

In-Prozess-Messung der Werkzeugablenkung beim inkrementellen Blechumformen

In-process measurement of tool deflection in incremental sheet metal forming

Marina Terlau, Axel von Freyberg, Dirk Stöbener, Andreas Fischer,
Universität Bremen, BIMAQ – Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft, Bremen,
Deutschland, Email: a.freyberg@bimaq.de

Kurzfassung

Das inkrementelle Blechumformen stellt eine wirtschaftliche Alternative zum Tiefziehen für das Umformen großer Bleche in kleinen Stückzahlen dar. Nachteilig sind jedoch die Formabweichungen, die unter anderem aus der Ablenkung des Werkzeugs resultieren. Für eine Kompensation der Werkzeugablenkung fehlt aktuell eine von der Maschinenkinematik unabhängige In-Prozess-Messung der Werkzeugablenkung.

Um erstmals eine berührungslose Messung der Werkzeugposition mit der geforderten Messunsicherheit von 15 µm in einem Messabstand bis 2 m zu ermöglichen, wird ein optisches Multi-Sensorsystem konzipiert. Das Multi-Sensorsystem besteht aus einer Vielzahl preiswerter Angulationssensoren, die jeweils einen Winkel zur Lichtquelle am Werkzeug erfassen. Basierend auf den gemessenen Winkeln aller zueinander kalibrierten Sensoren lässt sich die Position des Werkzeugs im dreidimensionalen Fertigungsvolumen per Multiangulation berechnen. Anhand der experimentellen Charakterisierung eines realisierten Angulationssensors sowie einer Unsicherheitsfortpflanzung konnte die mit dem Gesamtsystem erreichbare Messunsicherheit abgeschätzt werden. Im Ergebnis erfüllt das Multi-Sensorkonzept sämtliche Anforderungen für die Messung der Werkzeugablenkung bei der inkrementellen Blechumformung.

Abstract

Incremental sheet forming is an economical alternative to deep drawing for the forming of large sheets in small quantities. However, the shape deviations resulting from the deflection of the tool, among other things, are a disadvantage. In order to compensate for the tool deflection, there is currently no in-process measurement of the tool deflection that is independent of the machine kinematics.

To enable non-contact measurement of the tool position with the required measurement uncertainty of 15 µm at a measuring distance of up to 2 m for the first time, an optical multi-sensor system is designed.

The multi-sensor system consists of a large number of low-cost angulation sensors, each of which measures an angle to the light source on the tool. Based on the measured angles of all sensors calibrated to each other, the position of the tool in the three-dimensional manufacturing volume is calculated by multiangulation. Based on the experimental characterization of a realized angulation sensor and an uncertainty propagation, the measurement uncertainty achievable with the overall system could be estimated. As a result, the multi-sensor concept fulfills all requirements for the measurement of tool deflection in incremental sheet metal forming.

1 Einleitung

Für die Herstellung großer Blechteile in kleinen Losgrößen ist die inkrementelle Blechumformung aufgrund der kostengünstigen und flexiblen Werkzeuge eine wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Umformverfahren [1]. Die Nachteile der inkrementellen Blechumformung sind Geometrieabweichungen durch Rückfederung des Blechs [2] und Ablenkungen des Umformwerkzeugs [3]. Um eine Kompensation der Werkzeugablenkung zu ermöglichen, muss die Ablenkung bestimmt werden. Eine Vorhersage der Werkzeugablenkung auf der Grundlage mechanischer Berechnungen [4] basiert jedoch auf Modellannahmen und berücksichtigt weder Werkzeugmaschinenfehler noch die Verformungen der Maschine. Daher ist eine Messung der Werkzeugablenkung erforderlich, die von diesen Einschränkungen unabhängig ist und somit eine geringere Unsicherheit ermöglicht.

Das erforderliche Messsystem muss in der Lage sein, die Werkzeugablenkung in-prozess und nahe am Werkzeugkontaktpunkt zu messen. Außerdem soll die Messung berührungslos und unabhängig von der Werkzeugmaschinenkinematik erfolgen. Daher werden die möglichen Ansätze auf optische Systeme eingegrenzt. Bezogen auf den konkreten Anwendungsfall, die Messung der Werkzeugablenkung, muss ein Messvolumen von $2,0 \times 1,0 \times 0,2 \text{ m}^3$ abgedeckt werden. Geht man von einer üblichen Werkzeugauslenkung von $150 \text{ }\mu\text{m}$ bis $450 \text{ }\mu\text{m}$ aus [4], so ist nach der goldenen Regel der Messtechnik eine Positionsmessunsicherheit von $15 \text{ }\mu\text{m}$ erforderlich. Dies bedeutet einen dynamischen Messbereich $> 10^5$, der sich aus dem Quotienten aus Messbereich und geforderter Unsicherheit ergibt.

1.1 Stand der Technik

Während mit der Vollfeld-Photogrammetrie der erforderliche dynamische Messbereich nicht erreicht werden kann [5], bieten Multisensor-Messsysteme die Möglichkeit, die Werkzeugposition im Messvolumen mittels Multiangulation oder Multilateration zu erfassen, je nach Messprinzip der eingesetzten Sensoren.

Für eine Multilateration geeignete optische Abstandssensoren weisen i. d. R. einen lateralen Messbereich auf, der für die geplante Anwendung zu gering ist. Tracking-Systeme auf Basis interferometrischer Sensoren, z. B. Lasertracker [6], enthalten ein Regelungssystem, um eine aktive Bewegung zur Verfolgung des Zielpunkts zu ermöglichen. Wenn die Sichtverbindung während der Maschinenbewegung jedoch unterbrochen wird, schlägt die Messung fehl. Mit gängigen Scanning-Systemen wiederum kann keine Scandauer pro Messpunkt von weniger als $300 \text{ }\mu\text{s}$ erreicht werden, welche erforderlich ist, um bei einer üblichen Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/s [7] Bewegungsunschärfe zu vermeiden. Multilaterations-Messsysteme sind für die geplante Anwendung also ungeeignet. Mittels Multiangulation einer Lichtquelle und unter Nutzung des Triangulations-Prinzips ist der erforderliche axiale und laterale Messbereich grundsätzlich realisierbar. Die Lichtquelle, die an der Werkzeugschulter angebracht werden

kann, wirft einen Schatten durch eine kodierte Maske auf eine Kamera, weshalb das Prinzip auch als Schattenabbildung bezeichnet wird [8]. Von der Position des Schattenbilds kann schließlich auf den Beobachtungswinkel zur Lichtquelle geschlossen werden. Im Gegensatz zur konventionellen Bildgebung, ist hier die Information über das Bild verteilt und nicht auf wenige Pixel konzentriert, was eine Mittelwertbildung und damit eine Verringerung der Messunsicherheit ermöglicht.

Zur Berechnung der Position bzw. der Verschiebung des Schattenbilds sind verschiedene Bildauswertungsalgorithmen etabliert. Enthält das Muster periodische Elemente, kann die Phasenverschiebung zur Bestimmung der Bildverschiebung verwendet werden [9, 10]. Darüber hinaus ist ein Korrelationsalgorithmus für die Berechnung der Bildverschiebung anwendbar [11], und Yu et al. [12] haben eine quadratische Approximation zur Lokalisierung der Streifen implementiert. Frühere Untersuchungen belegen eine erreichbare Bildverschiebungs-Standardunsicherheit von $1,5/1000 \text{ px}$ [11] bzw. $4,9/1000 \text{ px}$ [10]. Die hierbei demonstrierte Subpixel-Auflösung unterstreicht das hohe Potenzial des Schattenbildprinzips.

Zusammenfassend stellt ein Multiangulations-Messsystem (MAM) auf Basis der Schattenabbildung einen vielversprechenden Ansatz zur Messung der Werkzeugablenkung dar. Jedoch ist noch zu klären, ob bzw. in welchem Messvolumen die geforderte Messunsicherheit der Werkzeugauslenkung erreichbar ist.

1.2 Zielsetzung und Gliederung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die mit einem MAM erreichbare Messunsicherheit für die Messung der Werkzeugablenkungsmessung bei der inkrementellen Blechumformung abzuschätzen bzw. ein MAM mit hinreichender Anzahl an Angulationssensoren auszulegen. Hierfür wird ein einzelner Schattenbildsensor realisiert, experimentell charakterisiert und anschließend eine Unsicherheitsfortpflanzungsrechnung durchgeführt. Im Rahmen der Sensorauslegung werden zudem zwei Bildauswertungsalgorithmen (ohne Vorwissen: Bildkorrelation; mit Vorwissen: Modellfit) validiert.

In Abschnitt 2 wird das Prinzip der Messung vorgestellt. Abschnitt 3 beschreibt den Versuchsaufbau und die zu untersuchenden Bildauswertungsalgorithmen. Die erreichbaren zufälligen Messabweichungen bei der Bestimmung der Bildverschiebung und der Werkzeugposition werden in Abschnitt 4 vorgestellt und diskutiert. Abschnitt 5 enthält schließlich ein Fazit und einen Ausblick.

2 Messprinzip

Ein einzelner Sensor, der in einem MAM zur Messung der Werkzeugablenkung bei der inkrementellen Blechumformung eingesetzt wird, setzt sich aus einem Kamerachip und einer Schattenmaske, also einer ebenen Struktur zusammen, die lichtdurchlässige und lichtundurchlässige Anteile enthält. Zusätzlich wird eine Lichtquelle an der zu erfassenden Werkzeugschulter befestigt.

Da die Ablenkung des Umformdorns hauptsächlich in horizontaler Ebene auftritt [4], fokussiert sich dieser Beitrag auf die Messung der Positionskomponenten in der horizontalen (x, y) -Ebene im Maschinenkoordinatensystem (MKS). Der schattenbasierte Angulationssensor misst dazu einen Winkel zur Lichtquelle, sodass die Position des Sensors (x_S, y_S) und der gemessene Winkel θ_M im MKS jene Gerade aufspannen, auf der sich die Lichtquelle befindet. Eine Schnittpunktberechnung mit einer von einem weiteren Sensor gemessenen Geraden liefert den Parameter s_L und definiert damit die Position der Lichtquelle, die sich in folgender Form schreiben lässt:

$$\begin{pmatrix} x_L \\ y_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \end{pmatrix} + s_L \cdot \begin{pmatrix} \sin(\theta_M) \\ \cos(\theta_M) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Die Geradenorientierung im MKS

$$\theta_M = \theta_S - \gamma \quad (2)$$

setzt sich aus dem vom Sensor gemessenen Winkel θ_S und dem Winkel γ zusammen, um den das (ξ, η, ζ) -Sensorkoordinatensystem (SKS) zum MKS um die ζ -Achse rotiert ist. Die Rotation um die ξ -Achse hat keinen Einfluss auf die Geradenorientierung im MKS. Eine Verdrehung um die η -Achse ist bei der Ausrichtung des Sensors möglichst zu vermeiden und geht mit dem Kosinus des Winkels in die Koordinatentransformation ein, sodass dieser Winkel vernachlässigt werden kann.

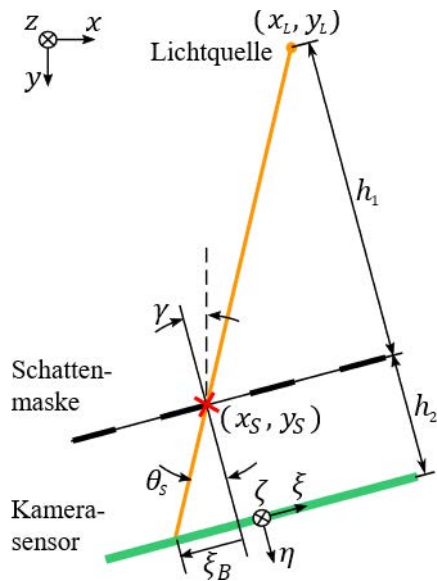


Bild 1: Messprinzip des schattenbasierten Angulationssensors. Die Position einer Lichtquelle (x_L, y_L) im Maschinenkoordinatensystem (x, y, z) im Abstand h_1 zur Schattenmaske führt zu einer Position des Schattenbilds ξ_B im Sensorkoordinatensystem (ξ, η, ζ) auf dem Sensor im Abstand h_2 zur Schattenmaske.

Bei dem Winkel θ_S handelt es sich um die Zwischengröße, die der einzelne Sensor ausgibt. Das zugrunde liegende Prinzip ist in **Bild 1** visualisiert. Eine Lichtquelle wirft einen Schatten durch die Schattenmaske auf den Bildsensor in der (ξ, ζ) -Bildebene des SKS, sodass das Schattenbild

eines beliebigen Punktes der Schattenmaske an der Bildposition ξ_B erscheint. Sofern $\xi_B = 0$ dort definiert ist, wo sich die Lichtquelle genau mittig vor dem Sensor befindet, berechnet sich der vom Sensor gemessene Winkel

$$\theta_S = \arctan\left(\frac{\xi_B}{h_2}\right) \quad (3)$$

aus der Bildposition ξ_B und dem Abstand h_2 zwischen Maske und Sensor. Die Bildposition wird durch Verarbeitung der mit dem Kameraschip aufgenommenen Bilder ermittelt.

3 Experimenteller Aufbau

3.1 Aufbau des Messsystems

Zur experimentellen Validierung des Sensorprinzips wird der in **Bild 2** dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Mit einer Verfahrereinheit wird eine SMD-LED mit einer Peak-Wellenlänge von 518 nm lateral zur Sensorblickrichtung bewegt, was die Bewegung und Ablenkung des Umformdorns, an dem eine LED nahe der Werkzeugspitze befestigt ist, bei der inkrementellen Blechumformung widerspiegelt. Ein Laser-Interferometer dient dabei zur Referenzmessung der Verschiebung der LED, die auf dem Messspiegel befestigt ist.

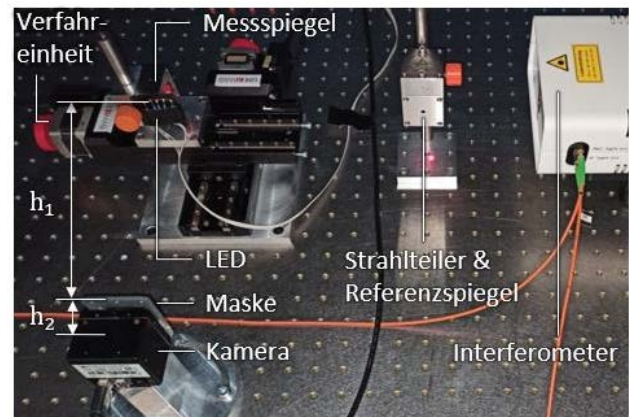


Bild 2: Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung der Unsicherheit der Bildverschiebungsmessung.

Zur Sicherstellung möglichst idealer Bedingungen verhindert ein abdunkelnder Aufbau Störeinflüsse durch Umgebungslicht. Der Angulationssensor ist so positioniert, dass der Abstand zwischen Maske und LED $h_1 = 227$ mm beträgt. Die für den Angulationssensor verwendete Maske beinhaltet transparente und intransparente, vertikal orientierte Streifen. Die Breite der transparenten Streifen beträgt $80 \mu\text{m}$. Unter den intransparenten Streifen weist jeder fünfte Streifen mit $181 \mu\text{m}$ eine größere Breite auf als die übrigen, welche $170 \mu\text{m}$ breit sind. Die monochrome Kamera DMK 21F04 von The Imaging Source, die sich etwa 20 mm (Abstand h_2) hinter der Maske befindet, enthält einen CCD-Sensor mit 640×480 Pixeln mit einer Größe von jeweils $5,6 \mu\text{m}$.

Um mit diesem Aufbau die Unsicherheit der Bildverschiebung zu bestimmen, wird die LED mit Hilfe der Verfahreinheit schrittweise um je 200 µm über einen gesamten Weg von 60 mm verfahren. Während dessen nimmt die Kamera an jeder neuen Position ein Bild auf, sodass für alle 300 Positionen ein Bild vorhanden ist.

3.2 Bildverarbeitung

Die schrittweise Verschiebung der LED führt zu einer schrittweisen Verschiebung der Bildpositionen. Durch den Vergleich von zwei aufeinander folgenden Bildern, ist die Bildverschiebung bestimmbar. Die Bildverschiebungen lassen sich kontinuierlich aufsummieren, woraus sich die Bildposition ergibt.

Um die Bildverschiebungen aus den aufgenommenen Bildern zu extrahieren, sind verschiedene Auswerteverfahren anwendbar. Daher werden zunächst die häufig verwendeten Methoden, Phasenauswertung und Korrelation, getestet. Darüber hinaus wird eine Modellfunktion entwickelt, mit der jedes Intensitätsmaximum angenähert und anschließend die Verschiebung der Maxima berechnet wird. Die **phasenbasierte Auswertung** beinhaltet die Zerlegung der Intensitätsverläufe in sinusförmige Signale mittels schneller Fourier-Transformation, um die Phasenlage des periodischen Verlaufs des Streifenmusters im Bild zu ermitteln. Die Differenz der Phasenlagen zwischen zwei Bildern $\Delta\phi$ stellt ein Maß für die Verschiebung zwischen diesen Bildern dar, aus der sich die Bildverschiebung

$$\Delta\xi = \frac{\Delta\phi}{2\pi f} \quad (4)$$

in Pixel umrechnen lässt.

Die phasenbasierte Auswertung erreicht geringe Unsicherheiten, lässt sich jedoch nur bei periodischen Mustern in der Maske anwenden. Zur Erweiterung des uneindeutigen Messbereichs mittels aperiodischer Anteile werden daher zwei weitere Ansätze zur Bildauswertung untersucht.

Bei der ersten alternativen Methode zur Auswertung der Bildverschiebung wird eine **Kreuzkorrelation** zwischen zwei verschobenen Bildern durchgeführt. Mit der von Guizar-Sicairos et al. [13] vorgeschlagenen Bildregistrierungsmethode wird die horizontale Verschiebung von einem Bild zum anderen mit einer Auflösung von 10^{-3} px bestimmt.

Als zweite Alternative zur Phasenauswertung wird ein weiterer Algorithmus entwickelt, mit dem Ziel, die Bildverschiebung mit einem vergrößerten Eineindeutigkeitsbereich und gleichzeitig einer geringen Unsicherheit zu bestimmen. Ähnlich wie bei der Phasenauswertung werden die Streifen mit einer **Modellfunktion** approximiert, bei der es sich aber um eine limitierte Gauß-Funktion handelt, die der Intensitätsverteilung eines Streifens ähnelt.

Den ersten Teil der Implementierung der Approximation bildet eine Vorverarbeitung der Daten, bei der ein Tiefpassfilter den spaltenweise gemittelten Intensitätsverlauf glättet. Anschließend wird die limitierte Gauß-Funktion an die Intensitätsverteilung jedes einzelnen weißen Streifens

angepasst. Die verwendete Modellfunktion $I_M(\xi)$ ist definiert zu:

$$I_M(\xi) = \begin{cases} A \cdot e^{-\left(\frac{|\xi-\mu|}{w}\right)^2} + I_0 & \text{für } I(\xi) < I_{max} \\ I_{max} & \text{für } I(\xi) \geq I_{max} \end{cases} \quad (5)$$

Darin beschreibt I_0 das Intensitätsminimum, A die Amplitude der Funktion, d. h. die Differenz zwischen Maximum und Minimum, μ die Position des Maximums innerhalb des Intensitätsausschnitts und w die Breite der gaußförmigen Anhebung. Der Grenzwert I_{max} begrenzt die Höhe der Gauß-Funktion, sodass eine abgeflachte Spitze vorliegt. Die Approximation der Modellfunktion an den Intensitätsverlauf liefert die Parameter der Modellfunktion und damit die Position des Maximums μ . So wird jedem weißen Streifen im Bild eine Position zugeordnet, sodass deren Verschiebung in zwei aufeinanderfolgenden Bildern ermittelt werden kann. Aus der Mittelung der Maxima verschiebungen folgt dann die Bildverschiebung.

4 Ergebnisse zur erreichbaren Messunsicherheit

4.1 Messung der Bildverschiebung

Auf Basis der experimentell aufgenommenen Bilder kann mit Hilfe der vorgestellten Auswertgorithmen die Bildverschiebung zwischen aufeinander folgenden Bildern ermittelt werden. Bewegt sich die Lichtquelle parallel zum Sensor ist die Bildverschiebung

$$\Delta\xi = -\frac{h_2}{h_1} \cdot \Delta L \quad (6)$$

proportional zur Verschiebung ΔL der Lichtquelle, wobei h_2 der Abstand zwischen Sensor und Maske ist und h_1 der konstante axiale Abstand zwischen Maske und Lichtquelle (vgl. Bild 1). Über den proportionalen Zusammenhang kann die interferometrisch gemessene LED-Verschiebung als Referenzmessung zur Bestimmung der Unsicherheit der Bildverschiebung herangezogen werden, obwohl die Bestimmung der Bildverschiebung in der Bildebene erfolgt, während das Interferometer die reale LED-Verschiebung misst. Da die Abstände nicht ideal bekannt sind, geschieht die Bestimmung des konstanten Skalierungsfaktors

$$p = -\frac{h_2}{h_1} = \frac{\overline{\Delta\xi}}{\overline{\Delta L}} \quad (7)$$

basierend auf den Mittelwerten der LED-Verschiebung $\overline{\Delta L}$ und der Bildverschiebung $\overline{\Delta\xi}$. In der Realität bewegt sich die LED jedoch nicht ideal parallel zur Sensorebene, was dazu führt, dass die Bildverschiebungen auf der einen Seite des 60 mm Gesamtverfahrenswegs größer sind als auf der anderen. Die Steigung in den Bildverschiebungswerten wird per linearer Regression erfasst und anschließend so korrigiert, dass der Mittelwert erhalten bleibt. Die Transformationen ermöglichen den Vergleich zwischen mittels Angu-

lationssensor gemessener Bildverschiebung und mittels Interferometer gemessener LED-Verschiebung. Somit kann die mittlere quadratische Abweichung der Bildverschiebung

$$u^2(\Delta\xi) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta\xi_c - \Delta L_s)^2 \quad (8)$$

aus allen n Messwerten der korrigierten Bildverschiebung $\Delta\xi_c$ und der skalierten LED-Verschiebung ΔL_s , die als Referenzwert dient, berechnet werden. Die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung wird als Maß für die Standardunsicherheit verwendet. Die Unsicherheit der Bildverschiebung ist äquivalent mit der Unsicherheit der Bildposition ($u(\xi) = u(\Delta\xi)$), da sich die Absolutposition aus Addition der ausgewerteten Verschiebungen und der bekannten Referenzposition ergibt. Die Unsicherheit der Bildposition wird anschließend zur Unsicherheit der LED-Position fortgepflanzt.

Bild 3 zeigt die Ergebnisse der experimentellen Messung

für einen Ausschnitt von 100 Verschiebungswerten. Dabei sind die transformierten Bildverschiebungen $\Delta\xi_T$, also die skalierte LED-Verschiebung ΔL_s und die korrigierte Bildverschiebung $\Delta\xi_c$, über der interferometrisch gemessenen LED-Position aufgetragen. Die Referenzverschiebungswerte schwanken, da die Schrittweite der Verfahrenheit nicht ideal konstant ist. Die resultierenden mittleren Bildverschiebungen sowie die Standardunsicherheiten der Bildverschiebungen werden in **Tabelle 1** dargestellt.

	Mittlere Bildverschiebung	Standardunsicherheit
Phasenauswertung	- 17,53 μm	151,0 nm
Korrelation	- 17,57 μm	44,5 nm
Modellfunktion	- 17,58 μm	14,2 nm

Tabelle 1: Mittlere Bildverschiebungen und Standardunsicherheiten der Bildverschiebung für experimentell aufgenommene Bilder.

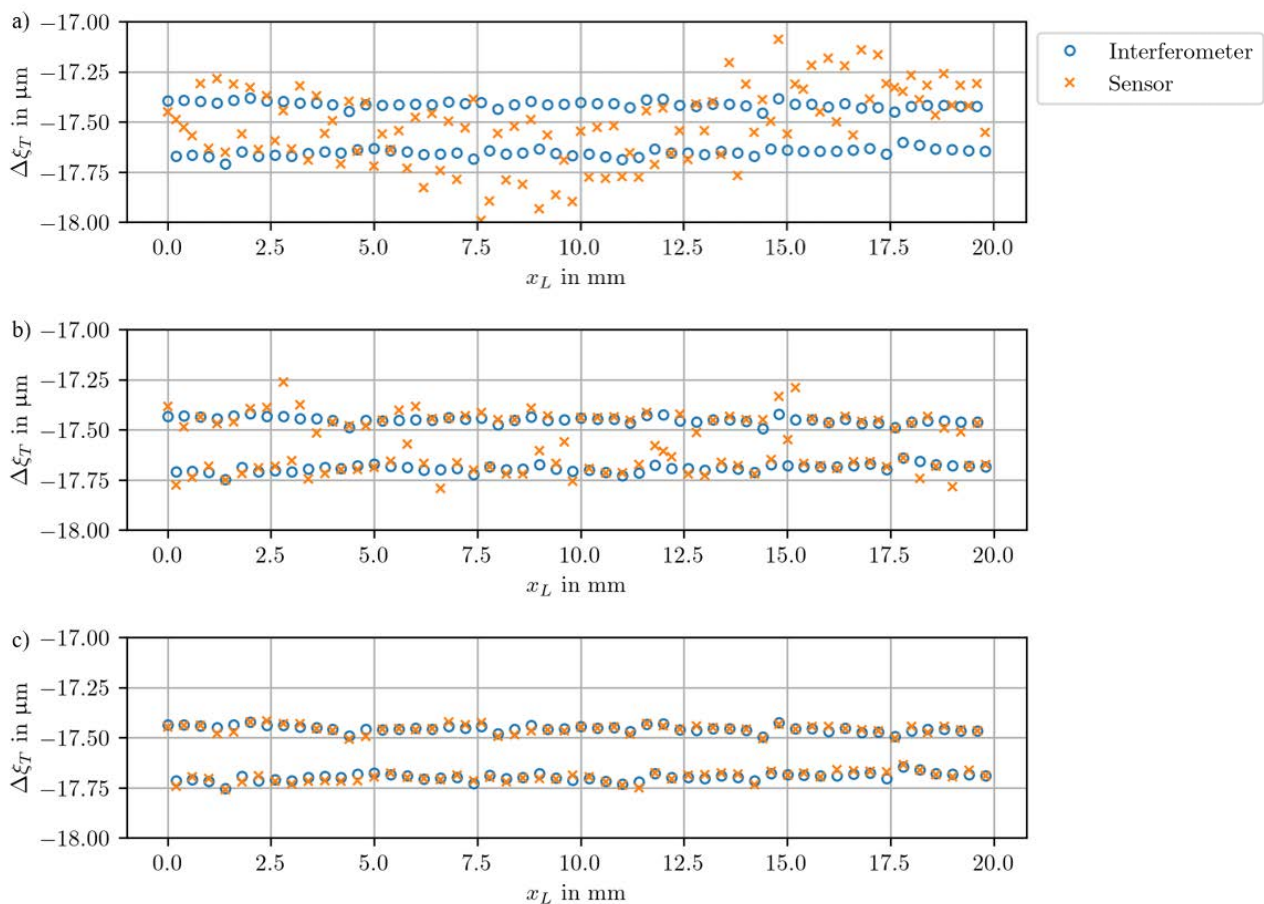


Bild 3: Ausgewertete Bildverschiebungen und zugehörige Referenzbildverschiebungen für experimentell aufgenommene Bilder: a) Phasenbasierte Auswertung; b) Auswertung mittels Kreuzkorrelation; c) Auswertung mittels Modellfunktion.

Die mittels Phasenauswertung bestimmten Bildverschiebungen sind in **Bild 3 a)** zu finden. Die ausgewerteten Bildverschiebungen streuen mit einem scheinbar periodischen Verhalten um die skalierten LED-Verschiebungen

herum. Weil das Bild etwa 13 schwarze und weiße Streifen aufweist, aber jeder fünfte schwarze Streifen eine höhere Breite besitzt, verläuft die Bildfrequenz periodisch in Abhängigkeit vom Streifenausschnitt, was den periodischen

Verlauf der Bildverschiebungen erklärt. Eine schwankende Bildfrequenz führt bei der Phasenauswertung unmittelbar zu Abweichungen der Bildverschiebung. Bei den in **Bild 3 b)** dargestellten Bildverschiebungen, die mittels Kreuzkorrelation ermittelt wurden, liegen viele ausgewertete Verschiebungswerte nahe an den Referenzwerten. Einzelne gemessene Bildverschiebungen weichen aber deutlicher von den interferometrisch erfassten Verschiebungen ab. Die Auswertung mittels Approximation einer Modellfunktion, deren Ergebnisse in **Bild 3 c)** zu sehen sind, liefert Bildverschiebungen, die nah an den Referenzverschiebungen liegen.

Im Vergleich der Algorithmen bei der Auswertung experimentell aufgenommener Bilder zeigen sich unterschiedliche Mittelwerte der Bildverschiebungen, was verdeutlicht, dass methodisch bedingt systematische Abweichungen auftreten können. Gleichzeitig sticht hervor, dass die Standardunsicherheit der Bildverschiebung (zufällige Abweichung) bei der phasenbasierten Auswertung am höchsten ist und bei der Approximation einer Modellfunktion mit 14,2 nm am geringsten. Damit bestätigt das Experiment die Erwartung, dass die phasenbasierte Auswertung bei nicht ideal periodischen Mustern zu größeren Abweichungen führt, wohingegen sich die Approximation einer Modellfunktion gut zur Auswertung der Bildverschiebung eignet. Bei den Ergebnissen ist allerdings zu beachten, dass die gemessene LED-Verschiebung anhand der Verschiebungsmittelwerte auf die Bildebene skaliert wird, was systematische Abweichungen zwischen ausgewerteter und realer Bildverschiebung aus der Unsicherheitsberechnung ausschließt. Zudem ist auch die Referenzmessung der LED-Verschiebung mit Unsicherheiten behaftet, was die ermittelten Unsicherheiten beeinflussen kann.

4.2 Messung der LED-Position

Für die Messung der Werkzeugablenkung bei der inkrementellen Blechumformung ist die Unsicherheit der Positionsmessung der an der Werkzeugspitze befestigten LED von Interesse. Die Positionsunsicherheit lässt sich aus der Unsicherheitsfortpflanzung für die Modellgleichung (1) bestimmen. Zur Charakterisierung eines einzelnen Sensors wird s_L als ideal bekannt angenommen. Damit hängt die Position der LED

$$(x_L, y_L) = f(x_S, y_S, \gamma, h_2, \xi_B) \quad (9)$$

entsprechend der Gleichungen (1) bis (3) von den Kalibriergrößen Sensorposition (x_S, y_S) , Sensorausrichtung γ und Abstand h_2 zwischen Schattenmaske und Kamerasensor sowie der Bildposition ξ_B ab.

Entsprechend der Unsicherheitsfortpflanzungsrechnung werden die Unsicherheiten den Positionsponenten

$$u^2(x_L) = \left(\frac{\partial x_L}{\partial x_S}\right)^2 \cdot u^2(x_S) + \left(\frac{\partial x_L}{\partial \gamma}\right)^2 \cdot u^2(\gamma) + \left(\frac{\partial x_L}{\partial h_2}\right)^2 \cdot u^2(h_2) + \left(\frac{\partial x_L}{\partial \xi_B}\right)^2 \cdot u^2(\xi_B) \quad (10)$$

und

$$u^2(y_L) = \left(\frac{\partial y_L}{\partial y_S}\right)^2 \cdot u^2(y_S) + \left(\frac{\partial y_L}{\partial \gamma}\right)^2 \cdot u^2(\gamma) + \left(\frac{\partial y_L}{\partial h_2}\right)^2 \cdot u^2(h_2) + \left(\frac{\partial y_L}{\partial \xi_B}\right)^2 \cdot u^2(\xi_B) \quad (11)$$

aus den Empfindlichkeiten der Positionsponenten gegenüber den Einflussgrößen und den Unsicherheiten der Einflussgrößen berechnet. Zur Berechnung der Positionsunsicherheit werden die Empfindlichkeitskoeffizienten (die partiellen Ableitungen) analytisch aus den Gleichungen (1) bis (3) bestimmt. Die Unsicherheiten der Kalibriergrößen werden abgeschätzt und für die Unsicherheit der Bildposition werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung herangezogen.

Für die quantitative Unsicherheitsbestimmung wird die Unsicherheit des Abstands zwischen Maske und Sensor zu $u(h_2) = 1 \mu\text{m}$ angenommen, die Unsicherheit der Sensorausrichtung zu $u(\gamma) = 30 \mu\text{rad}$, und die Unsicherheiten der Sensorpositionsponenten zu $u(x_S) = u(y_S) = 3 \mu\text{m}$. Als Bildpositionsunsicherheit wird die experimentell erreichte Standardunsicherheit der Bildverschiebung von $u(\xi_B) = 14,2 \text{ nm}$ verwendet.

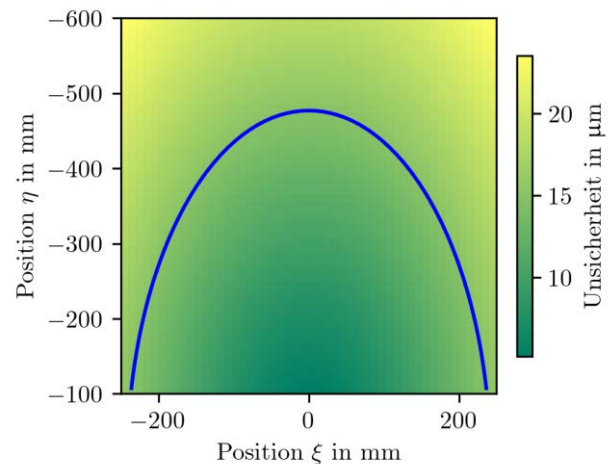


Bild 4: Räumliche Verteilung der Unsicherheit der Lichtquellenposition. Die blaue Kontur hebt die geforderte Grenze von 15 µm hervor.

Aus der Unsicherheitsfortpflanzung folgt die in **Bild 4** dargestellte Standardunsicherheit in Abhängigkeit der Position der Lichtquelle. Die Unsicherheit wird mit zunehmendem axialen sowie lateralen Abstand vom Sensor größer. Die geforderte Positionsunsicherheit ist dementsprechend nur bis zu einem Abstand von etwa 480 mm erreichbar.

Dies bedeutet, dass zur Abdeckung des gesamten Arbeitsbereichs der Werkzeugmaschine mit hinreichender Positionsunsicherheit mehrere Sensoren eingesetzt werden müssen, die je einen Teil des Arbeitsbereichs messen. Zusätzlich genügt eine Triangulation mit zwei Sensoren in der Mitte der Werkzeugmaschine nicht, sodass in diesem Bereich die Daten mehrerer Angulationssensoren verrechnet werden müssen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur In-Prozess-Messung der Ablenkung des Umformwerkzeugs beim inkrementellen Blechumformen ist eine Positionsmessunsicherheit vom 15 µm erforderlich. Diese soll mit einem Multisensorsystem auf der Basis von schattenbasierten Angulationssensoren realisiert werden. Im Rahmen dieses Artikels wurde daher der Beitrag eines Einzelsensors zur Positionsmessunsicherheit untersucht.

Der experimentelle Vergleich der drei Auswertemethoden Phasenauswertung, Korrelation und Approximation einer Modellfunktion zeigt, dass die Approximation einer Modellfunktion mit einer Standardabweichung von 14,2 nm die geringsten zufälligen Abweichungen bei der Bestimmung der Bildverschiebung erreicht. Durch Abschätzung der weiteren Anteile des Messunsicherheitsbudgets konnte schließlich gezeigt werden, dass die erforderliche Positionsmessunsicherheit grundsätzlich mit dem verwendeten Messprinzip erreichbar ist. Um den gesamten Messbereich abzudecken werden jedoch mehr als zwei Sensoren benötigt.

In aktuellen und zukünftigen Arbeiten werden der Einfluss von Umgebungslicht sowie die Unsicherheitsbeiträge der Kalibriergrößen und eine optimale Kalibrierstrategie untersucht. Weiterhin wird quantitativ analysiert, inwieweit die Positionsunsicherheit mit steigender Sensoranzahl reduziert werden kann.

6 Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 290 EBG der Forschungsvereinigung für Meß-, Regelungs- und Systemtechnik e.V. (DFMRS) wurde über die AiF im Rahmen des transnationalen CORNET-Programms gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

7 Literatur

- [1] A. Kumar, V. Gulati: Experimental investigations and optimization of forming force in incremental sheet forming. *Sādhanā* 43(10):42, 2018.
- [2] H. Ren, J. Xie, S. Liao, D. Leem, K. Ehmann, J. Cao: In-situ springback compensation in incremental sheet forming. *CIRP Annals* 68(1):317–320, 2019.
- [3] P. Konka, R. Lingam, U. A. Singh, C. Shivaprasad, N. V. Reddy: Enhancement of accuracy in double sided incremental forming by compensating tool path for machine tool errors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 111(3-4):1187–1199, 2020.
- [4] P. Konka, R. Lingam, N. V. Reddy: Tool path design system to enhance accuracy during double sided incremental forming_ An analytical model to predict compensations for small/large components. *Journal of Manufacturing Processes* 58:510–523, 2020.
- [5] D. Sims-Waterhouse, M. Isa, S. Piano, R. Leach: Uncertainty model for a traceable stereo-photogrammetry system. *Precision Engineering* 63:1–9, 2020.
- [6] U. Mutilba, J. A. Yagüe-Fabra, E. Gomez-Acedo, G. Kortaberria, A. Olarra: Integrated multilateration for machine tool automatic verification. *CIRP Annals* 67(1):555–558, 2018.
- [7] A. Kumar, V. Gulati, P. Kumar: Investigation of Process Variables on Forming Forces in Incremental Sheet Forming. *International Journal of Engineering and Technology* 10(3):680–684, 2018.
- [8] P. Masa, E. Franzi, C. Urban: Nanometric Resolution Absolute Position Encoders. *Proceedings of 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, Vienna, Austria, 23-25 September.
- [9] A. N. Andre, P. Sandoz, B. Mauze, M. Jacquot, G. J. Laurent: Sensing One Nanometer Over Ten Centimeters: A Microencoded Target for Visual In-Plane Position Measurement. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 25(3):1193–1201, 2020.
- [10] V. Guelpa, G. J. Laurent, P. Sandoz, J. G. Zea, C. Clévy: Subpixelic measurement of large 1D displacements: principle, processing algorithms, performances and software. *Sensors* 14(3):5056–5073, 2014.
- [11] L. Iafolla, L. Witthauer, A. Zam, G. Rauter, P. C. Cattin: Proof of principle of a novel angular sensor concept for tracking systems. *Sensors and Actuators A: Physical* 280:390–398, 2018.
- [12] H. Yu, Q. Wan, Z. Mu, Y. Du, L. Liang: Novel nano-scale absolute linear displacement measurement based on grating projection imaging. *Measurement* 182:109738, 2021.
- [13] M. Guizar-Sicairos, S. T. Thurman, J. R. Fienup: Efficient subpixel image registration algorithms}. *Optics Letters* 33(2):156–158, 2008.