilität hinsichtlich der Strahlmittelauswahl auch durch einfache Wartung und schnellen Strahlmittelwechsel aus.

Druckluftstrahlen mit beständigen Strahlmitteln

Das Druckluftstrahlen mit festen beständigen Strahlmitteln erfolgt meist bei Drücken zwischen 2 und 8 bar. Abhängig von der zu entfernenden Schicht ist der Strahl in unterschiedlichen Winkeln auf die Oberfläche zu richten. Bei stark haftenden Deckschichten wie Rost wird möglichst senkrecht gestrahlt, für leicht haftende Deckschichten bieten sich flachere Auftreffwinkel an.

Strahlmittel werden nach Härte, Körnung, Form und Werkstoff klassifiziert. Abhängig vom Härteverhältnis zwischen Strahlgut und Strahlmittel wird das Strahlgut beim Auftreffen des

Strahlmittels auf die Oberfläche abgetragen.

Trockeneisstrahlen

Das Trockeneisstrahlen ist ein Druckluftstrahlverfahren, bei dem festes Kohlendioxid in Form von Pellets als Strahlmittel verwendet wird. Da dieses beim Aufprallen auf die Strahlgutoberfläche vollständig sublimiert, gilt das Trockeneisstrahlen im Vergleich zu konventionellen Strahl- und Reinigungsverfahren als umweltverträglicher und ist eine wirtschaftliche und ökologische Alternative zu diesen. Im Gegensatz zu anderen Verfahren verbleiben beim Trockeneisstrahlen nach dem Strahlen nur die vom Strahlgut abgetragenen Rückstände, wodurch die Entsorgungskosten erheblich reduziert werden.

Die Trockeneis pellets werden bei Drücken von 2 bis 24 bar beschleunigt und treffen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 300 m/s auf die Strahlgutoberfläche /VIS97/. Beim Aufprall der 78,5°C kalten Trockeneis pellets auf die Werkstückoberfläche kommt es zu einer lokalen Unterkühlung des Bauteils. Auf Grund von unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der zu entfernenden Schicht und des Grundmaterials versprödet die Beschichtung, die Bindungskräfte zwischen Grundwerkstoff und Beschichtung werden herabgesetzt und die Schicht platzt partiell ab. Durch die kinetische Energie der Trockeneis pellets und des Druckluftstroms wird die Schicht abgetragen. Die schlagartige Volumenzunahme der Trockeneis pellets bei der Sublimation um das 800fache und der dadurch entstehende Druckstoß unterstützt den Abtragprozess zusätzlich /HAB99/.

Die CO₂-Pellets besitzen eine Mohs-Härte von zirka 2 bis 3 Mohs, welche der Härte von Gips entspricht. Die Härteinteilung nach Mohs ordnet Mineralien in der Art, dass ein Material

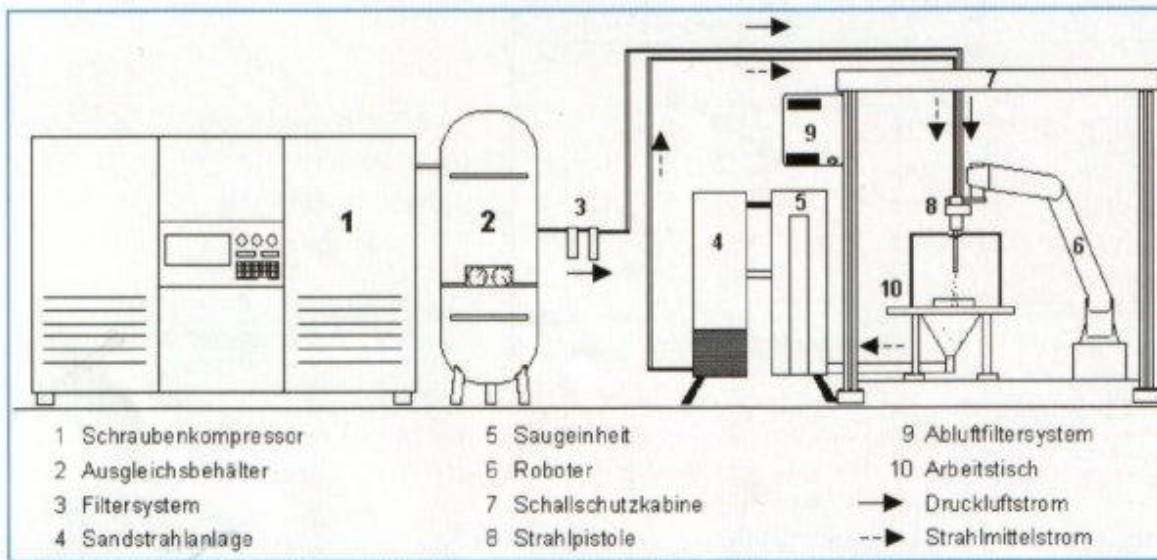


Bild 1: Versuchsaufbau zum Druckluftstrahlen mit beständigen Strahlmitteln

mit einer höheren Mohs-Härte das Material mit der niedrigeren Mohs-Härte ritzen kann. Auf Grund der geringen Härte von Trockeneispellets im Vergleich zu anderen festen Strahlmitteln, Normalkorund hat beispielsweise eine Mohs-Härte von 9, wirkt das Verfahren wenig abrasiv /DON91b/.

Versuchsbedingungen

Versuchsstand

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem Versuchsstand am IWF durchgeführt. Der Aufbau des Versuchsstands gliedert sich in Druckluftstation, Arbeitsstation und Strahleneinheit (Bild 1).

Die Druckluftstation besteht aus Druckluftherzeugung, Ausgleichsbehälter und Filterpatrone. Für die Druckluftherzeugung wurde ein einstufiger Schraubenkompressor DSB 170 der Firma Kaeser Kompressoren GmbH, Coburg, eingesetzt. Zur Sicherstellung eines konstanten Ausgangsdrucks und Volumenstroms ist dem Kompressor ein Ausgleichsbehälter nachgeschaltet. Eine Mikro- und Aktivkohlefilterpatrone reinigt die Druckluft.

Zur Arbeitsstation zählen ein Roboter mit Steuerung, ein Arbeitstisch und eine Schallschutzkabine mit Absaugeinrichtung. Durch den Einsatz des Roboters werden die Einstellparameter Strahlabstand, Auftreffwinkel und Vorschubgeschwindigkeit konstant gehalten. Zum Einsatz kam ein nume-

risch gesteuerter 6-Achsen-Gelenkroboter des Typs r3 der Firma Mantic. Der Arbeitstisch kombiniert eine auf einem Gitterrost befestigte Probenaufnahme mit einem Auffangtrichter für das Strahlmittel und einer Kapselung. Die Kapselung wurde nur bei Versuchen mit beständigen Strahlmitteln eingesetzt, um Bediener und Umgebung vor entstehenden Stäuben zu schützen.

Für die Bearbeitung mit beständigen und flüchtigen Strahlmitteln wurden unterschiedliche Strahleinheiten eingesetzt. Für beständige Strahlmittel kam eine modifizierte, nach dem Injektorsystem arbeitende Sandstrahlanlage Abras 270 der Firma Leering, Hengelo/Niederlande, zum Einsatz. Sie hat eine Turbinenleistung von 800 W, einen Luftbedarf von 350 bis 800 l/min und einen erforderlichen Druck von 3 bis 8 bar. Der Strahlmittelmassenstrom ist nicht separat einstellbar und hängt vom Strahlruck ab. Das Strahlmittel wird mit einem Zyklon von Staub getrennt und so zur Wiederverwendung zurückgewonnen.

Beim Strahlen mit beständigen Strahlmitteln wurde eine Strahldüse aus Hartmetall mit einem Innendurchmesser von 7,6 mm verwendet. Beim Strahlen mit flüchtigem Strahlmittel wurde eine nach dem Druckstrahlprinzip arbeitende Trockeneisstrahlanlage des Typs Micro Jet der Firma Green Tech, Hofolding, eingesetzt. Die manuell zuzuführenden Trockeneispellets fallen in eine rotierende Loch-

scheibe, durch die sie dem Druckluftstrom zudosiert werden. Für die Trockeneisstrahlversuche wurde eine Laval-Hochleistungsdüse mit einer Gesamtlänge von 340 mm verwendet.

Strahlproben

Im Rahmen der Versuche wurden metallische Strahlgutproben definierter Geometrie bearbeitet. Es wurde Flachstahl DC01 A, Chrom-Nickel-Stahl

X5CrNi 18-10 und Aluminiumknetlegierung AlMg3 untersucht.

Die verwendeten Strahlgutproben wurden von der Firma Die Oberfläche GmbH, Berlin, mit einem Einbrennlack von 100µm Dicke beschichtet. Zur Anwendung kam ein wärmestabiler Decklack auf Acrylatharzbasis Finadur 781 der Firma Mankiewicz Gebr. & Co., Hamburg. Der Lack härtet ab einer Temperatur des Basiswerkstoffes von 120 °C aus. Die Einbrenndauer betrug 30 Minuten bei einer Temperatur von 160 °C.

Strahlmittel

Strahlmittel können aus metallischen, mineralischen oder organischen Werkstoffen hergestellt werden. Es wird zwischen Umlaufstrahlmitteln und Einwegstrahlmitteln unterschieden. Umlaufstrahlmittel sind Strahlmittel, die im Umlaufverfahren mehrfach wiederverwendet werden können. Hierzu zählen alle metallischen und einige organische Strahlmittel. Einwegstrahlmittel sind mineralische und organische Strahlmittel, die auf Grund des starken Zerschlagens der Strahlmittelkörner nur einmal verwendet und anschließend gemeinsam mit der abgetragenen Verunreinigung entsorgt werden. Strahlmittelkörner sind kantig, kugelförmig oder zylindrisch. Für die Untersuchung mit beständigen Strahlmitteln wurden die metallischen Strahlmittel Stahlguss kantig und rund mit einer Korngröße zwischen 0,12 und 0,42 mm, die mineralischen Strahlmit-

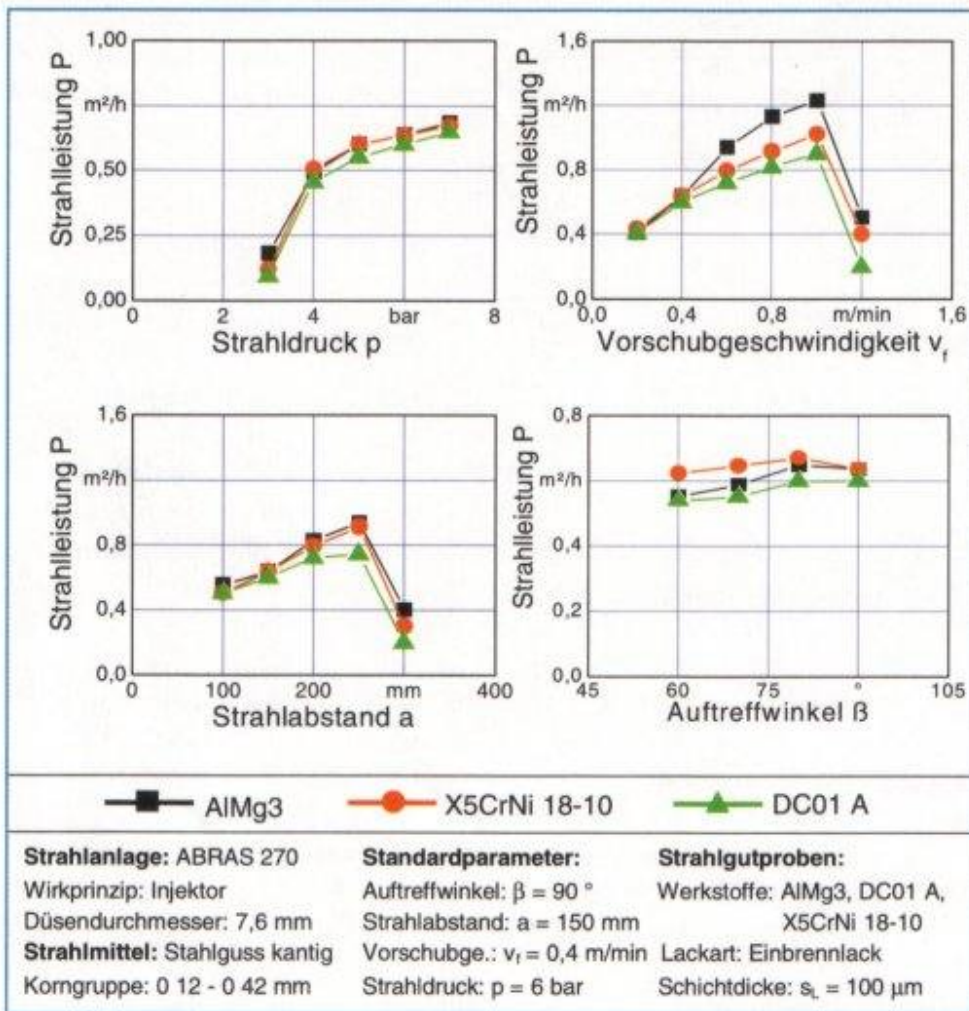


Bild 2: Reinigungsleistung nach der Bearbeitung mit Stahlguss kantig in Abhängigkeit von den Einstellparametern

tel Glasperlen und Normalkorund mit einer Korngröße zwischen 0,40 und 0,84 mm und das organische Strahlmittel Duroplast mit einer Korngröße zwischen 0,20 und 0,60 mm verwendet.

Als flüchtiges Strahlmittel für die Trockeneisstrahlversuche wurden zylindrische Trockeneispellets der Firma Messer-Griessheim mit einem Durchmesser von 3,0 mm, einer mittleren Länge von 6,7 mm, einem Schüttgewicht von 817 kg/m³ und einer Dichte von 1100 kg/m³ verwendet.

Einstellparameter

Im Rahmen der technologischen Untersuchungen wurden die Parameter Vorschubgeschwindigkeit, Arbeitsabstand, Auftreffwinkel und Strahlendruck als relevante Einstellparameter definiert. Die Versuchspläne wurden nach der Einfaktor-Methode erstellt, das heißt ein Parameter wird variiert, während die anderen in einer Standardeinstellung bleiben. Die Standardparameter wurden aus Voruntersu-

chungen abgeleitet. Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der Einflüsse der Parameter auf die Reinigungsleistung, die Oberflächenrauheit und -topographie sowie auf die Randzone. Die Standardparametereinstel-

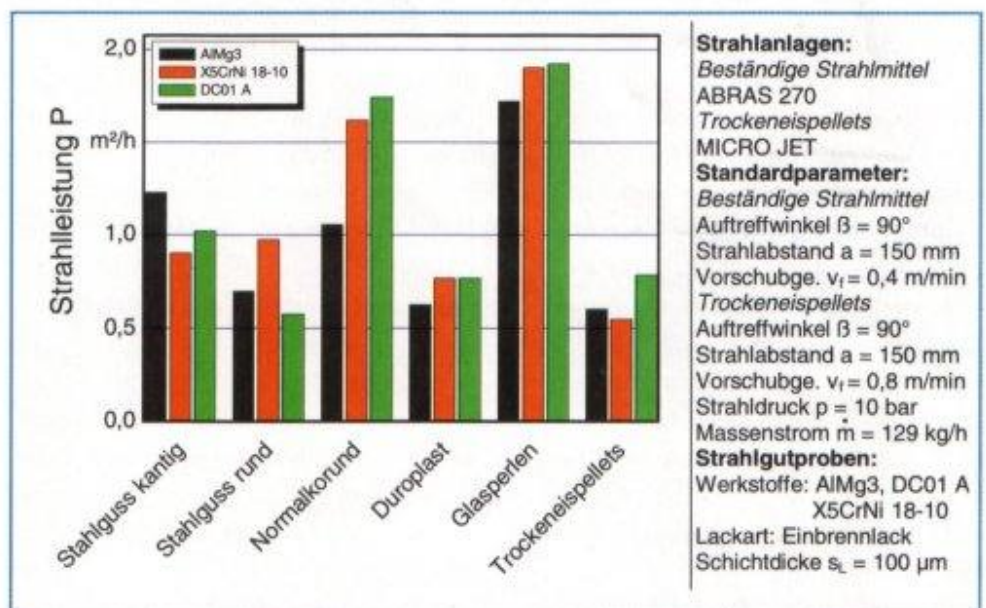


Bild 3: Maximal erzielte Reinigungsleistungen nach Bearbeitung von AlMg3, X5CrNi 18-10 und DC01 A mit den untersuchten Strahlmitteln

Auftreffwinkel β	90°
Strahlabstand a	150 mm
Vorschubgeschwindigkeit v_f	0,4 m/min
Strahlendruck p	6 bar

Standardparametereinstellungen für die Bearbeitung mit beständigen Strahlmitteln

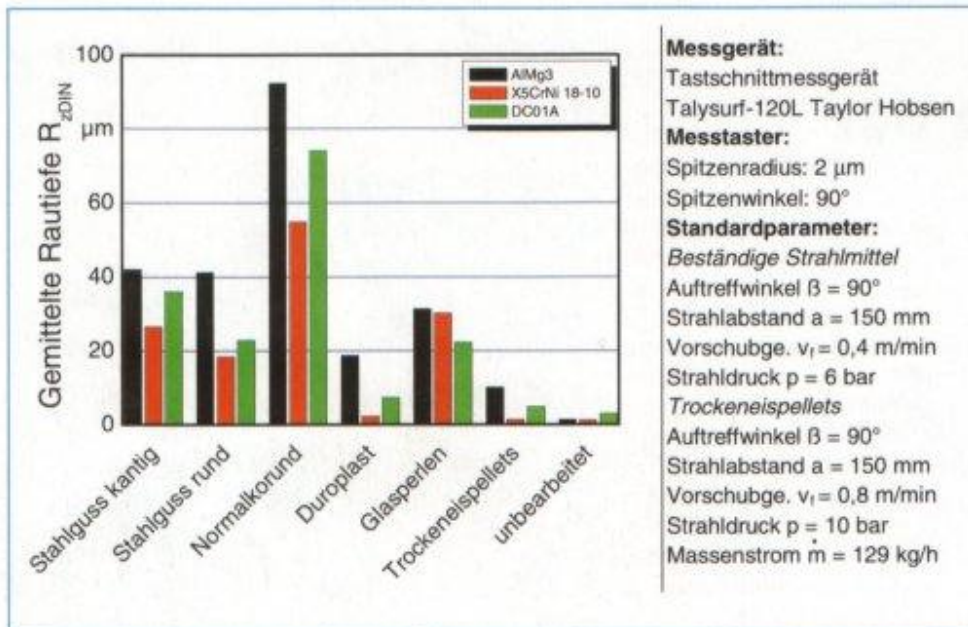
lungen für die beständigen Strahlmittel sind in der Tabelle dargestellt.

Auf Grund der aus Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurde beim Trockeneisstrahlen auf die Variation der Parameter Strahlendruck und Strahlauftreffwinkel verzichtet. Es wurde mit einem Strahlendruck von 10 bar sowie einem Auftreffwinkel von 90° gearbeitet. Der Strahlabstand wurde im Bereich zwischen 120 mm und 180 mm in drei diskreten Schritten variiert.

Versuchsergebnisse

Einfluss der Einstellparameter auf die Reinigungsleistung

Ausgehend von den Standardparametereinstellungen für Strahlendruck, Vorschubgeschwindigkeit, Strahlabstand und Strahlauftreffwinkel wurde für jedes Strahlmittel der Einfluss der



Messgerät:
Tastschnittmessgerät
Talysurf-120L Taylor Hobson

Messtaster:
Spitzenradius: 2 μm
Spitzenwinkel: 90°

Standardparameter:
Beständige Strahlmittel
Auftreffwinkel $\beta = 90^\circ$
Strahlabstand $a = 150$ mm
Vorschubge. $v_f = 0,4$ m/min
Strahlruck $p = 6$ bar

Trockeneispellets
Auftreffwinkel $\beta = 90^\circ$
Strahlabstand $a = 150$ mm
Vorschubge. $v_f = 0,8$ m/min
Strahlruck $p = 10$ bar
Massenstrom $\dot{m} = 129$ kg/h

Bild 4: Vergleich der gemittelten Rautiefe R_{zDIN} nach Bearbeitung von AlMg3, DC01 A und X5CrNi 18-10 mit den untersuchten Strahlmitteln bei Standard-einstellungen

Parameter auf die Reinigungsleistung ermittelt. Dabei war zu beobachten, dass sich die Abhängigkeiten für die beständigen Strahlmittel gleichen. Zur Veranschaulichung stellt Bild 2 die Ergebnisse für das Strahlmittel Stahlguss kantig dar.

Der Einfluss des Strahlrucks auf die Reinigungsleistung ist für die untersuchten Strahlgutproben ähnlich. Nach einem steilen Anstieg zwischen 2 bar und 4 bar verlaufen die Kurven zwischen 4 bar und 8 bar flacher. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit steigt die Reinigungsleistung im untersuchten Einstellbereich bis 1,0 mm/min degressiv an. Danach fällt sie steil ab. Im Vorschubgeschwindigkeitsbereich zwischen 0,4 m/min und 0,6 m/min ist der Anstieg bei AlMg3 wesentlich steiler als bei den anderen Werkstoffen. Abhängig vom Strahlabstand haben die Kurven der drei untersuchten Werkstoffe bis zu einem Strahlabstand von 200 mm annähernd den gleichen Verlauf. Bei einem Strahlabstand zwischen 200 mm und 250 mm steigt die Reinigungsleistung bei DC01 A nur noch geringfügig, bei AlMg3 und X5CrNi 18-10 hingegen steiler. Bei weiterer Erhöhung des Strahlabstands fällt die Reinigungsleistung rasch ab. Bei der Untersuchung des Auftreffwinkels in einem Einstellbereich von 60° bis 90° wurden keine

wesentliche Auswirkungen auf die Strahlleistung festgestellt.

Bild 3 stellt für alle Strahlmittel die maximal erzielten Reinigungsleistungen in Abhängigkeit vom Strahlgutwerkstoff dar. Eine Abhängigkeit der Reinigungsleistung vom Strahlmittel und dem bearbeiteten Werkstoff ist deutlich zu erkennen. Die größte erzielte Reinigungsleistung von 1,92 m²/h wurde mit Glasperlen

bei dem Strahlgutwerkstoff DC01 A erzielt. Mit dem Strahlmittel Stahlguss rund wurden bei DC01 A die niedrigsten Reinigungsleistungen bei beständigen Strahlmitteln erreicht. Sie liegen im Bereich der mit Trockeneisstrahlen erzielten Reinigungsleistungen.

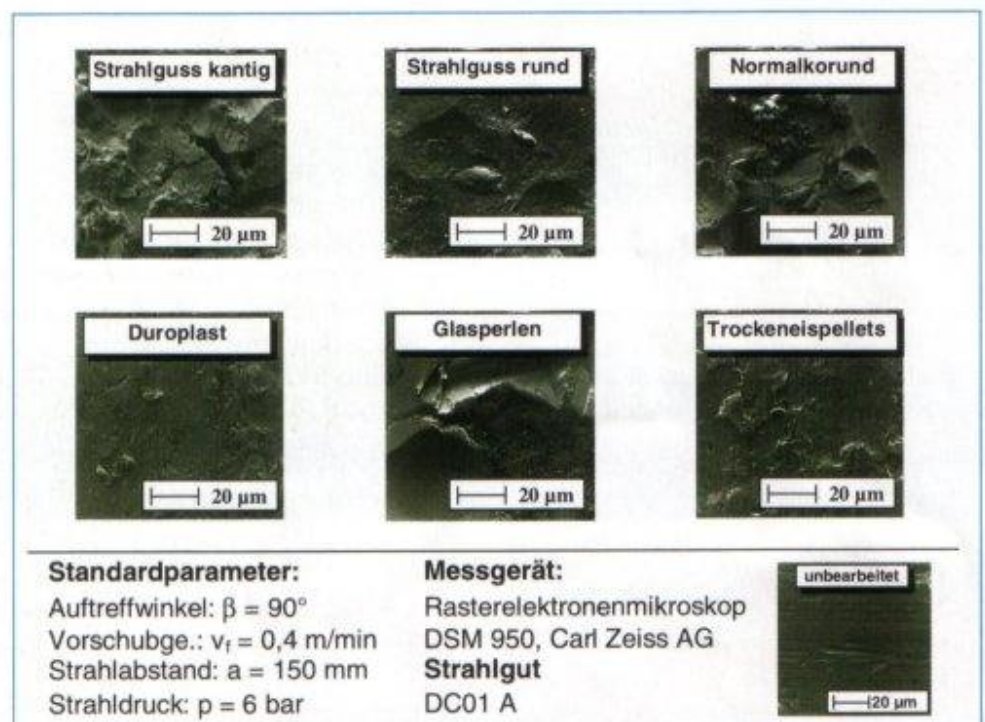
Einfluss der Einstellparameter auf die gemittelte Rautiefe

Nach dem Bearbeiten der Strahlgutwerkstoffe wurde eine signifikante Steigerung der Oberflächenrauheit gegenüber den Ausgangswerten festgestellt. Die maximalen Rauheitskennwerte der mit beständigen Strahlmitteln und mit Trockeneispellets bearbeiteten Strahlgutwerkstoffe sind in Bild 4 dargestellt.

Die größte Oberflächenrauheit wurde bei der Bearbeitung mit Normalkorund erzielt, gefolgt von Stahlguss kantig und Stahlguss rund. Die Rauheitswerte beim Strahlen mit Glasperlen und insbesondere mit Duroplast sind geringer. Noch kleinere Oberflächenrauheiten entstehen bei der Bearbeitung mit Trockeneispellets.

Oberflächentopographie

Sowohl beim Druckluftstrahlen mit beständigen Strahlmitteln als auch beim Trockeneisstrahlen kommt es in



Standardparameter:
Auftreffwinkel: $\beta = 90^\circ$
Vorschubge.: $v_f = 0,4$ m/min
Strahlabstand: $a = 150$ mm
Strahlruck: $p = 6$ bar

Messgerät:
Rasterelektronenmikroskop
DSM 950, Carl Zeiss AG
Strahlgut
DC01 A



Bild 5: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Strahlgutoberfläche nach Bearbeitung von DC01 A mit den untersuchten Strahlmitteln bei den Standardparametereinstellungen

Abhängigkeit vom Strahlmittel zu Veränderungen der bearbeiteten Oberfläche. Im einzelnen sind dies

- die Änderungen der Topographie, Schaffung von Hinterschneidungen und Überhängen sowie eine messtechnisch erfassbare Aufrauung der Oberfläche,
- die Erhöhung der Druckeigenspannung im Strahlgut, vor allem bei Verwendung von runden Strahlmitteln, schließen von Mikrorissen und Kaltverfestigung des Werkstoffes sowie

Stahlguss kantig und Normalkorund. Bei Stahlguss rund wird durch die hämmernde Wirkung die runde Kornform auf der Oberfläche abgebildet. Dabei kommt es zu einer Verdichtung der Oberflächenrandzone sowie zu einer Erhöhung der Druckeigenspannungen. Die Aufnahmen der Oberflächentopographie der mit Duroplast und Trockeneispellets bearbeiteten Strahlgutoberfläche weisen keine Hinterschneidungen und Einschlagkrater auf. Dies liegt vor allem darin, dass diese Strahlmittel im Vergleich zu den ande-

einer Tiefe von 50 µm. Der Strahlgutwerkstoff ist als hellgrauer Bereich zu erkennen. An der Oberfläche sind einzelne Einschlagkrater und die Struktur der Aufprallfläche zu erkennen.

Während die Strahlgutrandzonen sich nach dem Strahlen mit Stahlguss kantig, Stahlguss rund, Normalkorund und Glasperlen deutlich verändern, werden sie bei der Bearbeitung mit Duroplast und Trockeneispellets kaum beeinflusst. Die in die Strahlgutoberfläche eindringenden Strahlmittelpartikel hinterlassen abhängig von Strahlmittelwerkstoff und -form unterschiedliche Aufwerfungen an den Einschlagkratern. Die Strahlmittel von Stahlguss kantig und Normalkorund rufen eckige Aufwerfungen hervor, demgegenüber hinterlassen Stahlguss rund und Glasperlen runde Aufwerfungen. Die Strahlmittelform bildet sich ab. Während der Bearbeitung kommt es durch das Auftreffen von runden Stahlgusspartikeln zu Wechselverformungen, in deren Folge der Werkstoff verfestigt wird. Bei Überschreiten der Dehngrenze des DC01 A-Werkstoffes kann es zu Mikrorissen und schließlich zu Ausbrüchen von Strahlgutpartikeln kommen.

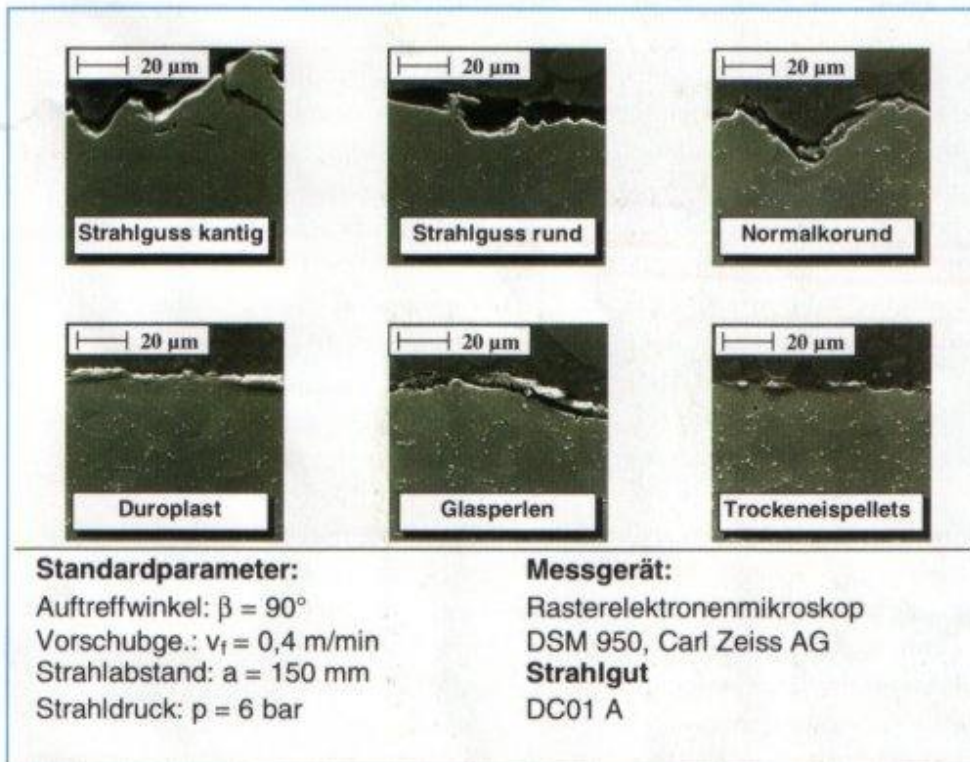


Bild 6: Randzone der Strahlgutproben nach Bearbeitung von DC01 A mit den untersuchten Strahlmitteln bei den Standardparametereinstellungen

- ein Abtrag von Schichten und Verunreinigungen.

In Bild 5 sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberflächentopographie des Strahlwerkstoffes DC 01 A für die untersuchten Strahlmittel bei Standardparametereinstellungen dargestellt.

Die Oberflächentopographie weist Hinterschneidungen und Einschlagkrater auf, die insbesondere bei den mit den Strahlmitteln Stahlguss kantig, Normalkorund und Glasperlen bearbeiteten Strahlproben sichtbar werden. Das liegt sowohl an der großen Härte dieser Strahlmittel als auch an der scharfkantigen Form der Strahlmittel

ren untersuchten Strahlmitteln eine geringere Härte besitzt.

Die Aufnahmen der Oberflächentopographie zeigen außerdem Lackreste, die mit bloßem Auge nicht erkennbar sind. Dies ist vor allem an den mit Normalkorund und Glasperlen gestrahlten Strahlgutoberflächen zu beobachten.

Randzonenbeeinflussung

Zur Klärung der plastischen Verformung und des Abtrags von Lack-schichten wurden die Randzonen der DC01 A-Proben nach dem Bearbeiten untersucht. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in Bild 6 zeigen die Randzone der DC01 A-Strahlgutproben im Querschliff bis zu

Wirtschaftliche Bewertung

Um eine wirtschaftliche Bewertung durchführen zu können, wurde ein Kostenrechnungssystem zum Vergleich der Entlackungskosten des Druckluftstrahlens mit den untersuchten Strahlmitteln aufgestellt. Die Fertigungskosten pro Stunde k_{FH} berechnen sich aus der Summe des Maschinenstundensatzes k_{MH} , der Lohnkosten pro Stunde k_{LH} und der Werkzeugkosten pro Stunde k_{ME} [VDI 32990-1].

$$k_{FH} = k_{MH} + k_{LH} + k_{ME}$$

Der Maschinenstundensatz k_{MH} setzt sich aus variablen und fixen Kosten zusammen. Die Berechnung der Fixkosten geht vom Anschaffungswert des Druckluftsystems und der Strahlanlage hier in Höhe von 50750 Euro sowie von einer jährlichen Nutzungszeit im Einschichtbetrieb t_N von 1600 h aus. Mit der Nutzungsdauer von zehn Jahren (kalkulatorische Abschreibung k_A), kalkulatorischen Zinsen k_Z

von 10 % pro Jahr auf die halben Anschaffungskosten und Instandhaltungskosten k_I von 2 % auf die Anschaffungskosten lassen sich die fixen Maschinenkosten pro Stunde bestimmen. Der variable Teil der Maschinenkosten setzt sich aus den Energiekosten k_E und den Kosten für Betriebs- und Hilfsstoffe zusammen. Die Energiekosten k_E ergeben sich aus der elektrischen Leistung der Anlage, den Stromkosten und einem Leistungsfaktor von 0,6. Die Hilfs- und Betriebskosten umfassen die Kosten für die Erneuerung und Entsorgung der Schmierstoffe sowie den Filter für den Kompressor. Diese sind sehr gering und wurden in diesem Fall in die Instandhaltungskosten k_I eingerechnet.

$$k_{MH} = \frac{k_A + k_Z + k_E + k_I}{t_N}$$

Die Lohnkosten k_{LH} pro Stunde werden aus dem durchschnittlichen Lohn L von 12,5 Euro/h und dem prozentualen Lohnnebenkostenanteil L_p von 80% durch die folgende Beziehung bestimmt:

$$k_{LH} = L(1 + L_p) = 22,5 \text{ Euro.}$$

Die Werkzeugkosten pro Stunden k_{ME} sind beim Druckluftstrahlen mit festen Strahlmitteln im wesentlichen durch die Kosten für das Strahlmittel bestimmt. Sie berechnen sich aus den Kosten für das Strahlmittel pro Kilogramm k_p und dem Strahlmittelmassenstrom \dot{m}_p .

$$k_{ME} = k_p \cdot \dot{m}_p$$

Bild 7 zeigt die Berechnung der Entlackungskosten k_{Fm^2} von AlMg3-Proben mit Stahlguss kantig. Die Kosten betragen 66,5 Euro/m². Für die Berechnung wurde die in den technologischen Untersuchungen ermittelte Strahlleistung von 1,5 m²/h zu Grunde gelegt. Diese sind mit den Kosten der untersuchten Strahlmittel in Bild 8 dargestellt. Dabei wurde von einer Einweg-Nutzung des Strahlmittels ausgegangen. Die Entsorgungskosten der Strahlmittelrückstände wurden in dieser Rechnung nicht berücksichtigt.

Analog zu dem aufgestellten Kostenrechnungssystem für die Bearbei-

Maschinenstundensatz $k_{MH} = \frac{k_A + k_Z + k_E + k_I}{t_N}$	$k_{MH} = 13,3 \text{ /h}$	Entlacken von metallischen Werkstoffen Strahlgut: AlMg3 Beschichtung: Einbrennlack ALEXIT Strukturlack Z 422 Schichtdicke $s_l = 100 \mu\text{m}$ Flächenbezogene Abtragsrate $Q = 1,5 \text{ m}^2/\text{h}$
Maschinenkosten pro Jahr: kalkulatorische Abschreibung kalkulatorische Zinsen Energiekosten Instandhaltungskosten Nutzungszeit	$k_A = 5.075,0$ $k_Z = 2.037,0$ $k_E = 13.104,0$ $k_I = 1.015,0$ $t_N = 1.600,0 \text{ h}$	
Werkzeugkosten pro Stunde $k_{ME} = k_p \cdot \dot{m}_p$	$k_{ME} = 64 \text{ /h}$	Kosten für die Entlackung $k_{Fm^2} = \frac{k_{Fm^2}}{Q}$ $= 66,5 \text{ /m}^2$
Kosten des Stahlgusses kantig Massenstrom an Strahlmittel	$k_p = 0,80 \text{ /kg}$ $\dot{m}_p = 80,0 \text{ kg/h}$	
Lohnkosten pro Stunde	$k_{LH} = 22,5 \text{ /h}$	
Fertigungskosten pro Stunde $k_{Fm^2} = k_{MH} + k_{ME} + k_{LH}$	$k_{Fm^2} = 99,8 \text{ /h}$	

Bild 7: Kostenrechnungssystem zum Entlacken von AlMg3 mit Stahlguss kantig

tung von AlMg3-Proben mit dem Strahlmittel Stahlguss kantig wurden für die anderen Strahlmittel und Strahlgutwerkstoffe die Entlackungskosten k_{Fm^2} berechnet. Dabei wurde bei allen Strahlmitteln von Einwegstrahlmittel ausgegangen. Die Entsorgungskosten der Strahlmittelrückstände sind nicht berücksichtigt worden.

In Bild 8 wurden die für das Entlacken eines Quadratmeters anfallenden Kosten gegenübergestellt. Die Berechnung basiert auf den maximalen Reinigungsleistungen aus den technologischen Untersuchungen. Es ist zu erkennen, dass die Entlackungskosten für das Strahlmittel Duroplast mit über 500 Euro/m² am größten sind. Dies liegt an den hohen Werkzeugkosten, die 90% der Fertigungskosten pro Stunde k_{FH} ausmachen. Außerdem ist die Reinigungsleistung bei der Bearbeitung mit Duroplast sehr gering.

Die geringsten Kosten mit unter 100 Euro/m² entstehen bei der Bearbeitung mit Stahlguss kantig, Normalkorund und Glasperlen. Die Entlackungskosten von Stahlguss rund und Trockeneispellets liegen mit Werten zwischen 150 Euro/m² und 250 Euro/m² im mittleren Kostenbereich. Hier ist zu erwähnen, dass die Entsorgungskosten nicht in Betracht genommen worden sind, wodurch die tatsächlichen Entlackungskosten für beständige Strahlmittel im Vergleich zum Trockeneisstrahlen höher liegen werden. Beim Trockeneisstrahlen verbleiben nur die vom Strahlgut entfernten Rückstände, wodurch geringere Mengen an Rückständen anfallen und

kein Aufbereitungsprozess für Strahlmittelrückstände notwendig ist. Der Einfluss des Strahlgutwerkstoffes auf die Entlackungskosten k_{Fm^2} ist im Vergleich zum Einfluss des Strahlmittels geringer. Er ist jedoch abhängig vom Strahlmittel unterschiedlich.

Zusammenfassung

Der Artikel fasst die am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin IWF durchgeführten Untersuchungen zum Entschichten der lackierten Strahlgutwerkstoffe, AlMg3, DC01 A und X5CrNi 18-10 mit sechs hinsichtlich, Werkstoff, Körnung und Grundkornform unterschiedlichen, Strahlmitteln zusammen. Des Weiteren wurde eine wirtschaftliche Bewertung der Entlackungskosten vorgestellt.

Bei allen untersuchten Werkstoffen wurden die maximalen Reinigungsleistungen bei Strahldrucken zwischen 6 und 8 bar, einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 m/min und einem Strahlabstand von 250 mm erreicht. Der Einfluss des Auftreffwinkels ist im Einstellbereich zwischen 60° und 90° vernachlässigbar. Die maximale Reinigungsleistung hängt sowohl vom Strahlmittel als auch vom Strahlgutwerkstoff ab. Die größte Reinigungsleistung von 1,92 m²/h wurde mit Glasperlen bei dem Strahlgutwerkstoff DC01 A erzielt. Etwas niedrigere Strahlleistungen wurden mit den Strahlmitteln Stahlguss kantig und Normalkorund erreicht.

Die größte Oberflächenrauheit wurde bei der Bearbeitung mit Normkorund gemessen, gefolgt von Stahlguss kantig und Stahlguss rund. Diese liegen im Bereich zwischen 92,28 und 41,13 μm . Die erzielten Rauheitswerte beim Strahlen mit Glasperlen und insbesondere mit Duroplast sind kleiner. Noch kleinere Oberflächenrauheiten ergab die Bearbeitung mit Trockeneispellets.

Diese sind vor allem an den mit Normkorund und Glasperlen gestrahlten Strahlgutoberflächen zu sehen.

Die Randzonen der Strahlgutproben verändern sich deutlich nach dem Strahlen mit Stahlguss kantig, Stahlguss rund, Normkorund und Glasperlen, werden aber von Duroplast und Trockeneispellets kaum beeinflusst. Durch die Bearbeitung mit dem Strahl-

Euro/m² für Stahlguss kantig, Normkorund und Glasperlen und über 500 Euro/m² für Duroplast. Die Bewertung zeigte, dass die Werkzeugkosten sprich die Strahlmittelkosten entscheidend sind. Diese liegen zwischen 65 % und 90 % der Fertigungskosten.

Die in diesem Artikel beschriebenen Untersuchungen und Auswertungen wurden im Rahmen des Teilprojekts A4 „Arbeitsschutz, Sicherheitstechnik und flexible Reinigungstechnologie“ des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs 281 „Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen“ am IWF der TU Berlin durchgeführt.

Literatur

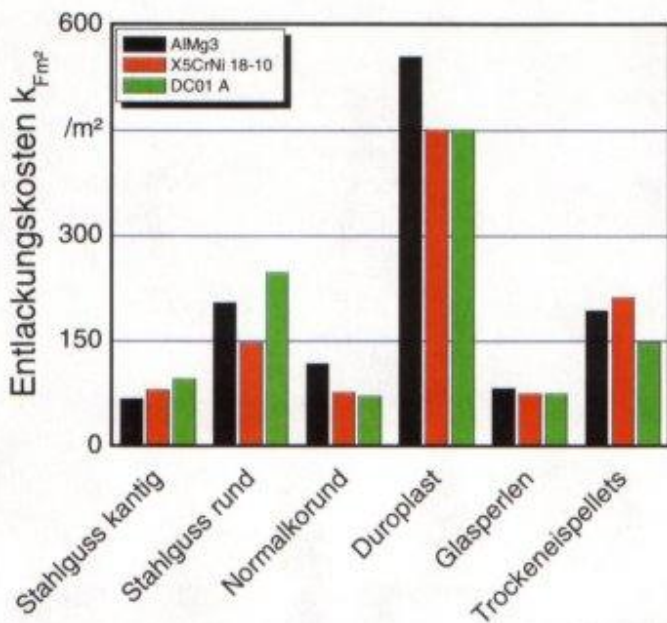
[DON91b] Donath, S.: Rückstandsfreies Strahlverfahren mit CO₂-Pellets zum Entlacken. Schriftenreihe Praxis-Forum, Fachbroschüre Oberflächentechnik, Berlin: Kommunikation und Technik Verlag, 1991.

[HAB99] Haberland, J.: Reinigen und Entschichten mit Trockeneisstrahlen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Nr. 502, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999.

[VIS97] Visser, A., Haberland, J.: Untersuchungen des Trockeneisstrahlwerkzeuges; mittels High-Speed-Kamartechnik; Budde, F.H.: Technisches Messen 64 (1997), S. 325 - 333.

[VDI 32990-1] Begriffe zur Kosteninformation in der Maschinenindustrie; Berlin: Beuth Verlag, 1989.

Die Autoren: Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, Dipl.-Ing. Adil El Mernissi, Dipl.-Ing. Jan Dittberner, Dipl.-Ing. Mark Krieg, Dipl.-Ing. Adil, El Mernissi, alle: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik IWF, Berlin, Tel. 0 30 / 3 14-2 24 13, e-mail: elmernissi@iwf.tu-berlin.de



Werkzeugkosten k_P :

Stahlguss kantig: 0,8 /kg
 Stahlguss rund: 0,8 /kg
 Normkorund: 1,02 /kg
 Duroplast: 4,3 /kg
 Glasperlen: 1,02 /kg
 Trockeneisstrahlen: 0,64 /kg

Strahlmittelmassenstrom \dot{m}_P :

Stahlguss kantig: 80 kg/h
 Stahlguss rund: 133 kg/h
 Normkorund: 86 kg/h
 Duroplast: 72 kg/h
 Glasperlen: 104 kg/h
 Trockeneisstrahlen: 129 kg/h

Reinigungsleistung P

Stahlguss kantig: 1,05 m²/h
 Stahlguss rund: 0,58 m²/h
 Normkorund: 1,74 m²/h
 Duroplast: 0,77 m²/h
 Glasperlen: 1,92 m²/h
 Trockeneisstrahlen: 0,78 m²/h

Bild 8: Vergleich der Entlackungskosten nach Bearbeitung mit von AlMg3, DC01 A und X5CrNi 18-10 mit den untersuchten Strahlmitteln

Die Oberflächentopographie der Strahlgutproben, die mit Stahlguss kantig, Normkorund und Glasperlen bearbeitet wurden, zeigt eine Struktur mit Hinterschneidungen und Einschlagkratern. Die mit Duroplast und Trockeneispellets bearbeiteten Strahlgutproben weisen kaum Änderungen der Oberflächentopographie im Vergleich zu unbearbeiteten Strahlgutoberflächen auf. Bei der Verwendung des Strahlmittels Stahlguss sind auf der Oberfläche der Strahlgüter runde Eindrücke zu sehen, die auf die hämmernde Wirkung runder Strahlmittel im Gegensatz zur schleifenden Wirkung von kantigen Strahlmitteln zurückzuführen sind. Neben den Erkenntnissen zur Oberflächentopographie konnten durch die rasterelektronen-mikroskopischen Untersuchungen nicht entfernte Lackreste nachgewiesen wer-

mittel Stahlguss rund sind Ausbrüche von Strahlgutpartikeln an der Oberfläche beobachtet worden, die mit der Verfestigung der Strahlgutoberfläche und der Überschreitung der Dehngrenze infolge der hämmernde Wirkung der runden Strahlmittelpartikel zu begründen ist.

Zur wirtschaftlichen Bewertung der einzelnen Strahlmittel wurde ein Kostenrechnungssystem aufgestellt. Dazu wurden die in den technologischen Untersuchungen ermittelten maximalen Strahlleistungen zu Grunde gelegt. Die wirtschaftliche Bewertung erfolgte ohne Berücksichtigung der Entsorgungskosten der Strahlmittelmittelrückstände und Verunreinigungen und mit der Annahme, dass alle untersuchten Strahlmittel als Einwegstrahlmittel verwendet werden. Die Entlackungskosten liegen zwischen 75