

## Additive Fertigung und oberflächennahe Innenkühlung thermisch hochbelasteter Schmiedegesenke

In den meisten Fällen können die Schädigung und das Ende der Lebensdauer von Schmiedegesenken auf die thermische Beanspruchung als dominierenden Effekt zurückgeführt werden. Im Rahmen des AVIF-Forschungsvorhabens 20780 N „SLM-Gesenke“ wurde zum einen die additive Fertigung für Schmiedegesenke qualifiziert und zum anderen die daraus resultierenden Vorteile der oberflächennahen Innenkühlung für die Lebensdauer von Schmiedegesenken charakterisiert.

AUTOREN



**Julius Peddinghaus, M.Sc.**

ist Abteilungsleiter Massivumformung im Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover



**Martin Siegmund, M.Sc.**

ist ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Massivumformung im Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover



**Janina Siring, M.Sc.**

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Materialcharakterisierung und Simulation im Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover



**Jochen Giedenbacher, M.Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fachhochschule Oberösterreich Forschungs & Entwicklungs GmbH



**Prof. (FH) Dr.-Ing. Aziz Huskic**

ist Professor für Produktionstechnik und Umformtechnik der Fachhochschule Oberösterreich Forschungs & Entwicklungs GmbH



**Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens**

ist Institutsleiter am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover

Fortschritte in der additiven Fertigung metallischer Werkstoffe erlauben zunehmend den Einsatz dieser neuen Verfahrenskategorie für hochbelastete Anwendungen. Durch die generative Fertigung können die Grenzen der konventionellen spanenden Fertigung überwunden werden und komplexere Strukturen, vor allem auch mit innenliegenden Konturen hergestellt werden. Insbesondere das Verfahren Selective Laser Melting (SLM) erlaubt durch das Laseraufschmelzen im Pulverbett die Fertigung filigraner Strukturen. Ein wesentlicher Fortschritt in Folge der intensiven Forschung in diesem Bereich in den vergangenen Jahren liegt in der Verarbeitbarkeit von Warmarbeitsstählen. Durch eine Temperierung des Pulverbetts können mit den richtigen Parametern mittlerweile vereinzelt Güten verarbeitet werden [1].

Aus diesen Fortschritten ergibt sich das Potenzial, oberflächen- und konturnah Temperierkanäle in Schmiedegesenke einzubringen. Das komplexe Belastungskollektiv an den Wirkflächen von Schmiedegesenken wird dominiert von der thermischen Belastung in Folge des Kontakts mit dem warmen Rohteil, und es begrenzt die Standmengen [2]. Diese Beanspruchung kann durch Innenkühlung potenziell erheblich herabgesetzt werden, um die Lebensdauer zu steigern. Thermische Einfahrprozesse bis zum Erreichen einer konstanten Werkzeuggrundtemperatur wirken sich beim Schmieden zudem nachteilig auf die Werkzeuglebensdauer und Bauteilqualität aus. Durch eine oberflächennahe Temperierung können diese potenziell reduziert

werden. Temperierkanäle bieten daher die Möglichkeit, sowohl die Lebensdauer von Schmiedegesenken zu steigern als auch Ausschuss beim Einfahren zu reduzieren. In Anwendungen mit geringeren oder weniger dynamischen Belastungsfällen, wie dem Druckguss oder dem Strangpressen, wird diese Strategie bereits angewendet. Aus diesen Potenzialen ergeben sich im Wesentlichen zwei Kernfragestellungen:

- Kann das SLM-Verfahren für den Einsatz als Gesenkschmiedewerkzeug qualifiziert werden?
- Welche Vorteile ergeben sich aus der oberflächennahen Temperierung von Schmiedegesenken hinsichtlich der Lebensdauer und hinsichtlich der Einfahrprozesse.

**ENTWICKLUNG EINER HYBRIDEN ADDITIVEN FERTIGUNGSROUTE**

Zunächst wurde von den Forschern der Fachhochschule Oberösterreich eine Prozessroute entwickelt und charakterisiert, um den für Schmiedegesenke verbreiteten Warmarbeitsstahl 1.2365 additiv mittels SLM zu verarbeiten. Derweil erfolgte am IFUM die Auslegung der Kühlkanäle. Im Anschluss haben die beiden Forschergruppen ihre Erkenntnisse zusammengeführt und die Werkzeuge entsprechend der entwickelten Prozessroute gefertigt, im Laborschmiedebetriebs erprobt und hinsichtlich des Einflusses der Temperierung auf das Einlauf- und Schädigungsverhalten charakterisiert. Abschließend wurde das Potenzial zum Einsatz in Industrieprozessen evaluiert.

	Schutzgas	N <sup>2</sup>
	Pulverfraktion	10 – 45 µm
P	Laserleistung	225 W
v	Scangeschwindigkeit	700 mm/s
h	Schichtdicke	0.03 mm
T <sub>Vorwärm</sub>	Pulverbettvorwärmtemperatur	250 °C
E <sub>v</sub>	Volumetrische Energiedichte	102 J/mm <sup>3</sup>

Tabelle: Mittels DoE ermittelte Prozessparameter zur Verarbeitung des Warmarbeitsstahls 1.2365 mittels SLM



Bild 1: Hybrider Gesenkaufbau und Herstellroute

Die Parametrisierung von SLM-Verfahren für neue Werkstoffe bietet eine Reihe an Herausforderungen und zahlreiche Stellparameter, um diese zu bewältigen. Von entscheidender Bedeutung sind dabei die thermischen Spannungen sowie die Porosität, die sich insbesondere bei Warmarbeitsstählen in Folge des schichtweisen Aufschmelzens ergeben. Aufgrund des breiten Parameterfelds wurde eine mittels Design of Experiments (DoE) entwickelte Studie an einer Anlage vom Typ M2 des Herstellers Concept Laser durchgeführt. Daraus ergaben sich die in Tabelle 1 dargestellten Parameter als entscheidend und zielführend. Anschließend wurden die gefertigten Proben hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften charakterisiert und eine geeignete Wärmebehandlungsrouten entwickelt. Es zeigte sich, dass ein Spannungsarmglühen vor dem Vergüten die Rissneigung minimiert und dass sowohl hinsichtlich der Härte und Festigkeit, als auch der Kerbschlagarbeit die Eigenschaften von konventionell hergestelltem 1.2365 übertroffen werden können. Mit einer Porosität von unter 0,1 Prozent und einer mittleren Korngröße von 3,34 µm konnte eine ausgezeichnete Mikrostruktur erreicht werden.

Die aufgenommenen Werkstoffdaten dienen anschließend als Grundlage für die belastungsangepasste numerische Prozessauslegung. Die Gesenkegeometrie ist in Bild 1 dargestellt und angelehnt an eine am IFUM bestehende, primär thermisch beanspruchte Werkzeuggeometrie. Im Rahmen einer mittels DoE ausgelegten FEM-Studie wurden unterschiedliche Geometrieparameter der Kühlkanäle variiert und das Optimum abgeleitet, welches möglichst nah an der Oberfläche und ohne Beeinträchtigung der mechanischen Belastbarkeit ist. Mit einem Abstand von 3,25 Millimetern zur Oberfläche und einem Kanalquerschnitt von 2 Millimetern wurde die ideale Anordnung gefunden.

Da das SLM-Verfahren mit sehr langen Prozesszeiten wirtschaftliche Nachteile gegenüber der konventionellen spanenden Fertigung aufweist [3], wurde das Werkzeug als hybride Struktur gemäß Bild 1 aufgebaut. Der mittels SLM aufgebaute Bereich beschränkt sich dabei auf die Dornkappe, in der die konturnahen Kühlkanäle liegen. Die Basis des Dorns mit der Zu- und Abfuhr des Kühlmediums konnte, ebenso wie

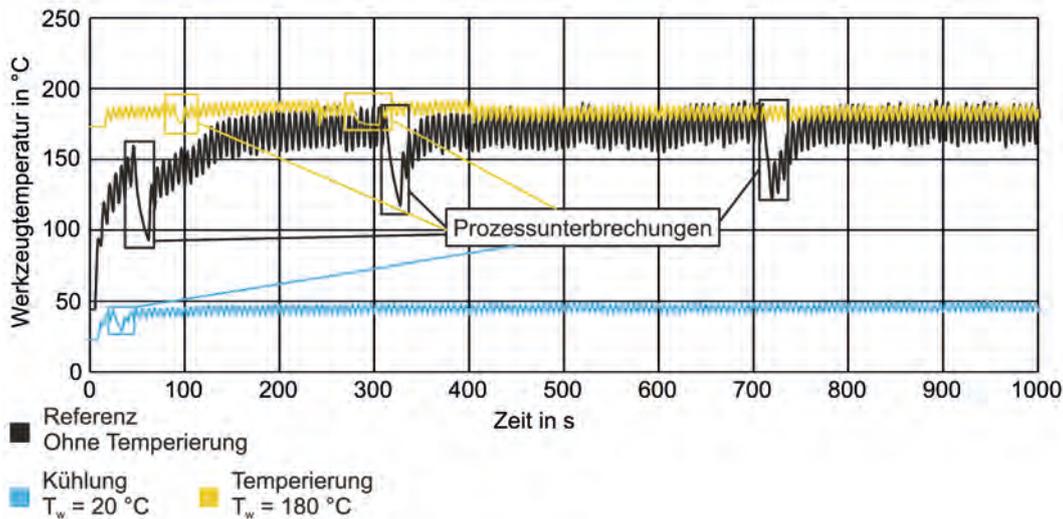


Bild 2: Werkzeugtemperaturverläufe zentrisch 3 Millimeter zur Gesenkoberfläche in Abhängigkeit der Temperierstrategie

der als Ring ausgeführte Außenbereich des Gesenks, konventionell spanend hergestellt werden. Die Dornkappe wurde dabei direkt auf die zuvor spanend gefertigte Basis aufgebaut.

### EINSATZVERHALTEN IN SERIENNAHEN SCHMIEDEVERSUCHEN

Nach der Fertigung der hybriden Werkzeuge wurden diese in anwendungsnahen Serienschmiederversuchen erprobt. Dazu wurden sie an einer vollautomatisierten Schmiedelinie am IFUM über je 1.000 Zyklen eingesetzt. Das Schmieden der Stahllegierung 42CrMo4 erfolgte bei einer Temperatur von 1.200 °C mit einer Taktzeit von sechs Sekunden. In Absprache mit den teilnehmenden Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses wurde als Temperiermedium Wasser eingesetzt, da so die Personen- und Anlagensicherheit auch im Falle von Leckagen sichergestellt werden kann. Zur Regelung der Wassertemperatur wurde ein kommerzielles Temperiergerät des Herstellers HB-Therm eingesetzt. Dieses System mit geschlossenem Sekundärkreislauf ist hochdruckfähig, um das Wasser auch bei Temperaturen über 100 °C im flüssigen Zustand zu halten und eine zuverlässige Medientemperaturregelung zu gewährleisten. Für die Versuchsreihen wurden zwei unterschiedliche Wassertemperaturen verwendet. Zur Absenkung der Oberflächentemperatur wurde die maximale Kühlung auf Raumtemperatur von 20 °C vorgesehen. Um das Potenzial zur Reduktion von thermischen Einfahrprozessen zu evaluieren, wurde zusätzlich die Temperierung auf 180 °C betrachtet.

Zur Bewertung der Einsatzeigenschaften wurde die Werkzeugtemperatur mittig drei Millimeter unter der Oberfläche gemessen und aufgezeichnet und anschließend das Schädigungsverhalten im Anschluss an die Schmiederversuche charakterisiert.

Die aufgenommenen Temperaturverläufe sind in Bild 2 dargestellt. Es zeigt sich erwartungsgemäß ein erheblicher Einfluss der Temperierung auf die Werkzeugtemperaturen. Im Vergleich zur Referenz ohne Temperierung zeigen die Verläufe bei 180 °C Wassertemperatur deutlich reduzierte Schwankungen. Es zeigt sich keinerlei Einlaufverhalten im Gegensatz zur untemperierten Referenz, bei der es erst nach zirka 120 Sekunden zu einem stationären Zustand kommt. Die Vorteile der reduzierten Einlaufphasen ergeben sich nicht nur zum Produktionsbeginn, sondern auch nach Prozessunterbrechungen. Die Reproduzierbarkeit der thermischen Prozessbedingungen kann demnach in jedem Fall durch eine konturnahe Temperierung erheblich gesteigert werden.

Während die Werkzeugtemperatur bei 180 °C um die eingestellte Solltemperatur schwingt, stellt sich bei maximaler Kühlung mit 20 °C in Folge des Wärmeeintrags beim Schmieden eine Grundtemperatur von ca. 45 °C ein. Das geringe Niveau macht den starken Effekt der Kühlung auf die Werkzeugtemperatur deutlich. Der daraus resultierende Einfluss auf das Schädigungsverhalten wurde nachfolgend anhand der Analyse der eingesetzten Werkzeuge charakterisiert.

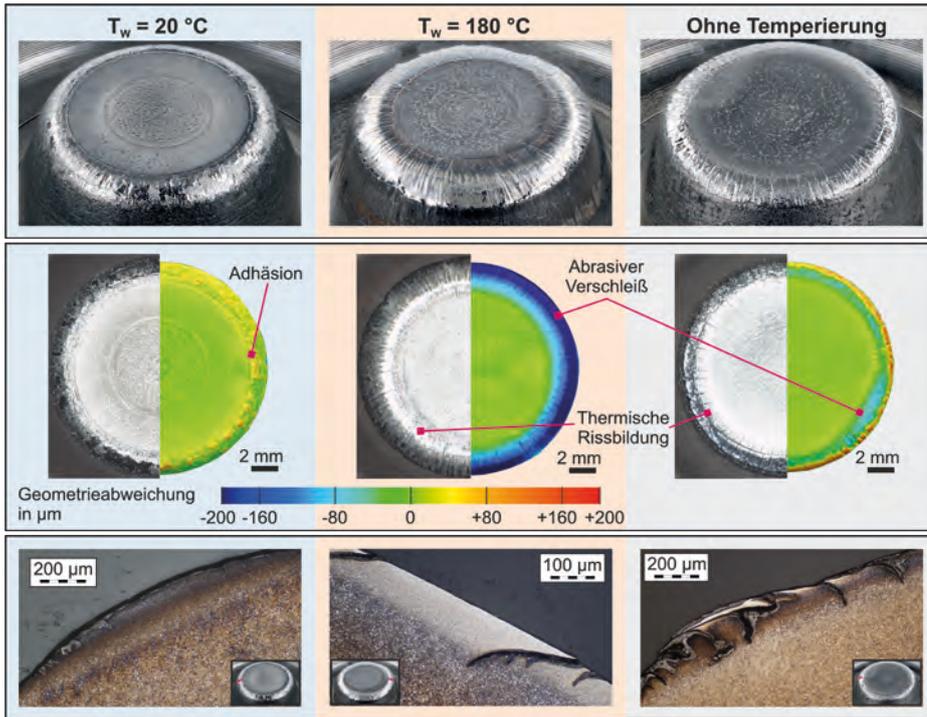


Bild 3: Werkzeuganalyse zur Bewertung des Schädigungsverhaltens nach 1.000 Schmiedezyklen in Abhängigkeit der Temperierstrategie: Fotografische Analyse (oben), Geometrieabweichung zum Ausgangszustand (mittig), Metallografische Analyse im Querschliff (unten), Bilder: Autoren

Die mittels der entwickelten SLM-Route hergestellten Gesenke zeigten nach 1.000 Schmiedezyklen keinerlei globale Schädigung. Im Vergleich zu einer konventionell gefertigten Referenz ergeben sich ohne Temperierung keine signifikanten Unterschiede im Schädigungsverhalten. Auf Basis dieser Ergebnisse kann von einer grundsätzlichen Eignung der entwickelten SLM-Fertigungsroute zur Herstellung von Schmiedewerkzeugen ausgegangen werden.

### EINFLUSS DER AKTIVEN TEMPERIERUNG AUF DAS SCHÄDIGUNGSVERHALTEN

Die Analyse der eingesetzten Werkzeuge nach 1.000 Schmiedezyklen zeigt, wie in Bild 3 dargestellt, einen erheblichen Einfluss der konturnahen Temperierung auf das Schädigungsverhalten. Am thermisch und abrasiv hochbelasteten Dornradius zeigt die mittels SLM hergestellte Referenz umlaufend sowohl abrasiven Verschleiß als auch thermomechanische Rissbildung. Bei Temperierung auf 180 °C treten diese beiden Effekte erheblich verstärkt auf. Vor allem der abrasive Abtrag ist mit über 0,2 Millimetern deutlich höher. Der zugrundeliegende Effekt ist in der metallografischen Analyse der Randzonen ersichtlich. Während beide Werkzeuge eine signifikante plastisch deformierte Randzone aufweisen, ist diese bei Temperierung auf 180 °C bedeutend tiefer und stärker ausgebildet.

Einen erheblichen Kontrast dazu stellt die Kühlung mit 20 °C Wassertemperatur dar. Hier ist keinerlei Abtrag erkennbar. In der Randzone ist zwar eine Wärmeeinflusszone ersichtlich, allerdings ohne plastische Deformation und aufgehellte Bereiche, welche auf einen hohen thermischen Eintrag hindeuten. Zudem kann bei maximaler Kühlung eine deutliche Reduzierung der thermomechanischen Rissbildung beobachtet werden. Risse treten in geringerer Zahl und Tiefe auf. Dafür sind positive Geometrieabweichungen in Form von Adhäsionen am Dornradius erkennbar. Dieses Verhalten

ist auf die hohe Kühlwirkung zurückzuführen. Wie in Bild 2 erkennbar, liegt oberflächennah die Temperatur deutlich unter 100 °C. Die konventionelle Schmierstoffapplikation von Graphit auf Wasserbasis, wie auch in diesem Prozess eingesetzt, erweist sich hier als nicht zielführend, da die fluiden Bestandteile bei so geringer Oberflächentemperatur nicht verdampfen können. Damit kann der Schmierstoff seine Trennwirkung nicht erreichen, und es kommt zur Adhäsion. Es lässt sich daraus ableiten, dass die oberflächennahe Kühlung die Oberflächentemperatur beim Schmieden deutlich absenkt und so Schädigungsmechanismen effektiv unterbindet. Hier kann ein hohes Potenzial zur Lebensdauersteigerung durch diesen Ansatz abgeleitet werden.

Abschließend wurde in Kooperation mit der Hammerwerk Fridingen GmbH und der Linamar Plettenberg GmbH das Einsatzpotenzial in industriellen Schmiedeprozessen untersucht. Dazu erfolgte in enger Zusammenarbeit eine belastungsangepasste numerische Auslegung der Kühlkanäle. Darauf aufbauend erfolgte die Integration in die bestehenden Anlage- und Werkzeugperipherien. Bei der Fertigung der größeren Industriegesenke mittels SLM zeigten sich allerdings weitere Herausforderungen in der hybriden Fertigungsroute. Durch Skalierung des Werkzeugdurchmessers von 30 auf 80 Millimeter und 130 Millimeter für die beiden Anwendungsszenarien steigen die thermischen Spannungen beim SLM-Aufbau erheblich an, und es kommt zu Rissen in der Fügezone. Durch unterschiedlich angepasste Wärmebehandlungsrouten sowie dem Einbringen einer Spannungsminimierenden Zwischenschicht aus einer Nickelbasislegierung konnten die Risse an dieser Stelle nach dem SLM-Prozess verhindert werden. In den weiterführenden Bearbeitungsschritten kam es allerdings trotzdem zu Rissen in den hybrid aufgebauten Gesenken. Hier wurden die aktuell bestehenden Grenzen des entwickelten Werkzeugkonzeptes aufgezeigt.



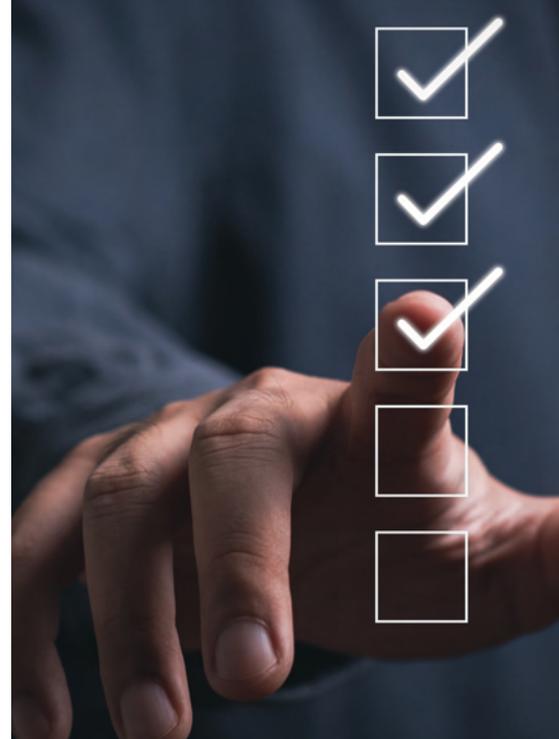
Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen des Vorhabens abgeleitet werden, dass die Beanspruchungen von Schmiedegesenken durch die oberflächennahe Kühlung deutlich reduziert werden kann und dass durch diesen Ansatz von einem hohen Potenzial zur Lebensdauersteigerung auszugehen ist. Weiterführender Forschungsbedarf liegt in der Entwicklung angepasster Schmierkonzepte bei niedrigen Oberflächentemperaturen. Die SLM-Fertigung konnte zudem grundsätzlich für den Einsatz in thermisch und mechanisch hochbelasteten Schmiedeanwendungen qualifiziert werden. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist eine Kombination mit der konventionellen spanenden Bearbeitung sinnvoll. Die Grenzen dieser Fertigungsroute liegen aktuell in der Skalierbarkeit zu größeren Werkzeugdimensionen. Hier besteht ebenfalls weiterführender Forschungsbedarf. Zum Abschluss des Projekts liegen mögliche Anwendungsszenarien demnach in Prozessen mit geringen Werkzeugabmaßen oder im lokalen Einsatz von SLM-gedruckten Elementen.



Dieses Forschungsprojekt AVIF A 318 wurde gefördert von der gemeinnützigen Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. Zweck der Stiftung ist die Förderung der Forschung auf dem Gebiet der Stahlverarbeitung und -anwendung in der Bundesrepublik Deutschland. Geprüft wurde das Forschungsvorhaben von einem Gutachtergremium der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e. V. (AVIF), das sich aus Sachverständigen der Stahl anwendenden Industrie und der Wissenschaft zusammensetzt. Begleitet wurde das Projekt von einem Arbeitskreis des Industrieverbandes Massivumformung. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann über die Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. beim Wirtschaftsverband Stahl- und Metallverarbeitung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



- [1] Klocke, F.; Arntz, K.; Teli, K.; Winands, K.; Wegener, M.; Oliari, S.; State-of-the-art-Laser Additive Manufacturing for Hot-work Tool Steels, Procedia CIRP 63 (2017), S. 58 – 63
- [2] Gronostajski, Z.; Kaszuba, M.; Hawryluk, M.; Zwierchowski, M.: A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools, Archiv.Civ.Mech.Eng 14, (2014), S. 528 – 539
- [3] Thomas, D.S.; Gilbert, S.W.: Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing, National Institute of Standards and Technology, 2014



## IHRE MEINUNG IST UNS WICHTIG, STIMMEN SIE AB!

Machen Sie mit bei der Leserbefragung zu unserer massivUMFORMUNG und helfen Sie uns, das Medium in Ihrem Sinne weiterzuentwickeln. Ihre Teilnahme dauert nur wenige Minuten. Wir freuen uns auf Ihr Feedback und Ihre Anregungen.

**Industrieverband Massivumformung e. V.**



[www.massivumformung.de/leserbefragung](http://www.massivumformung.de/leserbefragung)