

Geometrie ist die Umformung jedoch nicht auf den Ort der Energieeinbringung beschränkt, vielmehr formt sich ein wesentlicher Teil des gesamten Werkstückes, der auch außerhalb der Zone, in die unmittelbar die Energie eingebracht wird, mit um (parallele globale Umformung). Sobald die Energieeinbringung beendet wird, etwa durch Absetzen der Drückwalze, kommt auch die Umformung zum Stillstand.

Der Vorgang des Umformens mit Laserstrahlung ist um ein weiteres komplexer. Die Energieeinkopplung erfolgt lokal, die Umformung lokal und parallel dazu global, ähnlich dem Drücken. Zusätzlich wird der Vorgang jedoch dadurch komplexer, daß die lokale Umformung nicht zeitgleich mit der lokalen Energieeinbringung abläuft. Während der Energieeinbringung (Erwärmungsphase) läuft vielmehr nur die erste Hälfte des Umformvorgangs, die Stauchung des erwärmten Bereichs, ab. Erst wenn der Laserstrahl die betrachtete Stelle x_1 (Bild 2) verläßt, kann in diesem Bereich der zweite Teil des Umformvorgangs, die thermische Schwindung des erwärmten und die elastische und plastische Dehnung des nicht erwärmten Bereichs, ablaufen. Alle Bereiche der Umformzone durchlaufen hierbei eine der globalen Biegewinkel-Zeit-Kurve (Bild 2) ähnliche Funktion.

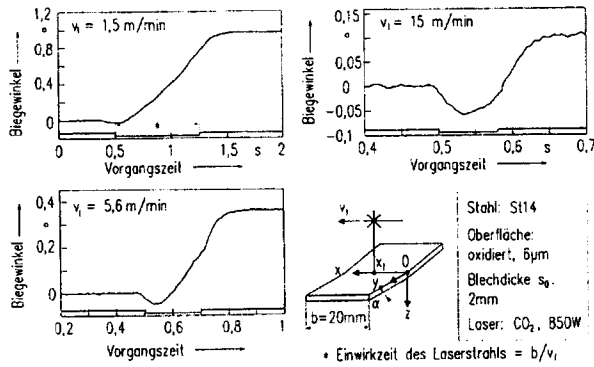


Bild 2: Verlauf des Biegewinkels des gesamten Bleches während des Biegens

Während der Erwärmungsphase will sich das betrachtete Element vom Laserstrahl weg biegen, während der Abkühlphase wird die Umformung zur Endform erreicht. Daher spielt es eine wesentliche Rolle, mit welcher Geschwindigkeit der Laserstrahl über die Blechoberfläche geführt wird. Bei geringer Geschwindigkeit v_1 des Laserstrahls wird in den Bereichen mit $x < x_1$ der lokale Umformvorgang weitestgehend abgeschlossen sein. Bedingt durch die mechanische Kopplung des Restbleches mit dem bereits umgeformten Teil weist das gesamte Blech bereits einen gewissen Biegewinkel auf. Hierdurch wird die Gegenbiegung des bestrahlten Bereichs bei x_1 behindert, wodurch der gewünschte Effekt der Stauchung des oberflächennahen Bereichs begünstigt wird. Ganz anders verhält sich dies bei einer hohen Prozeßgeschwindigkeit: Die Bereiche mit $x < x_1$ werden sich größtenteils noch im Stadium der Gegenbiegung befinden. Hierdurch wird die Gegenbiegung der Stelle x_1 begünstigt, was insgesamt zur Ausbildung eines kleineren Biegewinkels führt. Bei konstanter Laserleistung wird der Biegewinkel zusätzlich aufgrund der geringen Linienenergie kleiner.

Der Biegewinkel läßt sich jedoch nicht beliebig durch eine Verringerung der Geschwindigkeit steigern. Bei sehr langsamer Verfahrensgeschwindigkeit (bezogen auf Blechdicke und Temperaturleitfähigkeit des Werkstoffes) ergibt sich noch in der Aufwärmphase eine starke Erwärmung der bestrahlungsbegewandten Blechoberfläche. Dies verringert den Temperaturgradienten im Blech und damit die für die Umformung wesentliche Kenngröße ΔT_{MAX} (siehe Gl. (3.8)). Es ist sogar denkbar, daß durch sehr geringe Verfahrensgeschwindigkeiten negative Biegewinkel erreicht werden.

2.2 Experimentelle Methoden

Die Versuche wurden v. a. an Reineisen und unlegiertem Stahl (St14) durchgeführt. Reineisen wurde gewählt, um eine Härtung durch Selbstabschreckung mit Sicherheit ausschließen zu können. Für die Versuche standen CO₂-Laser mit 1 kW und 850 W Ausgangsleistung zur Verfügung. Zur bei CO₂-Laserstrahlung erforderlichen Verbesserung der Energieeinkopplung wurden Oxidschichten durch Glühen der Proben an Luft (550°C, 55 min) oder Graphitschichten durch Aufsprühen aufgebracht. Die im metallographischen Querschliff bestimmte Oxidschichtdicke betrug 6 µm, wodurch ein Absorptionsgrad von ca. 0,5 bis 0,6 [18] erreicht wird. Bei Nichtmetallen (Aluminium, Kupfer) wurde die Energieeinkopplung immer durch Graphitschichten verbessert. Um einen konstanten Absorptionsgrad zu erreichen, wurde die Schichtdicke stets dicker als 3 µm gewählt [19].

3. Analytisches Modell

Die Komplexität des Biegens mit thermisch induzierten Spannungen läßt es zunächst fraglich erscheinen, ob eine analytische Beschreibung des Vorgangs möglich ist. Es ist von vornherein klar, daß für die Analyse des Vorgangs weitgehende Einschränkungen gemacht werden müssen, wenn die Modellierung nicht zu unlösbaren Gleichungssystemen führen soll. Die einfachste Analyse des Vorgangs kann in einem Zweischichtenmodell gemäß Bild 3 erfolgen. Hierzu werden die im folgenden erläuterten Einschränkungen gemacht.

Es wird nur der Werkstoff im Bereich des Fokusbereichs des Laserstrahls ($=2l$) betrachtet. Der Werkstoff wird in diesem Bereich in zwei Schichten eingeteilt. Schicht 1 ist die erwärmte Zone, die, bedingt durch die Behinderung der thermischen Ausdehnung, plastisch gestaucht wird. Die Mitte dieser

Zone liegt bei der z-Koordinate z_1 . Die Erwärmung erfolge homogen im gesamten Volumen dieses Bereiches, der einen Querschnitt $A_1 = b s_0/2$ und eine Länge l hat. Schicht 2 ist die der Bestrahlungsseite abgewandte Zone. Sie wird als kalt während des gesamten Vorgangs angenommen. Beide Schichten sind mit der Symmetrieebene ($y = 0$) und dem lateral liegendem Blech ($y > l$) starr verbunden.

Das Werkstoffverhalten wird als rein elastisch angenommen, wobei nur bei der Umsetzung der thermischen Ausdehnung in plastische Dehnung der Schicht 1 eine Ausnahme gemacht wird. Diese Umsetzung soll vollständig, also ohne Berücksichtigung einer Streckgrenze, erfolgen. Diese Annahme ist sinnvoll, solange mittlere Biegewinkel betrachtet werden. Bei großen Biegewinkeln muß sich die untere Zone plastisch verformen, da sonst unnatürlich hohe Spannungen im unteren Bereich erzeugt werden. Bei geringer Erwärmung müßte auch für Schicht 1 ein elastisch-plastisches Werkstoffmodell eingeführt werden, da sich in diesem Fall reversible rein elastische Verformungen ergeben. Hierauf wird im Interesse der einfachen Modellierung jedoch verzichtet. Für die Berechnung eines einzelnen Biegevorgangs ohne Wiederholung der Bestrahlung mit mittlerer Energieeinbringung ist die Annahme jedoch unkritisch.

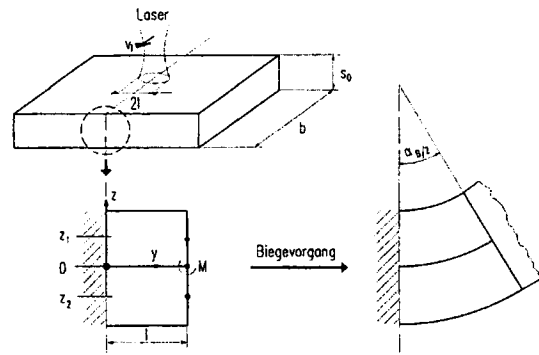


Bild 3: Größen beim Zwei-Zonen Modell zum Laserstrahlbiegen

Die Temperaturabhängigkeit sämtlicher Werkstoffparameter wird - wie auch in anderen Arbeiten [17] - vernachlässigt. Diese Annahme darf bei exakteren Modellen keinesfalls getroffen werden, da insbesondere die Form der Temperaturabhängigkeit der Fließspannung eine große Rolle für den Biegewinkel spielt. In Bild 4 ist der Einfluß der Form der k_T -T-Kurve auf den (berechneten) Biegewinkel dargestellt. Die Rechnungen wurden mit einem Simulationsprogramm auf der Basis der Finite-Differenzen-Methode [20] durchgeführt. Hierbei wurde die Temperaturabhängigkeit aller Werkstoffdaten entsprechend den bekannten Literaturdaten [21] berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, daß nicht nur die Raumtemperaturfestigkeit, sondern auch die Form der k_T -T-Kurve einen deutlichen Einfluß auf den Biegewinkel hat. Die Temperaturabhängigkeit der Fließspannung spielt in dem hier vorgestellten Modell jedoch keine Rolle, da die Fließspannung an sich nicht direkt berücksichtigt wird.

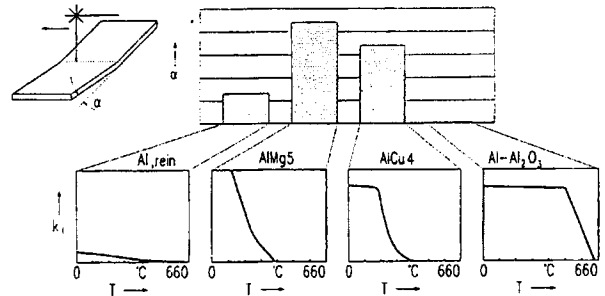


Bild 4: Mit Hilfe der Finite-Differenzen-Methode berechneter Einfluß der Form der Fließspannungs-Temperaturkurven

Die Modellrechnung vereinfacht sich weiterhin dadurch, daß Kräfte und Momente nur für Flächenschwerpunkte angesetzt werden. Mit den in Bild 3 angegebenen Größen ergibt sich der Biegewinkel $\hat{\alpha}_B$ zu:

$$\frac{\hat{\alpha}_B}{2} = \frac{\Delta l}{s_0/2} \quad (3.1)$$

Hierin ist Δl der Längenunterschied zwischen der oberen und unteren Schicht. Er läßt sich aus den lokalen Dehnungen berechnen:

$$\Delta l = l(\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (3.2)$$

Die Dehnung ϵ_1 der oberen (erwärmten) Schicht ergibt sich aus der Dehnung der Schicht durch das Moment, das durch das Biegemomentmoment des Bleches erzeugt wird und das so gerichtet ist, daß es einer Biegung des Bleches entgegenwirkt. Außerdem ist die obere Schicht um ϵ_{pl} plastisch gestaucht, wobei diese Stauchung betragsmäßig der thermischen Ausdehnung $\alpha_{th} \Delta T_{MAX}$ (α_{th} : Thermischer Ausdehnungskoeffizient; ΔT_{MAX} : maximaler Temperaturunterschied zwischen Schicht 1 und 2) entsprechen soll.

$$\epsilon_1 = + \frac{M}{E_1 I_1} z_1 - \epsilon_{pl} \quad (3.3)$$

Das Biegemoment M führt zu einer Verkürzung der unteren Schicht um ϵ_2 :

$$\epsilon_2 = + \frac{M}{E_2 I_2} z_2 \quad (3.4)$$

Zur Berechnung des Biegewinkels werden Gl. (2), (3) und (4) in (1) eingeführt:

$$\hat{\alpha}_B = \frac{4l}{s_0} \left[\frac{M}{E_2 I_2} z_2 - \frac{M}{E_1 I_1} z_1 + \alpha_{th} \Delta T_{MAX} \right] \quad (3.5)$$

Da $z_2 - z_1 = -s_0$ gilt (Bild 3) und die Schichten gleiche Dicke haben sollen, gilt bei Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der thermischen Eigenschaften $E_1 I_1 = E_2 I_2$ und damit:

$$\hat{\alpha}_B = \frac{4l}{s_0} \left[- \frac{M s_0}{E_2 I_2} + \alpha_{th} \Delta T_{MAX} \right] \quad (3.6)$$

Wegen

$$\hat{\alpha}_B = \frac{M l}{E_2 I_2} \quad (3.7)$$

ergibt sich damit für den Biegewinkel:

$$\hat{\alpha}_B = \frac{4 l \alpha_{th} \Delta T_{MAX}}{5 s_0} \quad (3.8)$$

Die maximale Erwärmung der Oberfläche läßt sich für den Fall einer homogenen konstanten Wärmestromdichte in einen halbumendlichen Raum analytisch darstellen [2, S. 75]. Um daraus den maximalen Temperaturunterschied ΔT_{MAX} zu erhalten wird angenommen, daß in der Blechmitte gerade noch die Ausgangstemperatur herrscht. Damit entspricht ΔT_{MAX} der halben maximalen Oberflächentemperatur:

$$\Delta T_{MAX} = 0,5 \frac{2q_w \sqrt{t a}}{\sqrt{\pi \lambda}} \quad (3.9)$$

Hierin sind a die Temperaturleitfähigkeit, t die Einwirkdauer des Wärmestroms der Wärmestromdichte q_w und λ die Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmestromdichte ergibt sich aus der Laserleistung P_l , dem Absorptionsgrad A und dem Fokussdurchmesser $2l$. Die Einwirkdauer aus dem Verhältnis von Fokussdurchmesser und Verfahrgeschwindigkeit v_f . Damit wird Gl. (3.9) zu:

$$\Delta T_{MAX} = \frac{A P_l}{4 l \lambda} \sqrt{\frac{2 a}{\pi v_f l}} \quad (3.10)$$

Wird der so berechnete Temperaturunterschied in Gl. (3.8) eingeführt, ergibt sich für den Biegewinkel in Grad:

$$\alpha_B = \frac{180 \sqrt{2}}{5 \pi \sqrt{\pi}} \frac{A P_l \alpha_{th} \sqrt{a}}{\sqrt{v_f} \lambda s_0} \quad (3.11)$$

Berechnet man für Stahl hieraus den Biegewinkel, erhält man unter Bedingungen, bei denen ein Winkel von $0,3^\circ$ gemessen wurde einen Winkel von $0,2^\circ$. Trotz der weitreichenden Einschränkungen, die für das vorgestellte analytische Modell getroffen werden mußten, ist damit eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment ohne Einführung irgendwelcher empirischer oder im gleichartigen Experiment ermittelter Parameter gegeben.

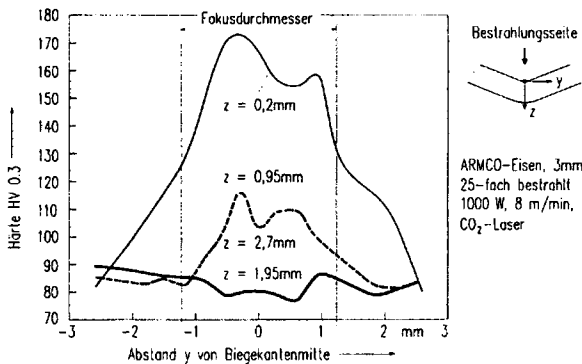


Bild 5: Mikrohärteverlauf in einer Reineisenprobe nach dem Laserstrahlbiegen

4. Ergebnisse

4.1 Neutrale Faser

Eine Probe aus Reineisen wurde mit 25 Überfahrungen behandelt. Der Härteverlauf über die Blechdicke ($s_0 = 3$ mm) in Abhängigkeit vom Abstand von der Biegekantenmitte ist in Bild 5 dargestellt. Die bestrahlte Seite weist mit 165 HV die höchste Härte auf. Die geringste Härte findet sich bei $z = 1,95$ mm. Sie liegt geringfügig unter der Härte des Ausgangswerkstoffs, was durch Erholungsvorgänge oder Kornvergrößerung, die während des Laserstrahlbiegens auftreten [10], verursacht wird. Die Breite des verfestigten Bereichs liegt - außer bei der obersten Schicht ($z = 0,2$ mm) - wie auch bei anderen Arbeiten [6] etwa bei der Breite des Laserstrahls, die 2,4 mm betrug. Die hohe Härte und die größere Ausdehnung der verfestigten obersten Schicht kann auf Rekristallisation dieses Bereiches zurückgeführt werden, wobei eine Kornfeinung auftrat. Durch die Aufnahme der Härte in Abhängigkeit des Umformgrads kann aus den Mikrohärtemessungen auf die lokale Umformung geschlossen werden. Bild 6 zeigt deutlich, daß die neutrale Faser bei $z/s_0 = 0,65$ liegt. Es belegt außerdem, daß die der Bestrahlungsseite abgewandte Schicht plastisch verformt wird. Die erwärmte Zone erzeugt also ausreichend große Kräfte hierzu.

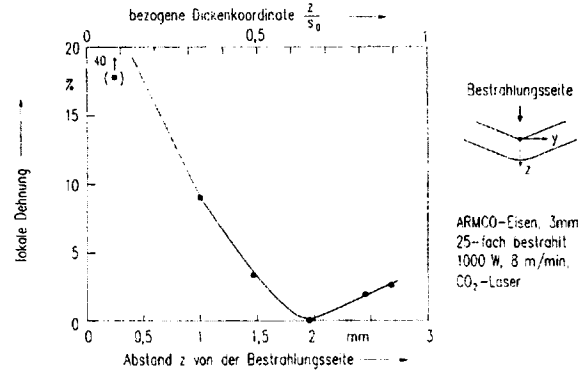


Bild 6: Anhand von Kalibrierdaten ermittelter Verlauf der Dehnung über den Blechquerschnitt nach dem Laserstrahlbiegen.

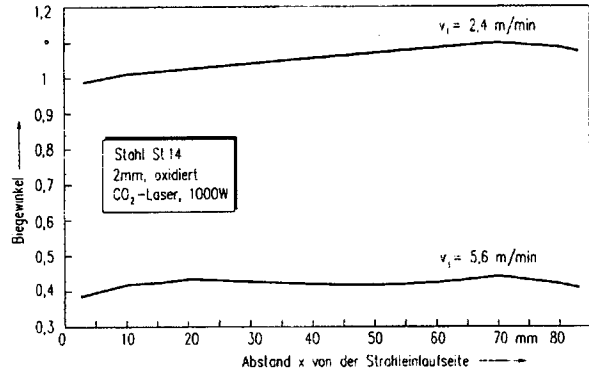


Bild 7: Verlauf des Biegewinkels an 85 mm breiten Blechen

4.2 Kinetik

Den Einfluß der Verfahrgeschwindigkeit auf den Biegewinkelverlauf über die Blechbreite zeigt Bild 7. An 85 mm breiten Proben wurde der Biegewinkel nach vollständigem Ablauf des Umformvorgangs an verschiedenen Positionen über die Blechbreite gemessen. Bei beiden Verfahrgeschwindigkeiten zeigt sich eine Abnahme des Biegewinkels im Randbereich der Proben. Dieser Randeffect kann auf zwei verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Die eine ist ein Wärmestau, der im Randbereich durch die fehlende Wärmeableitung in x-Richtung verursacht wird [5]. Hierdurch verringert sich der Temperaturgradient, was zu einem geringeren Biegewinkel führt. Eine ähnliche Abnahme des Biegewinkels ist daher dann festzustellen, wenn die laterale Ausdehnung des Blechs (y-Richtung) auf weniger als 10 mm verringert wird [13]. Außerdem herrscht im Randbereich ein zweiachsiger Spannungszustand, während im Bereich der Blechmitte ein ebener Dehnungszustand herrscht. Der ebene Dehnungszustand ist mit einer Erhöhung der Formänderung in y-Richtung verbunden.

Die deutliche Zunahme des Biegewinkels über die Blechbreite bei der geringen Verfahrgeschwindigkeit gegenüber dem - abgesehen von den Randeffecten - konstanten Biegewinkel für die höhere Verfahrgeschwindigkeit läßt sich über die Kinetik des Vorgangs verstehen. In Bild 2 sind dazu die Biegewinkel-Zeitkurven für ein Blech mit 20 mm Breite angegeben. Bei der langsamsten Verfahrgeschwindigkeit ist der Vorgang in dem Moment, in dem der Laserstrahl die Blechoberfläche verläßt, nahezu vollständig abgeschlossen. Anders verhält sich dies bei den höheren Geschwindigkeiten. Bei der höchsten Geschwindigkeit (15 m/min) befindet sich das Blech noch vollständig im Stadium der Gegenbiegung, wenn der Laserstrahl die Blechoberfläche an der Strahlaufseite verläßt. Übertragen auf das breitere Blech bedeutet dies, daß die Stelle $x = 20$ mm bei der langsamen Verfahrgeschwindigkeit hinsichtlich der erwünschten Biegung unterstützt wird, während sie bei der hohen Verfahrgeschwindigkeit durch die Gegenbiegung des vorher bestrahlten Bereiches in der Umformung behindert wird. Bei noch höheren Verfahrgeschwindigkeiten wurde festgestellt, daß der Biegewinkel mit zunehmendem Abstand von der Strahleinlaufseite abnimmt. Bedingt wird dies durch eine entsprechend stärkere Behinderung des Biegevorgangs durch die Gegenbiegung des bereits bestrahlten Bereiches.

5. Diskussion

Die analytische Beschreibung des in Abschnitt 3 beschriebenen Modells liefert eine Gleichung, die den Biegewinkel mit den wesentlichen Größen des Biegeprozesses mit thermisch induzierten Spannungen verknüpft. Die eingebrachte Energie A_p geht wie in Gl. (1.1) und (1.2) linear in den Biegewinkel ein.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient α_{th} geht ebenfalls linear in die Beziehung ein. Dieser Zusammenhang ergibt sich unmittelbar aus den Modellannahmen und ist durchaus plausibel. Je größer die thermische Ausdehnung des bestrahlten Bereiches, desto größer wird auch die plastische Stauchung dieses Bereiches ausfallen. Damit steigt unmittelbar der Biegewinkel. Zur Bestätigung dieser Tendenz sind in Bild 8 die unter gleichen Bedingungen gemessenen Biegewinkel für verschiedene Werkstoffe (unlegierter Stahl, Kupfer, Aluminium-Magnesium) in Abhängigkeit vom thermischen Ausdehnungskoeffizienten

aufgetragen. Bild 8 bestätigt durchaus den durch Gl.(3.11) vorhergesagten Trend, wobei ein rein linearer Zusammenhang des Biegewinkels mit dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufgrund der anderen Einflußfaktoren (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, etc.) gar nicht erwartet werden konnte. Eine Berechnung der Daten für Bild 8 für einen direkten Vergleich ist nicht sinnvoll, da bei den gemessenen großen Biegewinkeln das elastisch-plastische Verhalten der Schicht 2 nicht durch ein rein elastisches Verhalten ersetzt werden darf. Dies war jedoch eine der Modellannahmen für Gl. (3.11). Die weiteren thermischen Eigenschaften des Werkstoffes werden in der Größe ΔT_{MAX} erfaßt.

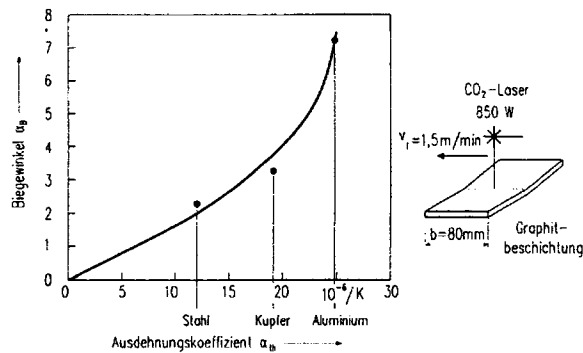


Bild 8: Einfluß des thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf den Biegewinkel

Die vierte Größe in Gl.(3.11) ist die Blechdicke s_0 . Zunächst erscheint es so, als sei hier die gleiche Beziehung zwischen Biegewinkel und Blechdicke gefunden worden, die auch in der phänomenologischen Beschreibung von [5,15] gefunden wurde (siehe Gl.(1.1)). Experimentell wurde bei den Versuchen jedoch eine Abhängigkeit des Biegewinkels vom Quadrat der Blechdicke gefunden [7]. Auch die Lösung über den Energieansatz (siehe Gl.(1.2)) gibt einen derartigen quadratischen Zusammenhang an. Bei Interpretation von Gl. (3.11) darf nicht übersehen werden, daß in der Größe ΔT_{MAX} neben den thermischen Blecheigenschaften auch indirekt die Blechdicke selbst steckt. Bleibt man bei der Annahme, daß der erwärmte Bereich 1 genauso groß ist, wie der nicht erwärmte Bereich 2 (Bild 3), so wird sich mit zunehmender Blechdicke bei gleichbleibenden Bearbeitungsparametern (Laserleistung, Verfahrensgeschwindigkeit) eine Abnahme der Maximaltemperatur im bestrahlten Bereich dadurch ergeben, daß die Temperatur über einen größeren Bereich gemittelt wird. Ab einer gewissen Blechdicke wird das Temperaturprofil jedoch unabhängig von der Blechdicke sein, so daß in die Mittelwertbildung für ΔT_{MAX} immer größere Anteile eines kalten Bereiches einbezogen werden, womit die Annahme für Gl. (3.9) nicht mehr zutrifft. Bei der Verfeinerung des vorgestellten Modells soll dieser Effekt sinnvollerweise so berücksichtigt werden, daß die Größe des Bereiches 1 abhängig von der eingebrachten Laserleistung und den Eigenschaften des Bleches gewählt wird. Hierdurch wird sich automatisch eine weitere Abhängigkeit von der Blechdicke ergeben, die im Idealfall zu der gemessenen quadratischen Abhängigkeit des Biegewinkels von der Blechdicke führt.

Eine weitere Verfeinerung des Modells wird durch die Messung der lokalen Dehnung und die Bestimmung der neutralen Faser aus Bild 6 nahegelegt. Im Bereich der neutralen Faser bei $z/s_0 = 0,65$ wird ein in grober Näherung um die neutrale Faser symmetrischer linearer Verlauf der plastischen Dehnungen gefunden. Dies legt es nahe, auf den Bereich zwischen $z/s_0 = w$ bis $z/s_0 = 1$ die elementare Biegetheorie anzuwenden, während der Bereich zwischen $z/s_0 = 0$ bis $z/s_0 = w$ als erwärmt und plastisch gestaucht betrachtet wird. w ist im vorliegenden Fall $w=0,3$ gewählt. In der Modelerweiterung wird w aus den thermischen und mechanischen Blecheigenschaften berechnet, um weiterhin die Unabhängigkeit der im Modell verwendeten Größen von experimentellen Daten zum Laserstrahlbiegen zu gewährleisten.

Der Werkstoff wird damit in zwei komplexere Zonen aufgeteilt. Zone 1 stellt über die thermische Ausdehnung, plastische Kompression und Abkühlung die Umformenergie zur Verfügung, während Zone 2 einen einfachen Biegebalcken darstellt. Dieser wird durch das in Zone 1 erzeugte Moment gebogen. Hierdurch wird die plastische Verformung der bestrahlungsabgewandten Seite berücksichtigt, wodurch die gerade bei Werkstoffen geringer Festigkeit gemessenen großen Biegewinkel erklärt werden könnten. Durch die Annahme eines rein elastischen Werkstoffmodells werden bei Biegewinkeln größer 1° im Bereich 2 unnatürlich hohe Spannungen angenommen, die den Biegewinkel verkleinern.

Die in Abschnitt 2.1 dargestellten komplexen Einflüsse der Verfahrensgeschwindigkeit auf den Umformvorgang (der direkte Einfluß durch Veränderung der Oberflächentemperatur wird berücksichtigt) können in dem Modell voraussichtlich nicht erfaßt werden. Sie erklären, wieso in den Modellen aus [4] und [5] die Verfahrensgeschwindigkeit mal linear (Energieansatz: Die eingebrachte Energie fällt linear mit steigender Geschwindigkeit), mal mit der Quadratwurzel (Temperaturansatz, Gl. (3.10)): die Maximaltemperatur sinkt linear mit der Wurzel aus der Geschwindigkeit) eingeht. Die Erweiterung des vorgestellten Modells gemäß der oben dargelegten Ansätze ohne Berücksichtigung des komplexen Geschwindigkeitseinflusses wird zeigen, ob dieser Einfluß wesentlich ist. Wie schwer die Erfassung dieses Effektes ist, zeigen erste Ergebnisse aus der Simulation mit FEM. Obwohl hier der Einfluß der Blechdicke richtig wiedergegeben wurde [20], ergaben sich bei der Berechnung des Einflusses der Geschwindigkeit deutliche Abweichungen des berechneten Biegewinkels bei niedrigen Verfahrensgeschwindigkeiten.

6. Zusammenfassung

- * Beim Umformen mit Laserstrahlung handelt es sich um Umformen mit Wirkenergie, wobei die thermischen Blecheigenschaften und die Verfahrensgeschwindigkeit des Lasers die Kinetik des Vorgangs bestimmen.
- * Der Umformvorgang kann anhand eines Modells analytisch beschrieben werden, wenn weitreichende Einschränkungen vorgenommen werden. Trotz dieser Einschränkungen gibt das Modell wesentliche Einflußparameter und auch die absolute Größe des Biegewinkels sehr gut wieder, ohne daß empirische Faktoren oder Anpassungsparameter aus Experimenten einbezogen werden.
- * Über Mikrohärtemessungen läßt sich zeigen, daß die neutrale Faser (ungefängte Schicht) weit außerhalb der Mitte liegt. Dies legt eine Modellierung über ein Zweizonenmodell nahe.
- * Die Komplexität des Vorgangs wird durch die vielfältigen Einflußparameter belegt. Neben allen Geometriedaten des Bleches spielen die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes sowie die Laserparameter eine nicht vernachlässigbare Rolle. Die Erfassung aller Parameter in einer Simulationsrechnung ist derzeit noch nicht realisiert.

Danksagung

Den Herren S. Amon, M. Buchner, S. Holzer und M. Rödle sei für die engagierten Diskussionen und die Hilfe bei den experimentellen Arbeiten gedankt. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützt diese Arbeiten durch die finanzielle Förderung im Rahmen des Schwerpunktprogrammes "Flexible Umformtechnik".

Literatur

- [1] N. N.: Fertigungsverfahren der Autogentechnik. DIN 8522
- [2] Pfeiffer, R.: Richten und Umformen mit der Flamme. DVS Düsseldorf, 1989
- [3] Schwenzfeier, W.; Finstermann, G.: Offene Probleme der Thermomechanik in der Umformtechnik. BHM 132 (1987) 5, 169 - 173
- [4] Koloman, V.; Karol, P.: Formen durch lokale Erwärmung. Metal Forming - Theory and Practice; Proceedings of the 5th International Conference on Metal Forming, ed. M. Tisza, K. Kardos, Győr (1991) L69 - L75
- [5] Scully, K.: Laser line heating. Journal of Ship Production 3,4 (1987) 237-246
- [6] Namba, Y.: Laser forming in space. Int. conf. on lasers '85; ed.; C.P.Wang (1986) 403-407
- [7] Geiger, M.; Vollertsen, F.; Amon, S.: Flexible Blechumformung mit Laserstrahlung - Laserstrahlbiegen. Blech Rohre Profile 38, 11 (1991) 856 - 861
- [8] Frackiewicz, H.; Kalita, W.; Mucha, Z.; Trampczynski, W.: Laserformgebung der Bleche. VDI-Berichte 867 (1990) 317 - 328
- [9] Namba, Y.: Laser Forming of Metals and Alloys. Proceedings of LAMP'87, Osaka (1987) 601 - 606
- [10] Frackiewicz, H.; Trampczynski, W.; Przetakiewicz, W.: Shaping of Tubes by Laser Beam. ISATA 25th (1992) 373-380
- [11] Rosenthal, A.: Verfahren und Vorrichtung zum Richten von scheibenförmigen Werkzeugen. Patentschrift DE 39 24 262 C2 (22.7.89)
- [12] Tönshoff, H.; Rosenthal, A.: Verbesserung des Arbeitsverhaltens von scheibenförmigen Trennwerkzeugen durch Laserstrahlbehandlung. Blech Rohre Profile 35,10 (1988) 822-826
- [13] Geiger, M.; Vollertsen, F.; Deinzer, G.: Flexible straightening of car body shells by laser forming. NADDRG/DAE Sheet Metal Forum, Detroit, MI (1993) 1-7
- [14] Frackiewicz, H.; Mucha, Z.; Trampczynski, W.; Baranowski, A.; Cybulski, A.; Kottler, W.: Bleche und Platten mit dem Laser formen. Laser-Praxis (1990) 111-113
- [15] Masubuchi, K.: Studies at M. I. T. Related to Applications of Laser Technologies to Metal Fabrication. Proceedings of LAMP '92 (1992) 939-946
- [16] Parkes, E. W.: The Inelastic Behaviour of Aluminium Alloy Tension Members when subjected to heating on one face. Engineering Plasticity. ed.: J. Heyman, F. A. Leckie, Cambridge University Press (1968) 489 - 527
- [17] Welsh, L.P.; Tuchman, J.A.; Hermen, I.P.: The Importance of thermal stresses and strains induced in laser processing with focused Gaussian beams. J. Appl. Phys. 64,11 (1988) 6274-6287
- [18] Beyer, E.; Märten, O.; Behler, K.: Schneiden mit Laserstrahlen; Laser Cutting. Laser und Optoelektronik 3 (1985) 282-290
- [19] Wissenbach, K.: Umwandlungshärten mit CO₂-Lasersstrahlung. Dissertation TH Darmstadt (1985)
- [20] Vollertsen, F.; Geiger, M.; Li, W.-M.: FDM- and FEM-simulation of laser forming: a comparative study. 4th ICTP, Peking, China, (September 1993).
- [21] Davis, J.R.: Metals Handbook. ASM USA Vol.2 (1990)
- [22] Grigull, U.; Sandner, H.: Wärmeleitung. Springer-Verlag, Berlin 1979