

Automatische Auswertung von Messrastern zur Dehnungsanalyse

Strain Analysis by Automatic Grid Evaluation

Roland Höfling, Peter Feldmann, ViALUX Messtechnik+Bildverarbeitung GmbH, Chemnitz

Manuskripteingang: 03. Juli 2002; zur Veröffentlichung angenommen: 09. August 2002.

Vorgestellt wird ein neues optisches Messsystem zur experimentellen Dehnungsanalyse auf der Basis von applizierten Messrastern, die sich mit dem Werkstoff verformen. Die Grundlagen der Messtechnik werden erläutert und die Leistungsmerkmale des AutoGrid-Systems sowie seine vielfältigen Einsatzmöglichkeiten werden anhand von repräsentativen praktischen Beispielen beschrieben.

A new optical measuring system for strain analysis is presented based upon a measuring grid on the surface of sheet metal parts. The basics of this measuring technique are explained, features of the AutoGrid System and typical fields of application are demonstrated by practical examples.

Schlagwörter: optische Dehnungsmessung, Photogrammetrie, Umformtechnik

Keywords: Strain analysis, photogrammetry, metal sheet forming

Zur sicheren Beherrschung der Produktionsprozesse beim umformenden Herstellen von Blech- und IHU-Teilen, z. B. im Automobilbau, müssen einerseits die Umformeigenschaften des eingesetzten Werkstoffes bekannt sein und andererseits muss das Teil selbst und seine umformende Herstellung so gestaltet sein, dass vielfältige Anforderungen an die Funktionalität, Qualität und Produktivität erfüllt werden. Neben der inzwischen schon üblichen theoretischen Analyse von Umformvorgängen z. B. durch numerische FEM-Simulation sind experimentelle Analysen des Umformvorganges dafür unerlässlich. Die nachfolgend dargestellte Systemlösung AutoGrid wird dem Wunsch nach weitgehender Automatisierung des Messprozesses gerecht [1] und bietet praxisorientierte Hilfsmittel an, mit denen Ingenieure und Technologen effektiv arbeiten.

1 Messtechnische Grundlagen

Für die experimentelle Analyse der Dehnungen, die ein Werkstoff im Zuge der umformtechnischen Verarbeitung erfährt, müssen körperfeste Markierungen aufgebracht und deren Lageänderung zueinander erfasst werden. Die beim 3D-Digitalisieren eingesetzten Projektionsverfahren schei-

den hierfür grundsätzlich aus. Bild 1 zeigt zwei Markierungstypen vor und nach dem Umformprozess. Werden Kreise auf das Anfangsmaterial aufgebracht, gibt die Länge der Hauptachsen der entstehenden Ellipsen Auskunft über die Hauptformänderungen, bezogen auf den unverformten Anfangszustand (A, B). Diese bisher weit verbreitete Methode hat ihre Grenzen bei mehrstufigen Umformvorgängen [2] und eignet sich nur bedingt für automatische Auswertesysteme. Hier wird daher eine Methode eingesetzt, die sich auf **quadratische Messraster** stützt, so wie sie in Bild 1 C und D dargestellt sind.

Vorzüge quadratischer Messlinienraster für die experimentelle Formänderungsanalyse sind:

- zuverlässige gute Messbarkeit,
- Eindeutigkeit auch bei mehrstufigen Umformprozessen,
- gute Automatisierbarkeit der 3D-Messung.

Durch die Gitterlinien ist auch die exakte Zuordnung der Kreuzungspunkte innerhalb des Messrasters garantiert.

Zur Berechnung der Formänderungen bei großen Deformationen müssen die Raumkoordinaten der markierten Werkstoffpunkte auf den umgeformten, doppelt gekrümmten Werkstückflächen und deren Lage im Anfangszustand des

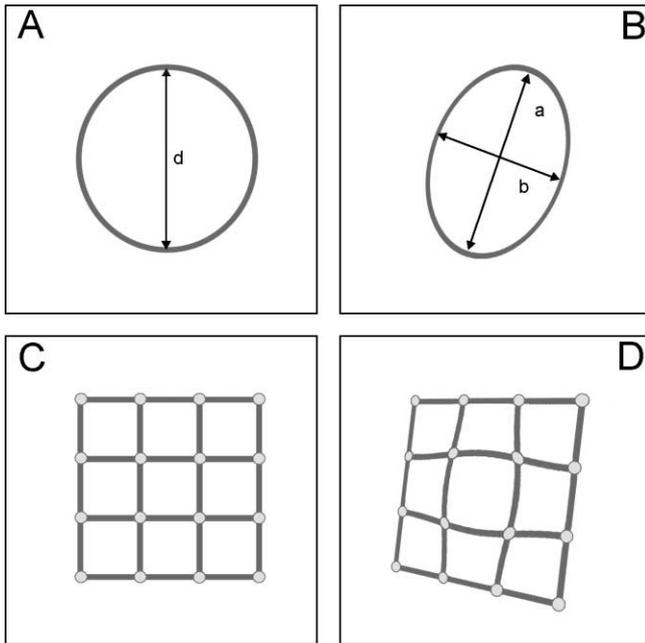


Bild 1: Kreis- und Quadratraster zur Werkstoffmarkierung für die Formänderungsanalyse.

zu analysierenden Umformschrittes bekannt sein. In einem vorbereitenden Schritt sind die Anfangsmaterialien, im Allgemeinen ebene Bleche oder zylindrische Rohre, mit dem quadratischen Messraster zu versehen. Dafür haben sich elektrochemische Verfahren bewährt. Sie liefern für eine Reihe von Werkstoffen (vor allem Stahl, aber auch Al-Legierungen) sehr kontrastreiche, abriebfeste Markierungen. Alternativ können Druckverfahren oder auch die Laserbeschriftung zum Einsatz kommen.

Die verzerrten Messraster werden in den zu untersuchenden Stadien des Umformprozesses mit einem Kameraensemble aufgenommen und als Pixeldateien für die weitere Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Dabei können die Bilder

des verformten Messrasters im Anschluss an den Umformprozess aufgenommen oder auch direkt während der Umformung (in-process) aufgezeichnet werden, wenn ein optischer Zugang gewährleistet ist. Die Bildvermessung der vielen tausend Rasterpunkte erfolgt automatisch und arbeitet auch dann weitgehend störungsfrei, wenn die Bilder kleinere Unzulänglichkeiten (Unschärfe, schlechter Kontrast z. B. durch Messraster-Abrieb, ungleichmäßige Ausleuchtung und Lichtreflexionen) aufweisen.

Der Kern des messtechnischen Konzeptes, das photogrammetrische Prinzip, beruht auf geometrischen Annahmen zur Abbildung eines Objektes mit mehreren, mindestens aber zwei Kameras. Bild 2 zeigt eine solche Situation: Herausgegriffen ist der Objektpunkt P, der als Bildpunkt P' in der Kamera 1 und P'' in der Kamera 2 erscheint. Die eingezeichneten Verbindungslinien entsprechen der Zentralprojektion, d. h. der Abbildung mit sehr kleinen Blendenöffnungen, die als Projektionszentren Q' bzw. Q'' eingetragen sind. Bei Kenntnis der Orientierung der Kameras (z'- bzw. z''-Achse) und des Abstandes zwischen Blende und Bild (c', c'') können die drei Raumkoordinaten des Objektpunktes P(x_P, y_P, z_P) aus den zugehörigen Bildpunktkoordinaten P'(x'_P, y'_P) und P''(x''_P, y''_P) in beiden Kameras berechnet werden [3]. Bei Verwendung von mehr als zwei Kameras wird die Überbestimmtheit zur Verbesserung der Messgenauigkeit und Robustheit ausgenutzt.

In der Formänderungsanalyse mittels Videogrammetrie bilden mehrere Kameras das Messraster ab. Die automatische Bildanalyse verfolgt die Rasterlinien und kann somit identische Punkte in allen Bildern identifizieren, wenn am Beginn ein gemeinsamer Startpunkt interaktiv zugeordnet wurde. Aus den Bildkoordinaten der Kreuzungspunkte lassen sich die Raumkoordinaten des gesamten deformierten Messrasters exakt bestimmen. Voraussetzung dafür ist eine eingemessene (kalibrierte), feste Kamerakonfiguration mit bekannten Parametern z', Q', und c'.

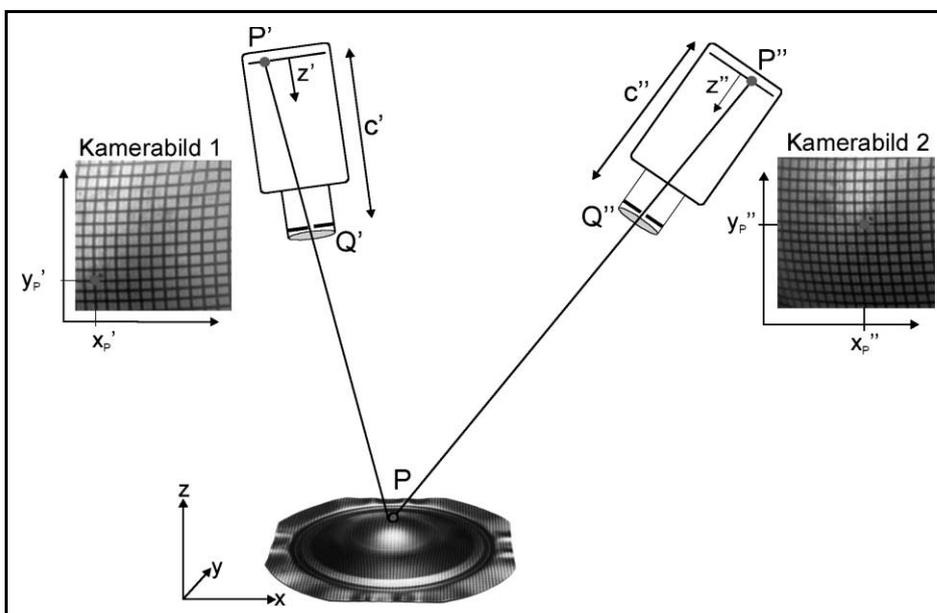


Bild 2: Prinzip der Photogrammetrie.

Damit ist der Weg bereitet für die Dehnungsberechnung. Typisch für umformtechnisch hergestellte Bauteile sind kontinuierliche, im mathematischen Sinn stetig differenzierbare Flächen. Diese Eigenschaft macht es möglich, Berechnungsverfahren der Kontinuumsmechanik einzusetzen. Die hohe Punktdichte des Messrasters erlaubt den Übergang zur analytischen Oberflächenbeschreibung durch interpolierende Funktionen und die Berechnung des Formänderungstensors durch nachfolgende Differentiation [4]. Im Ergebnis stehen die beiden Hauptformänderungen in der Tangentialebene eines jeden Punktes im Messraster (φ_1, φ_2) sowie die dazugehörige Hauptformänderungsrichtung zur Verfügung. Für alle Umformvorgänge, bei denen das Materialvolumen konstant bleibt, können auch die Formänderungen senkrecht zur Messfläche ermittelt werden. Mit applizierten Messrastern lässt sich so auch die Änderung in Dickenrichtung zerstörungsfrei bestimmen.

2 AutoGrid – Systemlösung zur Formänderungsanalyse

Im Ergebnis langjähriger Entwicklung und Erprobung ist mit *AutoGrid* (Bild 3) ein leistungsfähiges System entstanden, mit dem die Dehnungsanalyse genauer, leichter und effektiver wird. Es beruht auf dem vorgestellten Konzept der Messrasteranalyse mittels Videogrammetrie. Es wurde eine Konfiguration mit vier eingemessenen CCD-Kameras gewählt. Die Anordnung erlaubt einerseits sehr präzise Messungen durch die starke Überbestimmtheit (jeweils 4×2 Bildkoordinaten zur Bestimmung der 3 Raumkoordinaten eines Rasterpunktes), andererseits kann die Rechnung auto-



Bild 3: *AutoGrid*-System im praktischen Einsatz.

matisch auf die günstigsten Perspektiven mit zuverlässigen Bilddaten beschränkt werden. Damit wird die Auswertung der Bilder wesentlich robuster. Nutzer des Systems müssen nicht über Spezialkenntnisse zur Photogrammetrie verfügen.

Der *AutoGrid*-Messkopf (Bild 4) lässt sich leicht bewegen und in beliebige Lage zum Untersuchungsobjekt bringen. Ein Kabel stellt alle notwendigen Verbindungen zum Messrechner her, der als Standard-PC oder portables Industriesystem ausgelegt sein kann und mit dem Betriebssystem Win/NT eine MS-Windows-kompatible Plattform besitzt.

Für die Aufnahme von Bildfolgen während der Umformung kann das System so erweitert werden, dass alle Kameras synchron arbeiten und je 4 zeitgleiche Bilder aufgenommen werden. Die eingesetzten Kameras ermöglichen den Vollbildmodus, wodurch der exakte Zusammenhang aufeinander folgender Bildzeilen garantiert ist. Die maximale Bildaufnahmefrequenz beträgt 30×4 Bilder pro Sekunde.

Die Software zum Einmessen der Kameras, zur Messrasterverfolgung und Formänderungsberechnung beruht auf Komponenten der Firma AICON 3D Systems aus Braunschweig, einem erfahrenen Spezialisten im Sektor der Photogrammetrie [5]. Besonders robuste Algorithmen zur Messrastererkennung nutzen die Tatsache, dass die vier Bilder der eingemessenen Kameraanordnung in einer festen Relation zueinander stehen und die Linien in allen Perspektiven gleichzeitig verfolgt werden können. Diese Redundanz erhöht die Zuverlässigkeit der Messraster-Analyse. Bild 5 zeigt das Erkennen der Kreuzungspunkte. Die gesamte Punkterkennung in allen vier Kamerabildern und damit die 3D-Messung benötigt nur 2–3 Sekunden Rechenzeit bei maximal $120 \times 120 = 14.400$ Messpunkten.

Größere Objektbereiche mit noch höherer Punktzahl könnten prinzipiell ausgewertet werden, sind aber praktisch wenig sinnvoll bzw. notwendig. Die Größe der Messraster begrenzt die Auswertefläche. Zwar lassen sich beliebig viele Rasterflächen beim Berastern aneinander setzen, sie sollten dann aber auch einzeln vermessen werden, da die



Bild 4: Messkopf mit 4 fest einspannbaren CCD-Kameras.

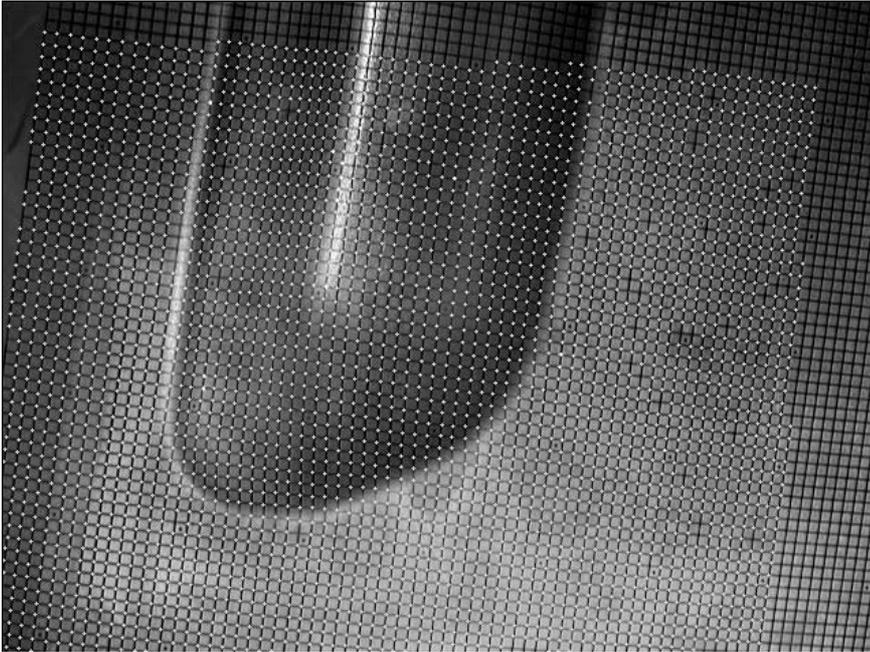


Bild 5: Automatische Rasterkreuzpunkterkennung im Bereich einer Türgriffmulde.

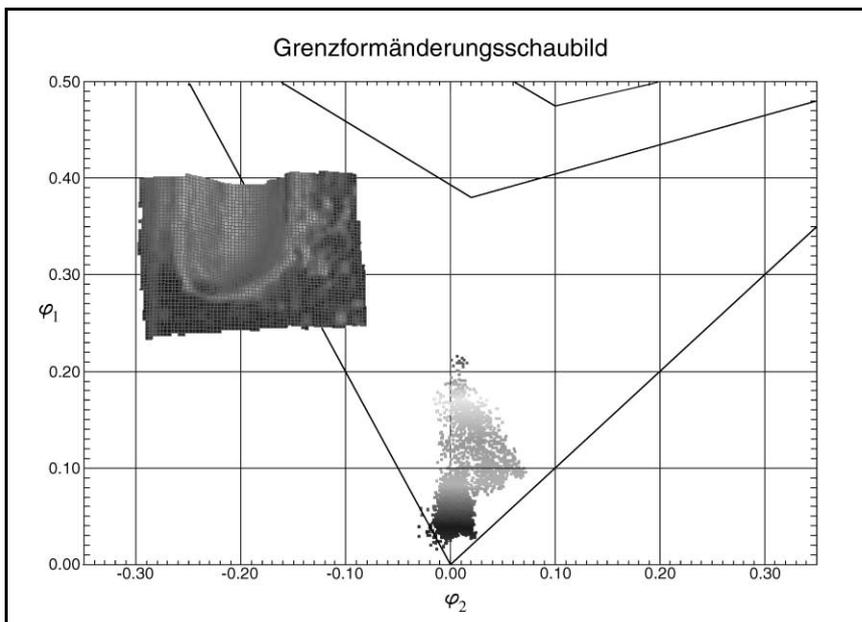


Bild 6: *AutoGrid*-Grafik: Beispiel Türgriffmulde – Grenzformänderungsschaubild.

Übergänge nicht definiert sind. Für die Dehnungsanalyse stellt dieses Vorgehen in der Praxis keine Beschränkung dar, da die *AutoGrid*-Software das Verknüpfen von Messfeldern unterstützt.

Auf die Bestimmung der Raumkoordinaten aller erkannten Kreuzungspunkte im Messraster folgt die Berechnung der Umformgrade. Die dafür benötigte Rechenzeit beträgt maximal ca. 2 min (bei 14.400 Messpunkten). Danach stehen auch alle abgeleiteten Größen zur Verfügung und können mit einem optimal auf die Bedürfnisse des Anwenders angepassten Postprozessor als eingefärbte 3D-Grafik oder als Schnitt im Detail ausgewertet werden. Sowohl Grafiken als auch Daten lassen sich exportieren und direkt z. B. in MS-Office-Anwendungen einbinden.

Werden sämtliche Messpunkte in ein φ_1 - φ_2 -Diagramm eingetragen, entsteht das Formänderungsschaubild. Diese Darstellung lässt bei Kenntnis des Umformvermögens des Werkstoffes direkte Rückschlüsse darauf zu, inwieweit der Umformprozess die Möglichkeiten des Werkstoffes ausschöpft. Als Beispiel zeigt Bild 6 das Formänderungsschaubild für eine Probe aus Tiefziehblech. Abgebildet ist die farbkodierte Darstellung der Formänderung φ_1 .

3 Einsatzgebiete

Die Anwendung konzentriert sich auf drei Schwerpunkte:

- Prozessoptimierung beim Blechumformen und beim Innenhochdruckumformen (IHU) von Rohren

- Verifizieren numerischer Simulationen (FEM)
- Umform-Kennwertermittlung bei Blechen und IHU-Rohren

Darüber hinaus bieten sich vielfältige neue Möglichkeiten bei Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die den Einsatz neuer Werkstoffe oder neuer Umformtechnologien zum Ziel haben.

Exemplarisch wird über zwei Anwendungen berichtet, die das Potential des videogrammetrischen Verfahrens und der *AutoGrid*-Systemlösung veranschaulichen sollen. Im ersten Fall handelt es sich um die Analyse eines IHU-Teils. Das Messraster wurde auf die äußere Mantelfläche des Anfangsrohres aufgebracht. Bild 7 (links) zeigt die Probe nach dem IHU-Prozess. Der Bereich der Ausstülpung weist beträchtliche Dehnungen von über 100% auf. Bei gutem Kontrast wird das stark verzerrte Messraster durch den Linienverfolgungsalgorithmus erfolgreich detektiert; die quantitativen Resultate für zwei Schnitte sind in Bild 7 (rechts) dargestellt.

Das *AutoGrid*-System bietet die Möglichkeit, die Ermittlung der Grenzformänderungskurve von Blechwerkstoffen zu automatisieren und zu vereinfachen. Die Kombination der In-process-Aufnahme von Bildverbänden mit der automatischen Bildauswertung ermöglicht eine völlig neue

Qualität sowie wesentliche Zeiteinsparungen bei der Bestimmung von Grenzformänderungskurven [6]. Bild 8 zeigt das neue Vorgehen schematisch. Der *AutoGrid*-Messkopf wird über die Einrichtung zum Grenzformänderungsversuch gebracht und die Kameras können den interessierenden Bereich der Blechprobe zu jeder Zeit einsehen. Mit einer Frequenz von maximal 30 Hz nimmt das System Bildverbände aus den 4 Kameras auf, während der Stempel die Probe verformt. Gleichzeitig kann das *AutoGrid*-System die Messwerte des Stempelwegs und der Stempel- und Niederhalterkraft jeweils zum Zeitpunkt der Bildaufnahme speichern. Der Versuch wird in einem Zug bis zum Werkstoffversagen durchgeführt. Ein aufwändiges Unterbrechen des Prüfversuchs ist nicht erforderlich.

Für die weitere Auswertung verfügt *AutoGrid* über einen speziellen Softwaremodul, mit dem die Bilder abgespielt und das interessierende Stadium der Deformation unmittelbar vor beginnender Einschnürung oder Riss selektiert werden kann. Zur Unterstützung blendet das System dabei eine Grafik ein, in der zu jedem Bildverband der Zustand im Kraft-Weg-Diagramm dargestellt ist. Sind die Kraft- bzw. Wegintervalle, bei denen das Werkstoff-Versagen eintritt, bereits aus Vorversuchen bekannt, kann die Bildaufnahme auf diesen Bereich konzentriert werden.

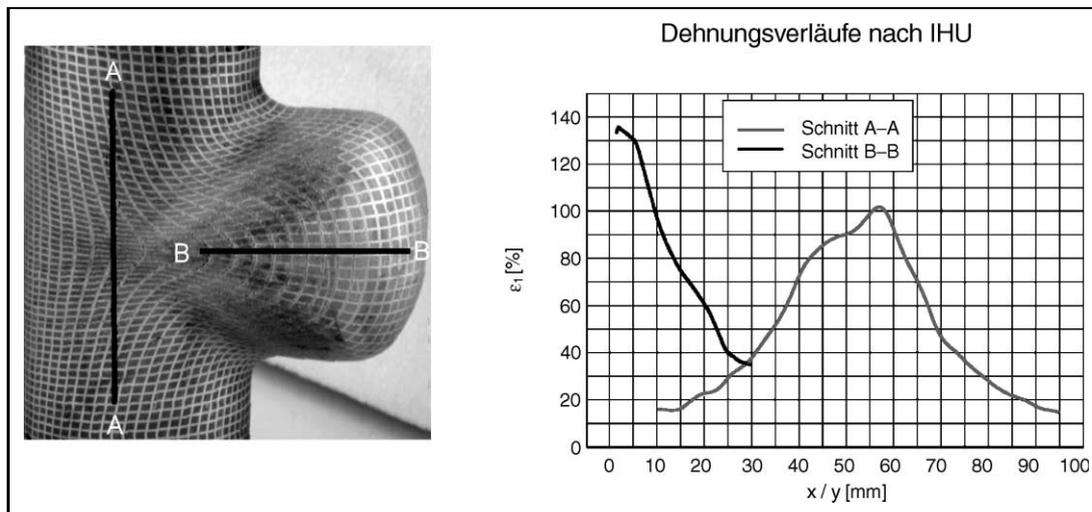


Bild 7: *AutoGrid* – Anwendung beim Innenhochdruckumformen eines Rohres.

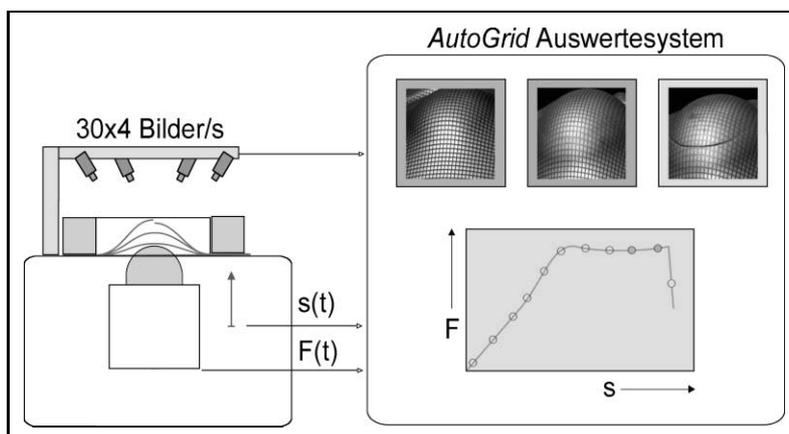


Bild 8: *AutoGrid*-Ermittlung von Grenzformänderungskurven.

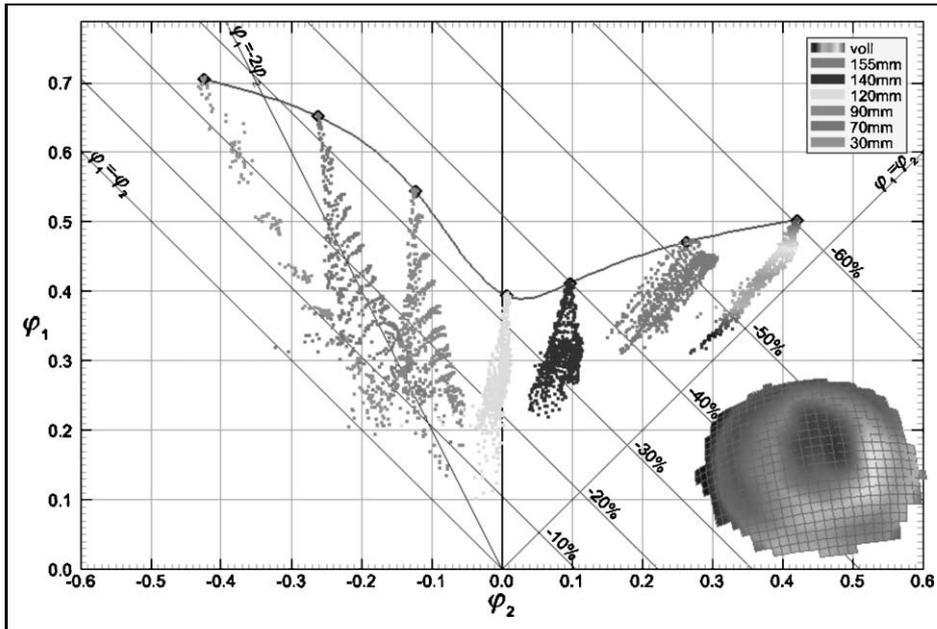


Bild 9: Bestimmen einer Grenzformänderungskurve.

Mit den Umformgraden bei unterschiedlicher Probenform liegen schließlich große Datenmengen im Grenzformänderungsschaubild (Bild 9) vor, aus denen die Grenzformänderungskurve bestimmt werden kann. Damit ist diese neue Lösung auch ein wesentlicher Beitrag zur Standardisierung der Ermittlung von Grenzformänderungskurven.

Literatur

- [1] P. Aswendt, M. Lau: Automatisierte Messung von Umformgraden. Blech Rohre Profile 3 (1999), 26–27.
- [2] W. Voelkner, P. Feldmann, L. Lachmann, K. Andresen: Formänderungen und Spannungen visioelastisch ermitteln. Maschinenmarkt (1997), 114–118.
- [3] T. Luhmann: Nahbereichsphotogrammetrie. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.
- [4] J. Reinking: Geodätische Analyse inhomogener Deformationen mit nichtlinearen Transformationsfunktionen. Bayerische Akad. der Wiss., Diss., Reihe C, Heft 413, München 1994.
- [5] R. Godding: (1996) Neue Lösungen in der Nahbereichsphotogrammetrie durch die Kombination digitaler Systeme und moderner Auswerteverfahren, Publikation der DGPF, Band 4, Hannover 1995, pp. 261–269.
- [6] W. Voelkner, L. Lachmann, P. Feldmann, M. Schatz, K. Andresen: Mehr als visioelastische Visionen. Bänder Bleche Rohre, 4 (2000), 58–61.

Dr.-Ing. Roland Höfling, ViALUX Messtechnik+Bildverarbeitung GmbH,
Reichenhainer Straße 88, D-09126 Chemnitz,
E-Mail: hoefling@vialux.de