

Entgraten ■ Abtragen von Stützstrukturen ■ Reinigung ■ Finishing ■ Automatisierung

Erweitertes Prozessverständnis erleichtert das Bauteilfinishing

Das Finishing steht durch vorwiegend manuelle Bearbeitungskonzepte im Widerspruch der Automatisierungstrends. Neue Erkenntnisse zum Finishen mit Trockeneis ermöglichen Anwendern Ansätze für leicht zu automatisierende Technologien bereits im Vorfeld.

von Sven Amon, Fardin Pour Abdollahyan, Daniel Gross, Nico Hanenkamp

Die durchgängige Automatisierung der Prozesskette von der Halbzeug- und Rohstoffverarbeitung bis hin zur Bauteilmontage ist eine große Herausforderung. Entstehen nicht reproduzierbare Grate an unvorhergesehen oder schwer zugänglichen Stellen, muss die Entfernung und Nacharbeit häufig manuell erfolgen, was den Werkstückfluss unterbricht und die Durchlaufzeit erhöht. Auch additive Fertigungsverfahren lassen sich durch die notwendige Entfernung von Stützstrukturen oder Fertigungsrückständen nicht ohne weiteres in die Prozesskette integrieren, das Finishing erfolgt auch hier nach heutigem Stand hauptsächlich manuell [1]. Unabhängig vom verwendeten Fertigungsverfahren spielt die Bauteilsauberkeit für die Montage eine entscheidende Rolle. Etablierte, automatisierte Verfahren zum Bauteilfinishing können die Sauberkeit durch die verwendeten Medien jedoch nachteilig beeinflussen, wodurch eine nachfolgende Reinigung notwendig wird.

Trockeneisstrahlen bietet nachhaltigen Lösungsansatz

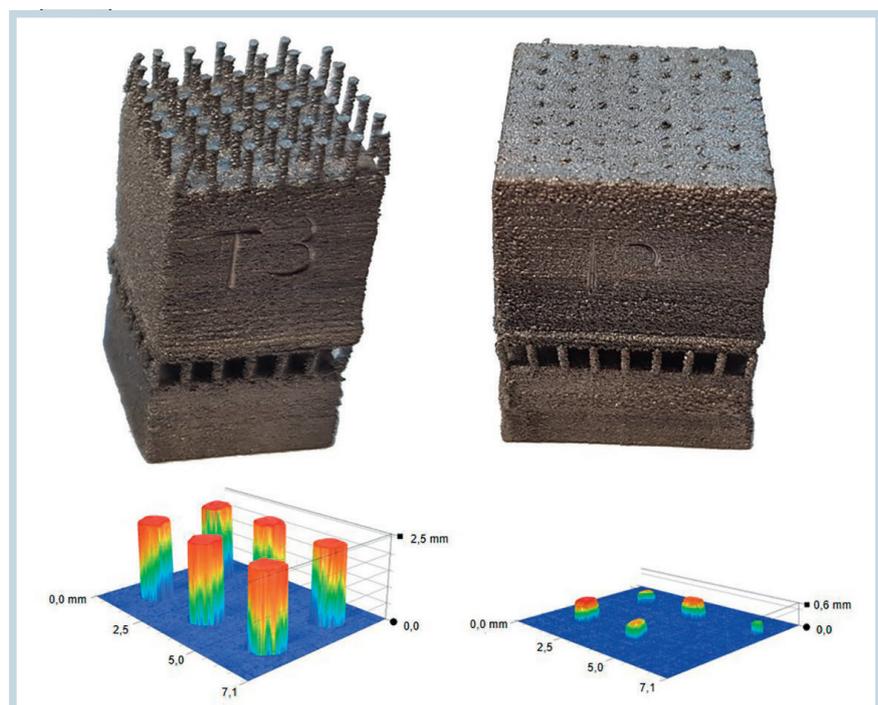
Die Bestrahlung mit festen Kohlenstoffdioxidpartikel durch die Beschleunigung mit Druckluft hat in aktuellen, bereits veröffentlichten Grundlagenuntersuchungen das Potenzial für das

Bauteilfinishing metallischer Bauteile aufgezeigt. Grate und Stützstrukturen können prozesssicher entfernt werden [2]. Der Aufbau der Technologie ist äußerst simpel und deshalb leicht zu automatisieren. Das verwendete CO₂ sublimiert, sodass ein Reinigungs- oder Trocknungsprozess nicht notwendig ist. Darüber hinaus ist die Verwendung von

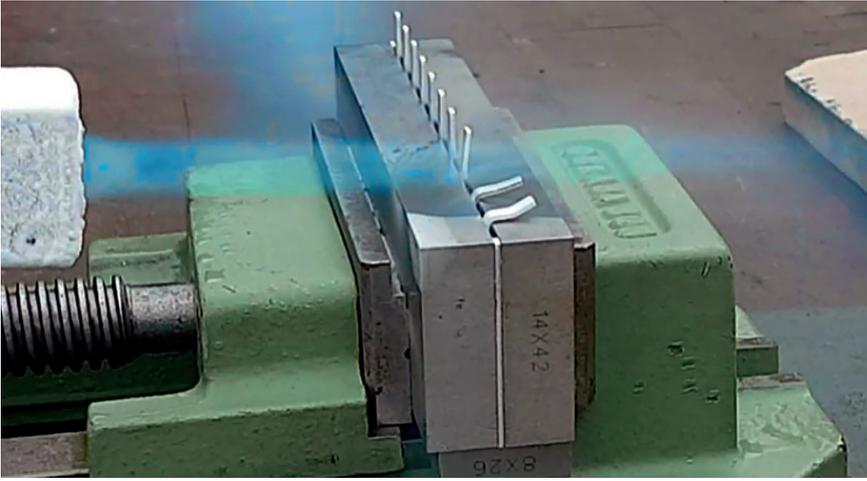
CO₂ durch die Gewinnung als Nebenprodukt verfahrenstechnischer Prozesse treibhausneutral.

Prognose der Wirksamkeit fehlte

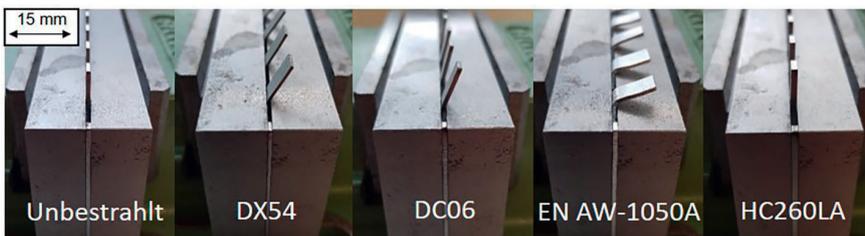
Bislang fehlt potenziellen Anwendern jedoch das Prozesswissen und es ist unklar, ob veröffentlichte wissenschaftliche Erkenntnisse auf eigene Prozesse über- »



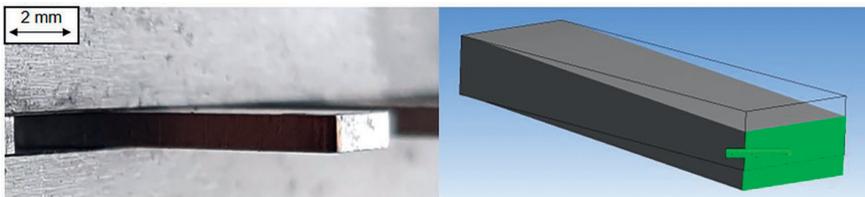
1 Mittels Trockeneisstrahlen entfernte Stützstrukturen aus Ti6Al4V mit 0,8 Millimeter Durchmesser (© FAU)



2 Bestrahlung der Versuchsproben mit dem Trockeneisstrahlgerät IB 15/120 von Kärcher (© FAU)



3 Vergleich der Durchbiegung der einzelnen Streifen nach dem Bestrahlen (© FAU)



4 Darstellung der simulierten Durchbiegung des Versuchsstreifens in einer Finite-Elemente-Software (© FAU)

tragbar sind. Ohne gezielte Versuche ist eine Aussage über die Entfernbare mit am Markt erhältlichen Systemen bisher nicht möglich. Eine neu entwickelte Systematik beantwortet ohne unmittelbare Feldversuche die Fragen der Anwender. Hierfür werden ausschließlich Kenntnisse über die projizierte Strahlfläche der Materialanhaftung beziehungsweise der Fläche, welche während der Bestrahlung vom Strahl erfasst wird, benötigt. Anhand dieser kann aus dem abschließend vorgestellten Diagramm ermittelt werden, welche Kraft auf die Anhaftung mit dem Verfahren wirkt.

Stand der Technik

Durch die Geschwindigkeitsänderung des Trockeneisstrahls entsteht eine Impulsänderung. Die nach dem Impulssatz auf die Materialanhaftung wirkende Kraft wird auch als Strahlstoßkraft bezeichnet [3]. Den größten Anteil an der Strahlstoßkraft besitzt die kinetische Energie der verwendeten Partikel.

Weitere Anteile sind auf die Druckluft zurückzuführen. Darüber hinaus entsteht beim Trockeneisstrahlen durch die niedrigen Temperaturen der Partikel auch ein thermischer Effekt. Für die absolute Ermittlung der Strahlstoßkraft zur Verwendung beim Anwender sind deren einzelnen Wirkanteile nicht relevant.

Für die Aufnahme der Strahlstoßkraft beim Trockeneisstrahlen wurden bisher verschiedene Modelle mit entsprechend unterschiedlichen Ergebnissen veröffentlicht. In der Vergangenheit wurde die Strahlstoßkraft mit einem 3-Komponenten-Piezokraftmesssystem gemessen oder mit einer Stoßimpulsberechnung ermittelt. Bei der ersten Versuchsvariante wurde eine Platte mittels eines senkrecht ausgerichteten Freistrahls angestrahlt. Dabei wurden die Deformation und die Oberflächenbeschädigung des Strahlguts sowie die kinetische Energie der Trockeneispellets gemessen. Bei einem Strahldruck von $p_s = 12$ bar, einem Trockeneismassen-

strom von $q_m = 125$ bis 135 kg/h und einem Strahlquerschnitt von $A_s = 153$ mm² wurde eine maximale Strahlstoßkraft von $F_z = 150$ N gemessen [3]. Für eine Stoßimpulsberechnung wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera die Teilchengröße und -geschwindigkeit der einzelnen Partikel ermittelt. Hierbei wurde für einen Strahlendruck von $p_s = 20$ bar und einem Partikeldurchmesser von $d_{\text{Pellet}} = 0,6$ bis 1 mm eine Stoßkraft von $F_s = 20$ bis 60 N berechnet [4]. Die bisherigen Ergebnisse zur Krafeinwirkung wurden innerhalb von Laborbedingungen realisiert. Informationen zu den am Markt verfügbaren Systemen unter realitätsnahen Strahlbedingungen sind derzeit nicht verfügbar. Weiterhin ist die Übertragbarkeit auf vorhandene Flächen von Materialanhaftungen nicht bekannt.

Deshalb wurde für kommerziell verfügbare Systeme eine Methodik entwickelt, bei der vorgefertigte, zu den Anhaftungen ähnliche Probekörper durch Bestrahlung gezielt umgeformt werden.

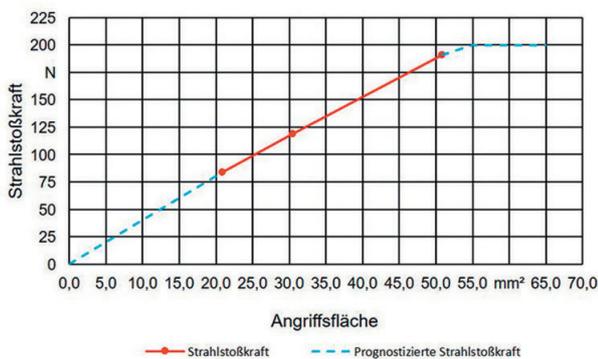
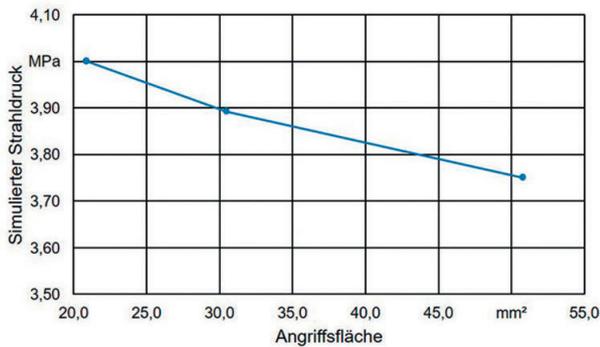
Lösungsansatz

Die Grundidee zur Bestimmung der Strahlstoßkraft basiert auf dem Ersatzmodell des Biegebalkens. Über die Durchbiegung des Balkens wird der Strahlendruck des Trockeneisstrahlgeräts bestimmt. Mit dem Strahlendruck kann über die Angriffsfläche die Strahlstoßkraft auf die Anhaftung berechnet werden. In einem Versuch werden Versuchsproben aus vier unterschiedlichen Werkstoffen aus warmgewalztem Stahlblech mit unterschiedlicher Materialstärke, -breite sowie Streckgrenze bestrahlt.

Dazu wird das Trockeneisstrahlgerät der Firma Kärcher vom Typ IB 15/120 verwendet. Dieses beschleunigt Trockeneispartikel mit einem Durchmesser von $d_{\text{Pellet}} = 3$ mm. Die Anlage und deren Strahlparameter wurden so gewählt, dass mit einer möglichst hohen Strahlstoßkraft zu rechnen ist.

Für eine Berücksichtigung von realen Imperfektionen und einer plastischen Verformung der Biegebalken ist das Implementieren des Materialverhaltens in eine Finite-Elemente-Software erforderlich. Ausgangspunkt für eine Abbildung der wahren Spannungs-Dehnungskurve stellt dabei die Balkentheorie 3. Ordnung dar.

Strahlanlage:	IB 15/120	Strahlverfahren:	CO ₂ -Pelletstrahlen
Strahlrdruck:	$P_s = 1,1 \text{ MPa}$	Bestrahlungsdauer:	$t_{\text{Strahl}} = 2 \text{ sek.}$
Trockeneismassenstrom:	$\dot{m}_p = 100 \text{ kg/h}$	Strahlabstand:	$l_{\text{Strahl}} = 80 \text{ mm}$
Strahldurchmesser:	$d_{\text{Strahl}} = 9 \text{ mm}$	Bestrahlter Werkstoff:	HC260LA (1.0408)



5 Kennlinie des simulierten Strahlrdrucks für die Versuchsprobe aus HC260LA (oben), berechnete und prognostizierte Strahlstoßkraft (unten)

(© FAU)

INFORMATION & SERVICE



INSTITUT

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen (REP)
90762 Fürth
Tel. +49 911 65078-64810
www.rep.tf.fau.de

HERSTELLER

Alfred Kärcher SE & Co. KG

71364 Winnenden
Tel. 7195 14-0
www.kaercher.com

LITERATUR

[1] *Kranz, J.*: Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen. Dissertation. 2017. URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-55339-8>

[2] *Amon S., Gross D., Hanenkamp N.*: Bauteilfinishing durch CO₂-Trockeneisstrahlen – Automatisierbare Nachbearbeitungsprozesse durch innovative Fertigungstechnologien In: wt Werkstatttechnik – Online 109 [2019], S. 53-58
ISSN: 1436-4980

[3] *Uhlmann E., Axmann B., Elbing F.*: Stoßkraftmessung beim Strahlen mit CO₂-Pellets In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 1998. S. 240-243

[4] *Haberland J.*: Reinigen und Entschichten mit Trockeneisstrahlen: Grundlegende Untersuchung des CO₂-Strahlwerkzeuges und der Verfahrensweise. Dissertation. 1998. ISBN: 318350202X

DIE AUTOREN

Sven Amon, M. Eng., ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl REP
sven.amon@fau.de

Fardin Pour Abdollahyan, B. Eng., ist Studierender an der Universität Erlangen
fardin.pour@fau.de

Daniel Gross, M. Sc., ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl REP
daniel.gross@fau.de

Prof. Dr.-Ing. Dipl. Ing. Nico Hanenkamp, leitet den Lehrstuhl REP
nico.hanenkamp@fau.de

Simulierter Strahlrdruck mittels Finite-Elemente-Software

Hierfür wird das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für den jeweiligen Werkstoff anhand einer bilinearen Approximation der Fließkurve inklusive Verfestigung angenähert. Anschließend kann die Darstellung der Kennlinie für eine Durchbiegung über die Strahldauer mit mehreren Iterationsschritten ermittelt werden.

Da bei einer geringeren plastischen Verformung mit einer höheren Genauigkeit der Simulation zu rechnen ist, werden die Proben des Werkstoffs HC260LA analysiert. Dabei wurde für die Versuchsprobe mit der Angriffsfläche von $A_{\text{max}} = 50 \text{ mm}^2$ eine maximale Durchbiegung von $\omega_{\text{max}} = 0,28 \text{ mm}$ beziehungsweise eine minimale Durchbiegung von $\omega_{\text{min}} = 0,08 \text{ mm}$ gemessen, der Mittelwert der Durchbiegungen beträgt $\omega_m = 0,18 \text{ mm}$. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass während des Strahlvorgangs auf die Angriffsfläche von $A_{\text{min}} = 20 \text{ mm}^2$ ein Strahlrdruck von $p_{s,\text{max}} = 4,00 \text{ MPa}$ und auf die Angriffsfläche von $A_{\text{max}} = 50 \text{ mm}^2$ ein Strahlrdruck von $p_{s,\text{min}} = 3,75 \text{ MPa}$ wirkt.

Der simulierte Strahlrdruck verhält sich, wie zu erwarten, quasi konstant in Abhängigkeit der bestrahlten Fläche. Die relative Abweichung von 6,25 Prozent ist primär auf unterschiedliche

Umstrahlung der Proben durch das handgeführte Verfahren zurückzuführen.

Strahlstoßkraft von bis zu 190 N

Anschließend wird die Strahlstoßkraft über die Angriffsflächen (durchgezogene Linie) rechnerisch ermittelt. Hierbei ergibt sich die Strahlstoßkraft von $F_{\text{Strahl}} = 80 \text{ N}$ auf die Angriffsfläche von $A_{\text{min}} = 20 \text{ mm}^2$ und bildet ein Maximum von $F_{\text{Strahl}} = 190 \text{ N}$ auf die Angriffsfläche von $A_{\text{max}} = 50 \text{ mm}^2$. Da der Strahldurchmesser nur eine Fläche von $A_{\text{Strahl}} \approx 60 \text{ mm}^2$ aufweist, kann angenommen werden, dass die Strahlstoßkraft ab circa $F_{\text{Strahl}} = 190 \text{ N}$ auch mit größerer Probengröße nicht mehr signifikant ansteigt. Dieser prognostizierte Verlauf ist gestrichelt dargestellt.

Ausblick

Durch ein verbessertes Prozessverständnis kommt die leicht zu integrierende Technologie ohne Feldversuch für Automatisierungslösungen in Betracht. Der Anwender kann durch Messung der vorliegenden Anhaftung die resultierende Strahlstoßkraft in Abhängigkeit der Anhaftungsfläche ermitteln und diese unmittelbar nachbilden. Künftig soll die gezielte Vorbereitung von Stützstrukturen für den Strahlvorgang und die Integration der Technologie in die additive Prozesskette untersucht werden. ■