

Werkstoffprüfung an Mikroproben und -halbzeugen

*Bernd Köhler, Hubert Bomas,
Hans-Werner Zoch, Bremen,
und Jens Stalkopf, Pfungstadt*

Der Sonderforschungsbereich 747 „Mikrokaltumformen – Prozesse, Charakterisierung, Optimierung“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) beschäftigt sich seit 2007 mit der Bereitstellung von Prozessen und Methoden für die umformtechnische Herstellung metallischer Mikrokomponenten. Im Teilprojekt B4, Bauteilfestigkeit, in dem drei der Autoren arbeiten, geht es um die statische und dynamische Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Mikroproben und -halbzeugen. Die Prüfung derartiger kleiner Prüflinge erfordert eine an deren Dimensionen angepasste Prüftechnik. Vor dem Hintergrund dieses besonderen Anforderungsprofils werden die infrage kommenden unterschiedlichen Prüfmaschinenklassen vergleichend diskutiert. Zur Durchführung des genannten Projekts wurde ein Prüfsystem beschafft, welches am geeignetsten erschien, bestehend aus der elektrodynamischen Prüfmaschine des Typs Instron ElectroPuls™ E1000 und dem berührungslos arbeitenden Videoextensometer AVE. In diesem Artikel werden einige Erfahrungen mit diesem Prüfsystem beschrieben.

Im Jahre 2007 wurde an der Universität Bremen der DFG-Sonderforschungsbereich 747 „Mikrokaltumformen – Prozesse, Charakterisierung, Optimierung“ eingerichtet. Das zentrale Anliegen dieses Sonderforschungsbereiches ist die Bereitstellung von Prozessen und Methoden für die umformtechnische Herstellung metallischer Mikrokomponenten, d. h. Komponenten, die in mindestens zwei Dimensionen kleiner als 1 Millimeter und in der dritten kleiner als 5 mm sind [1]. Hierbei sollen die für den Umformprozess von der Werkstoffentwicklung bis hin zur Bauteilprüfung wesentlichen Aspekte einbezogen werden [2].

Das Teilprojekt B4, in dem drei der Autoren tätig sind, beschäftigt sich in diesem Umfeld mit der Untersuchung des mechanischen Verhaltens dünner metallischer Halbzeuge und daraus hergestellter Bauteile, das im Allgemeinen nicht aus dem Verhalten von Halbzeugen und Bauteilen mit wesentlich größerer Wandstärke abgeleitet werden kann. Die Ursachen hierfür sind der statis-

tische und technologische Größeneinfluss, der dominierende Anteil der Oberfläche sowie die Abmessungen in der Nähe der Mikrostrukturgrößen. So sind zum Beispiel an Mikroblechen, bei denen sich die Blechdicke in der Größenordnung der Korngröße bewegt, gegenüber Blechen größerer Dicke abweichende mechanische Eigenschaften zu beobachten.

Aus diesem Grund ist es notwendig, das mechanische Verhalten der hergestellten Halbzeuge sowie ihr Verhalten nach der Umformung im Bauteil auch unter Versagensbedingungen grundlegend zu untersuchen und die Berechenbarkeit und Übertragbarkeit der mechanischen Kennwerte zu erforschen. Für derartige Untersuchungen bedarf es eines Prüfsystems, das den besonderen Anforderungen an die sowohl statischen wie auch zyklischen Untersuchungen von Mikroproben gerecht wird. So ist es notwendig, geringe Kräfte und Hübe mit ausreichender Genauigkeit einzustellen und zu regeln sowie eine Dehnungsmessung zu realisieren, die der

mechanischen Empfindlichkeit der Prüflinge Rechnung trägt. Ein derartiges Materialprüfsystem steht dem Sonderforschungsbereich seit zwei Jahren zur Verfügung. Im Folgenden sollen einige Erfahrungen mit diesem System vorgestellt werden.

Prüfmaschine für Mikroproben

Die zentralen Anforderungen an ein Prüfsystem für Mikroproben und -bauteile, das sowohl statische wie auch zyklische Untersuchungen zulassen soll, lassen sich in drei Bereiche gliedern:

1. Kraft: Werkstoff und Probendimension der Prüflinge bestimmen den notwendigen von der Prüfmaschine abzudeckenden Kraftbereich. Insbesondere muss im Hinblick auf den dynamischen Betrieb eine gute Kraftregelbarkeit bei kleinen Kräften gewährleistet sein.

2. Dynamik: Erwünscht ist eine möglichst hohe dynamische Leistungsfähigkeit, d. h., bei einem hinsichtlich Werkstoff und Geometrie vorgegebenen

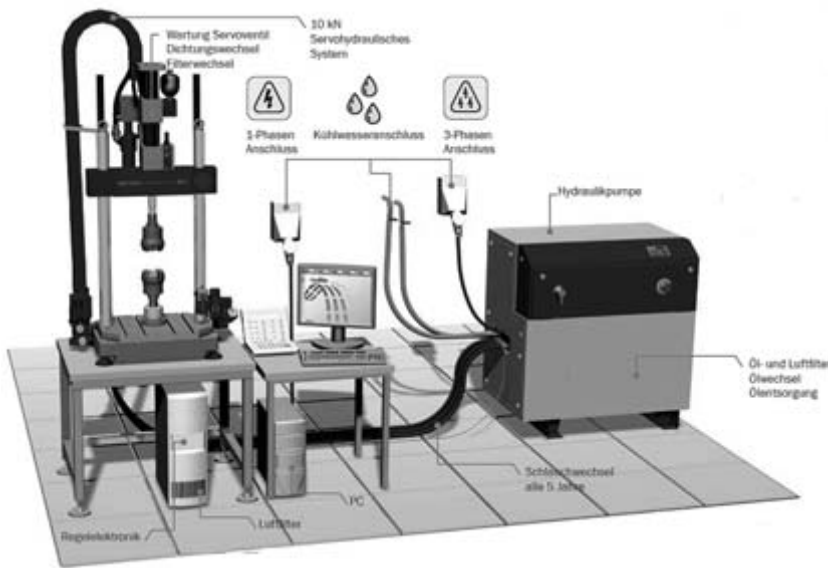


Bild 1. Servohydraulische Prüfmaschine (Quelle: Instron.com)

Figure 1. Servohydraulic testing machine (source: Instron.com)

Prüfling soll eine hinreichende Wegamplitude bei möglichst hoher Schwingfrequenz und unter Einhaltung der vorgegebenen Schwingform (z. B. sinusförmig) realisierbar sein.

3. Hub: Um statische Zug- und Druckversuche zu ermöglichen, ist ein ausreichend großer Kolbenhub notwendig.

Da Resonanzpulser keine statischen Versuche zulassen und sowohl servo-

pneumatische wie auch Spindelprüfmaschinen den genannten Anforderungen hinsichtlich der dynamischen Leistungsfähigkeit und Regelbarkeit nicht gerecht werden, erweisen sich nur elektrodynamisch oder servohydraulisch angetriebene Prüfsysteme als prinzipiell geeignet.

Elektrodynamisch angetriebene Prüfmaschinen sind auf dem Markt in unter-

schiedlichsten Größen mit Maximalkräften zwischen $\pm 22 \text{ N}$ und $\pm 10 \text{ kN}$ erhältlich. Demgegenüber leisten die kleinsten servohydraulischen Systeme schon eine Maximalkraft von 5 kN. Je nach Festigkeit und Dimension der Prüflinge bewegen sich die zur Prüfung von Mikroproben benötigten Kräfte weit überwiegend im Bereich bis 1000 N, wobei z. B. für die Prüfung von dünnen Blechen, deren Dicke im Bereich $10 \mu\text{m}$ liegt, aber lediglich Kräfte von weniger als 10 N benötigt werden.

Obwohl elektrodynamische und servohydraulische Systeme bei größeren Kräften prinzipiell vergleichbare dynamische Leistung zeigen, erweisen sich auch die kleinsten servohydraulischen Prüfmaschinen, aufgrund der an der Maschine relativ großen bewegten Massen, bei zyklischen Versuchen mit Kräften im Bereich einiger Newton als schlecht regelbar. Darüber hinaus zeigt sich der elektrodynamische Antrieb gegenüber dem servohydraulischen in einigen weiteren Kriterien als überlegen, die in den Bildern 1 und 2 am Beispiel zweier 10-kN-Maschinen schematisch gegenübergestellt sind:

Das elektrodynamisch angetriebene Prüfsystem hat durch das nicht notwendige Hydraulikaggregat einen geringeren Platzbedarf, es benötigt weder einen

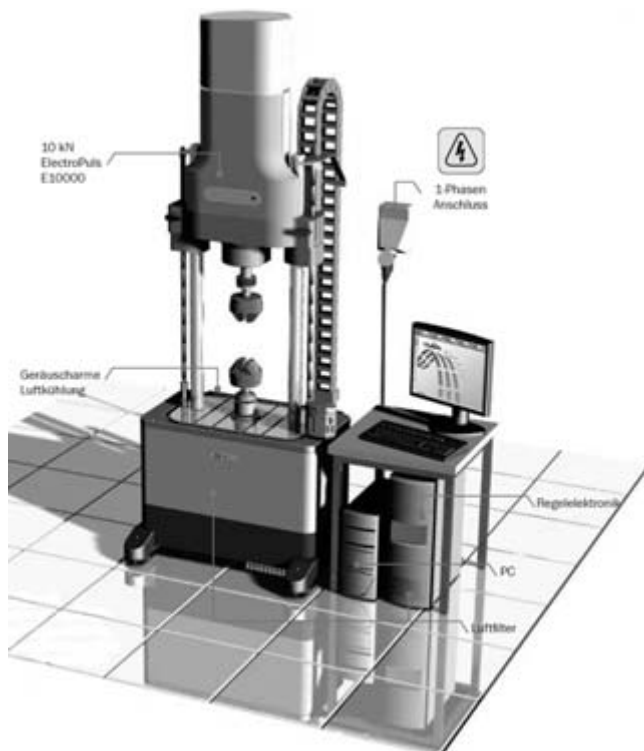


Bild 2. Elektrodynamische Prüfmaschine (Quelle: Instron.com)

Figure 2. Electrodynamic testing machine (source: Instron.com)



Bild 3. Prüfmaschine Instron ElectroPuls E1000

Figure 3. Testing machine Instron ElectroPuls E1000

3-Phasen-Stromanschluss noch einen Kühlwasseranschluss und ist weniger wartungsintensiv, da Arbeiten wie Hydraulikschlauchwechsel, Ölfilterwechsel, Dichtungswchsel, Ölwechsel und -entsorgung sowie Wartung der Servoventile entfallen. Es arbeitet außerdem relativ geräuscharm und weist einen vergleichsweise niedrigen Stromverbrauch auf. Das elektrodynamische Antriebskonzept erweist sich somit gegenüber dem servohydraulischen angesichts des Anforderungsprofils für die Prüfung von Mikroproben als deutlich überlegen.

Die auf dem Markt erhältlichen elektrodynamischen Prüfsysteme unterscheiden sich neben ihren Maximalkräften insbesondere durch ihren maximalen Kolbenhub, der bei statischen Zugversuchen von besonderer Relevanz ist. So zeigt ein Teil der Prüfmaschinen einen maximalen Kolbenhub von lediglich 25 mm oder weniger. Bei manchen elektrodynamischen Systemen wird darüber hinaus zum Aufbringen der statischen Last ein aufwendiger und kostenintensiver zusätzlicher Antrieb benötigt. Unter Einbeziehung aller relevanten Anforderungen an die statische und zyklische Werkstoffprüfung von Mikroprüflingen erschien eine elektrodynamische Prüfmaschine des Typs Instron ElectroPuls E1000 (Bild 3) am besten geeignet.

Diese Prüfmaschine wird durch einen bürstenlosen Linearmotor angetrieben und deckt einen Kraftbereich von ± 710 N statisch und ± 1000 N zyklisch ab. Sie hat eine Prüfraumhöhe von bis zu 610 mm, und der maximale Kolbenhub beträgt 60 mm. Er ist damit hinreichend für die Durchführung statischer Zugversuche. Die Positionsbestimmung des Kolbens erfolgt im Einrichtungsbetrieb mit einem linear variablen Differential-Transformator (LVDT) und bei Wegregelung über einen kalibrierten Inkrementalgeber. Zur Kraftmessung stehen zwei nach ISO 7500-1 kalibrierte Kraftmessdosen vom Typ Instron Dynacell mit Messbereichen von ± 2 kN bzw. ± 250 N und automatischer Massenkraftkompensation zur Verfügung.

Ein besonderes Augenmerk lag bei der Auswahl des Prüfsystems auf der Qualität der Kraftregelung bei kleinen Kräften im zyklischen Betrieb.

Bild 4 zeigt die Schwankung der Kraftamplitude anhand eines Zugschwellversuches mit sinusförmiger Belastung bei

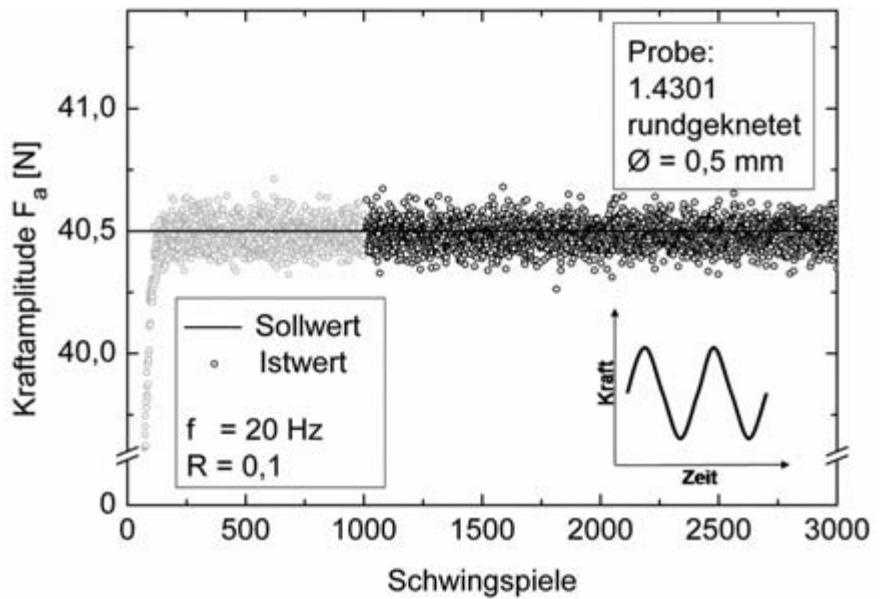


Bild 4. Schwankung der Kraftamplitude im zyklischen Betrieb

Figure 4. Fluctuation of load amplitude during cyclic test

einem Spannungsverhältnis $R = 0,1$ und einer Frequenz $f = 20$ Hz. Als Probe diente ein mikrorundgeknieteter Draht aus dem Stahl 1.4301 mit einem Durchmesser von 0,5 mm. Aufgetragen sind die Istwerte der Kraftamplitude bei einer Sollwertvorgabe von $F_a = 40,5$ N. Der über 2000 Schwingspiele gemittelte Istwert für die Kraftamplitude ergibt sich zu $\bar{F}_a = 40,487$ N mit einer Standard-

abweichung $s = 0,055$ N. Hierbei sind die ersten 1000 Zyklen bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt, um sicherzustellen, dass das Ergebnis nicht durch den Einschwingprozess verfälscht wird. Eine Normierung der Standardabweichung auf den Messbereich der verwendeten Kraftmessdose führt auf

$$s_n = s/250 \text{ N} = 0,00022 = 0,022 \text{ \%}$$

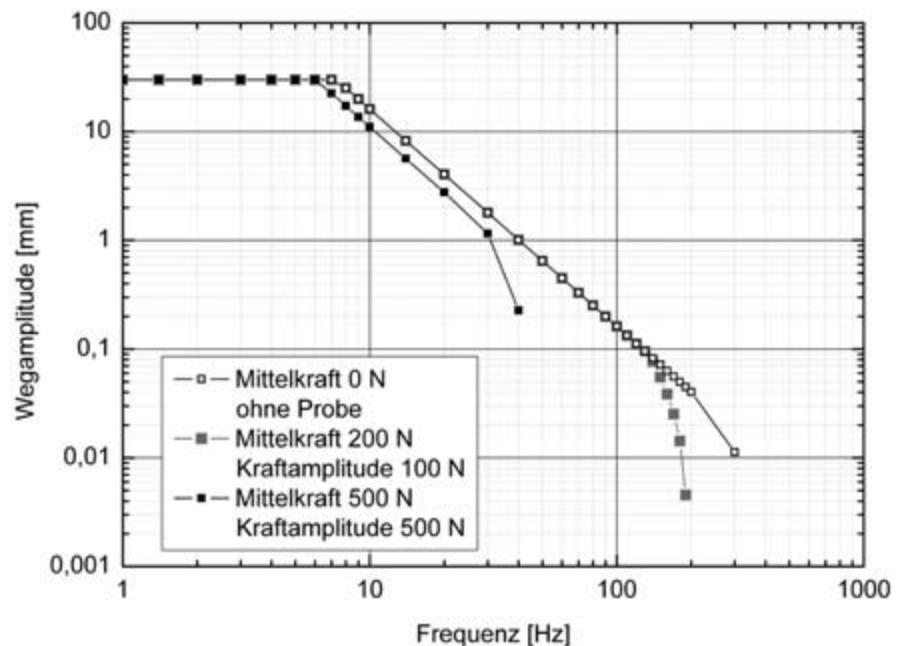


Bild 5. Dynamische Leistungsfähigkeit der Prüfmaschine ElectroPuls E1000 (Quelle: Instron.com)

Figure 5. Dynamic performance plot of the testing machine ElectroPuls E1000 (source: Instron.com)

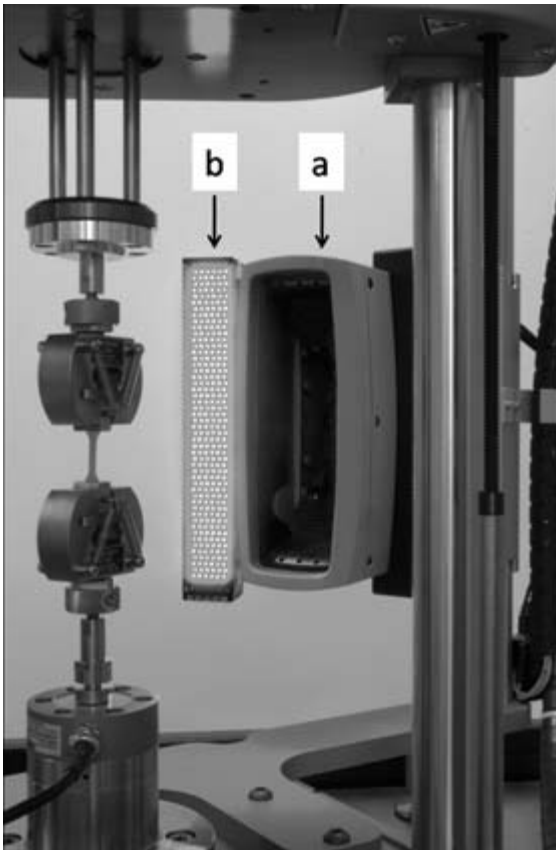


Bild 6. Video-Extensometer AVE (a) mit integrierter Beleuchtungseinheit (b)
 Figure 6. Video extensometer AVE (a) with integral illumination unit (b)

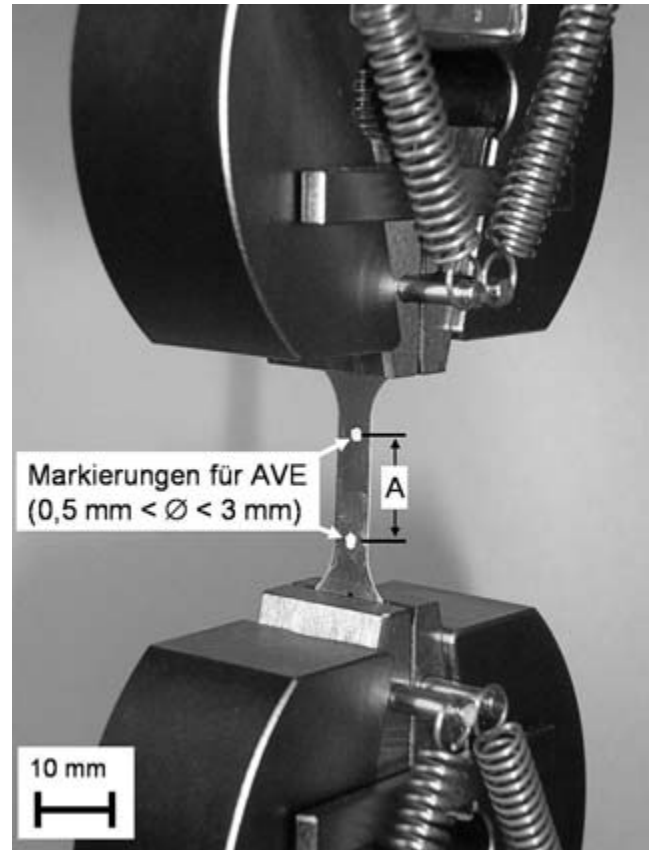


Bild 7. Messmarkierungen für das AVE auf einer Zugprobe
 Figure 7. Gauge marks applied to a tensile specimen for the AVE

Im Unterschied zu der Materialprüfung mit Resonanzpulsern ist bei dem linearmotorangetriebenen elektrodynamischen System die Prüffrequenz in gewissem Umfang wählbar. Die dynamische Leistungsfähigkeit des Prüfsystems ist beispielhaft in Bild 5 dargestellt, in dem der Zusammenhang zwischen der Prüffrequenz und dem Betrag der erreichbaren Wegamplitude für drei verschiedene Belastungszustände dargestellt ist. Hierbei stellt die Kurve, die ohne eingebaute Probe bestimmt wurde, eine Grenzkurve dar, die sich aufgrund der maximal möglichen Beschleunigungen der bewegten Massen ergibt. Betrachtet man die entsprechende Auftragung mit eingebauter Probe bei einer statischen Mittellast von 200 N und einer Kraftamplitude von 100 N, so zeigt sich, dass erst ab Frequenzen über 100 Hz signifikante Abweichungen gegenüber der Grenzkurve auftreten. Bei Erhöhung der Mittellast auf 500 N und Vergrößerung der Amplitude auf 500 N ist eine Verschiebung der Kurve in Richtung kleinerer Frequenzen zu beobachten, d. h., eine gegebene Wegamplitude ist hier

nur bei einer Verkleinerung der Prüffrequenz zu realisieren. Prinzipiell zeigt das Leistungsdiagramm, dass mit dem Prüfsystem bei zyklischen Versuchen Prüffrequenzen von 100 Hz erreichbar sind, sofern die Proben eine hinreichende Steifigkeit aufweisen.

Berührungslose Dehnungsmessung

Vor dem Hintergrund der Mikrodimensionen der Prüflinge, so betragen typische Blechdicken zwischen 10 und 100 μm , ist eine Dehnungsmessung mit den Prüfling kontaktierenden Methoden wie Dehnungsmessstreifen oder Ansatzdehnungsaufnehmern nicht praktikabel. Einerseits besteht die Gefahr, die Proben beim Anbringen der jeweiligen Dehnungsmessung zu beschädigen, und andererseits ist der Einfluss dieser Dehnungsmessmethoden auf das Ergebnis nicht vernachlässigbar, wie es bei großen Proben der Fall ist. Aus diesem Grund wurde einer berührungslosen, optischen Dehnungsmessung der Vorzug gegeben.

Eine solche in das ElectroPuls-Prüfsystem implementierte Lösung, steht in Form des Instron Advanced-Video-Extensometers (AVE) zur Verfügung (Bild 6). Das AVE besteht im Wesentlichen aus einer hochauflösenden digitalen Videokamera und einer LED-Beleuchtungseinheit, die die Probe mit gepulstem, monochromatischem, rotem und polarisiertem Licht mit einer Wellenlänge von 650 nm beleuchtet.

Hierbei ist die Videokamera in der verwendeten Konfiguration mit einer auf kleine Proben optimierten Optik mit 55 mm Brennweite ausgestattet, die ein Blickfeld von insgesamt 60 mm in axialer und 8 mm in transversaler Richtung zulässt. Die Dehnungsmessung erfolgt, indem die axiale Bewegung von auf der Probe aufgetragenen Markierungen mit der Videokamera verfolgt und aus dieser in Realzeitbildverarbeitung die Dehnung errechnet wird.

Die zur Dehnungsberechnung notwendige Bestimmung der durch die aufgetragenen Markierungen definierten Ausgangsmesslänge wird vor Beginn des Versuches ebenfalls mit dem kalibrierten

brierten AVE mit einer absoluten Genauigkeit von $\pm 2,5 \mu\text{m}$ durchgeführt. Als Markierungen dienen zwei Punkte mit einem Durchmesser zwischen 0,5 und 3 mm (Bild 7), alternativ Linien mit einer Stärke zwischen 0,25 und 2,5 mm, die auf unterschiedliche Art auf die Probe appliziert werden können, z. B. mittels eines geeigneten Markers und einer Schablone oder durch Aufkleben entsprechender Markierungen.

Durch geeignete Farbwahl muss hierbei ein ausreichender Kontrast zwischen Markierung und Probenuntergrund sichergestellt sein. Darüber hinaus fungiert ein zweiter Polarisationsfilter vor dem Objektiv der Videokamera als Analysator, so dass störende Reflexe von der Probenoberfläche unterdrückt werden und eine optimale Abgrenzung zwischen den Messmarkierungen und der Probenoberfläche ermöglicht wird. Zusätzlich sorgt ein elektronischer Bandpassfilter in der Kamera dafür, dass nur Licht entsprechend der Wellenlänge der monochromatischen Beleuchtungseinheit passieren kann, so dass der Einfluss von Umgebungslicht unterdrückt wird. Während der Messung werden die Schwerpunkte der flächigen Markierungen in Realzeit berechnet, und aus deren Abstand wird die Dehnung bestimmt. So wird sichergestellt, dass mögliche Fehler durch Verformung der Markierungen bei starken Dehnungen vermieden werden. Die minimale Ausgangsmesslänge, also der Abstand zwischen den Markierungen zu Versuchsbeginn, beträgt bei der verwendeten Kameraoptik 5 mm, die maximale Verfolgungsgeschwindigkeit der Markierungen 150 mm/min. Bei Verwendung der 55-mm-Optik ist die Auflösung der Wegmessung $0,5 \mu\text{m}$, und die absolute Genauigkeit beträgt $2,5 \mu\text{m}$ bzw. 0,5 % der Messlänge, je nachdem was größer ist.

Bild 8 zeigt Ergebnisse von statischen Zugversuchen an Flachproben der in Bild 9 skizzierten Form. Gemessen wurden die Dehngrenze $R_{p0,2}$, die Zugfestigkeit R_m und die Bruchdehnung A an Al-99,5-Mikroblechen einer Blechdicke von $100 \mu\text{m}$ mit unterschiedlichen Abzugsgeschwindigkeiten. Die Dehnrate konnte über mehr als zwei Größenordnungen variiert werden, und es gelang mit dem AVE, die Dehnung bis zu einer nominellen Abzugsgeschwindigkeit von 5 mm/s zu bestimmen, was hier einer Dehnrate von mehr als $0,2 \text{ s}^{-1}$ entspricht.

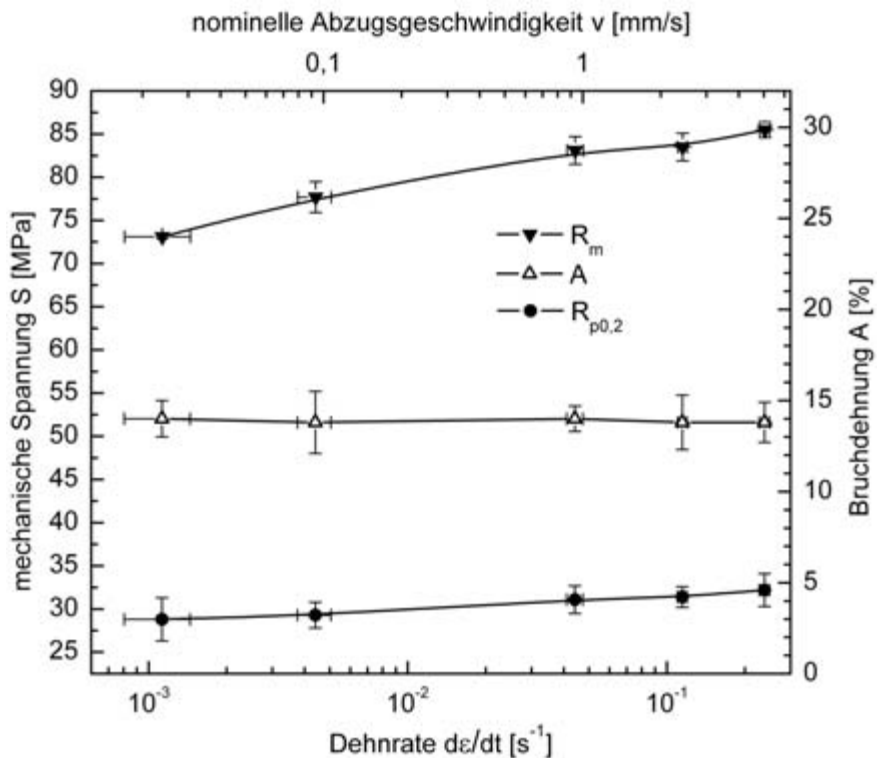


Bild 8. Mechanische Kennwerte von Mikroflachproben aus Al 99,5 (Blechdicke $100 \mu\text{m}$) in Abhängigkeit von der Dehnrate

Figure 8. Mechanical properties of micro-flat-specimen of Al 99:5 (thickness $100 \mu\text{m}$) in dependence of the strain-rate

Neben der axialen Dehnungsmessung lässt das Videodensometer auch Messungen in transversaler Richtung zu. Es erfüllt die Normen ASTM E 8, EN 10002-1 und ISO 6892 für Tests an Metallen.

Mithilfe des ElectroPuls-Prüfsystems konnten in den vergangenen zwei Jahren in Kooperation mit verschiedenen anderen Teilprojekten des DFG-Sonderforschungsbereichs auf unterschiedlichen Feldern Beiträge geliefert werden: Die Weiterentwicklung eines PVD-gestützten Herstellungsprozesses von AlSc-Mikroblechen wurde von umfangreichen Untersuchungen ihrer mechanischen Eigenschaften begleitet [3]. Außerdem dienten die ermittelten me-

chanischen Kennwerte der Optimierung von Mikrokaltumformprozessen wie dem Tiefziehen [4] und fanden ebenfalls Eingang in FEM-Simulationen [5]. Nicht zuletzt konnten bei Mikroproben abweichende mechanische Eigenschaften beobachtet werden [6], die auf typische Größeneffekte zurückgeführt wurden, wie sie beim Übergang in den Mikrobereich auftreten [7]. Insgesamt hat sich das hier beschriebene Prüfsystem im DFG-Sonderforschungsbereich 747 und in dem dort bei der Prüfung von Mikroproben und Bauteilen breit gefächerten Anforderungsspektrum bei statischen wie auch dynamischen Prüfaufgaben als vielseitig einsetzbar erwiesen und bewährt.

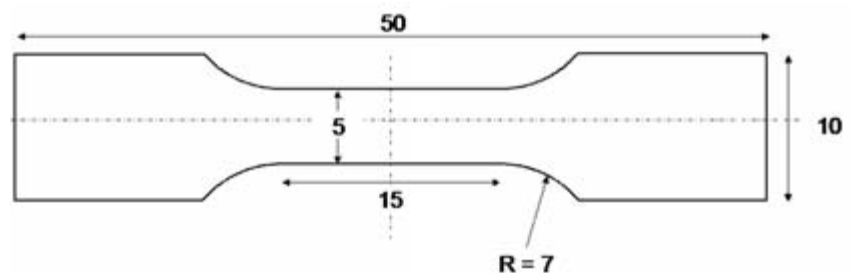


Bild 9. Skizze der Zugprobe

Figure 9. Sketch of the tensile specimen

Abstract

Material testing of micro-specimen and semi-finished micro-products. The central concern of the 2007 founded Collaborative Research Centre 747 „Micro Cold Forming“ of the „Deutschen Forschungsgemeinschaft“ (DFG) is the supply of processes and methods for the forming-technical manufacturing of metallic micro-components. The subproject B4, component strength, employs three of the authors and deals with static and dynamic investigations of mechanical properties from micro-specimens and semi-finished micro-products. The mechanical testing of such micro-specimens needs an especially adapted testing equipment. Within the context of this special requirements profile, the different classes of testing machines, being worth considering here, are discussed. For carrying out the above mentioned project, the most convenient testing system has been procured, consisting of the electrodynamic testing machine Instron Electropuls™ E1000 and the non contact video extensometer Instron AVE. In this article some experiences with this testing system will be described.

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieser Untersuchungen im Rahmen des Teilprojekts B4 „Bauteilfestigkeit“ im Sonderforschungsbereich 747 „Mikrokalumformen – Prozesse, Charakterisierung, Optimierung“.

Literatur

- 1 F. Vollertsen: Size effects in manufacturing, F. Vollertsen, F. Hollmann (Hrsg.): Strahltechnik vol. 24, BIAS Verlag Bremen (2003), S. 1-9, ISBN 3-933762-14-6
- 2 F. Vollertsen, R. Walther: Chancen und Grenzen der Mikroumformtechnik – Der Sonderforschungsbereich 747, O. Kraft, B. Emmerich (Hrsg.): Kolloquium Mikroproduktion – Fortschritte, Verfahren, Anwendungen, Karlsruhe (2007), S. 19-23, ISBN 978-3-923704-61-3
- 3 H.-R. Stock, B. Köhler, H. Bomas, H.-W. Zoch: Properties of aluminium-scandium alloy thin sheets produced by physical vapour deposition, *Materials and Design*, 31 (2010), pp. 576-581
- 4 F. Vollertsen, Z. Hu, H.-R. Stock, B. Koehler: On the limit drawing ratio of magnetron sputtered aluminium-scandium foils within micro deep drawing, *Prod. Eng. Res. Devel.*, accepted, doi: 10.1007/s11740-010-0229-2

- 5 P. Bobrov, J. Lütjens, J. Montalvo Urquiza, W. Wosniok, M. Hunkel, A. Schmidt, J. Timm: Zu einer verteilungsbasierten Modellierung von Mikrowerkstoffen, F. Vollertsen, S. Büttgenbach, O. Kraft, W. Michaeli (Hrsg.): 4. Kolloquium Mikroproduktion, BIAS Verlag Bremen (2009), S. 235-242, ISBN 978-3-933762-32-0
- 6 B. Köhler, H. Bomas, J. Lütjens, M. Hunkel, H.-W. Zoch: Yield strength behaviour of carbon steel microsheets after cold forming and after annealing, *Scripta Mat.* 62 (2010), p. 548-555
- 7 F. Vollertsen, D. Biermann, H. N. Hansen, I. S. Jawahir, K. Kuzman: Size effects in manufacturing of metallic components, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 58, 2 (2009), p. 566-587

Die Autoren dieses Beitrags

Dr. rer. nat. Bernd Köhler, Jahrgang 1964, studierte 1984 bis 1993 Physik an der Universität Göttingen. Seit 1993 war er am dortigen Insti-

tut für Materialphysik als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig, wo 1999 die Promotion mit dem Thema „Untersuchungen zur Wanderung und Charakterisierung thermischer Defekte in geordneten FeAl-Legierungen mit der Positronenannihilation“ erfolgte. 2001 wechselte er als Leiter der Auftragsabwicklung und technischer Kundenberater zur Trinos Vakuum-Systeme GmbH, Göttingen. Seit 2006 ist er in der Abteilung Strukturmechanik der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen, als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig.

Dr. rer. nat. Hubert Bomas, Jahrgang 1947, studierte 1968 bis 1974 Physik an der Universität Münster. 1974 wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter am damaligen Institut für Härtereitechnik, heute Institut für Werkstofftechnik, in Bremen. 1980 promovierte er an der Universität Bremen mit dem Thema „Einfluss des Mangans auf die Abschreckempfindlichkeit von Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierungen“. Seit 1986 leitet er die Abteilung Strukturmechanik an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik in Bremen.

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, Jahrgang 1953, studierte 1974 bis 1979 Allgemeinen Maschinenbau an der Technischen Hochschule Darmstadt. Von 1980 bis 2000 war er bei der FAG Kugelfischer Georg Schäfer AG in Schweinfurt tätig, ab 1998 als Leiter der Konzern-Forschung und Entwicklung. 2001 bis 2004 war er Geschäftsführer der Neuen Materialien Bayreuth. Seit 2004 ist er Professor für Werkstoffwissenschaften (Metalle) im Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen und Geschäftsführender Direktor der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen, sowie Direktor der Amtlichen Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen. Seit 2004 ist er Sprecher des DFG-Sonderforschungsbereiches 570 „Distortion Engineering“.

Dipl.-Ing. (FH) Jens Stalkopf, Jahrgang 1966, studierte 1985 bis 1989 Allgemeinen Maschinenbau an der Offiziershochschule der Luftstreitkräfte/Luftverteidigung in Kamenz. Ab 1991 bis 2000 arbeitete er im Vertriebsaußendienst bei der Firma Max Fuchs Prüfsysteme GmbH, Kirchehrenbach, von 2000 bis 2003 im Vertriebssupport der Firma Roell Amsler Prüfmaschinen GmbH & Co. KG, Gottmadingen. Seit 2003 ist er im Vertrieb für dynamische Prüfsysteme bei der Firma Instron Deutschland GmbH, Pfungstadt, beschäftigt.

You will find the article and additional material by entering the document number MP110183 on our website at www.materialstesting.de