

Axel von Freyberg\*, Marina Terlau, Dirk Stöbener und Andreas Fischer

# Optische Messung der Werkzeugablenkung in der inkrementellen Blechumformung

Optical measurement of tool deflection in incremental sheet metal forming

<https://doi.org/10.1515/teme-2022-0102>

Empfangen November 10, 2022; angenommen Dezember 24, 2022;

published online Januar 12, 2023

**Zusammenfassung:** Zum Umformen großer Bleche in kleinen Stückzahlen stellt die inkrementelle Blechumformung eine wirtschaftliche Alternative zum Tiefziehen dar. Auftretende Werkzeugablenkungen führen jedoch zu erhöhten Formabweichungen. Mit einer von der Maschinenkinematik unabhängigen In-Prozess-Messung der Werkzeugablenkung könnten diese kompensiert und somit die geometrischen Abweichungen minimiert werden. Deshalb wird ein optisches Multi-Sensorsystem konzipiert, um eine berührungslose Messung der Werkzeugposition mit der geforderten Messunsicherheit von 15 µm in einem Messabstand bis 2 m zu ermöglichen. Das Sensorsystemkonzept sieht eine Vielzahl preiswerter Sensoren vor, die jeweils einen Winkel zu einer Punktlichtquelle am Werkzeug erfassen. Basierend auf den gemessenen Winkeln aller zueinander kalibrierten Sensoren lässt sich die Position des Werkzeugs im dreidimensionalen Fertigungsvolumen per Multiangulation berechnen. Die mit dem Gesamtsystem erreichbare Messunsicherheit wurde mittels einer experimentellen Charakterisierung eines realisierten Angulationssensors sowie einer Unsicherheitsfortpflanzung abgeschätzt. Im Ergebnis erfüllt das Multi-Sensorkonzept sämtliche Anforderungen an die In-Prozess-Messung der Werkzeugablenkung bei der inkrementellen Blechumformung.

**Schlagwörter:** inkrementelle Blechumformung; Schattenabbildung; Multiangulation.

**\*Korrespondenzautor:** Axel von Freyberg, BIMAQ, Universität Bremen, 28359 Bremen, Germany, E-mail: a.freyberg@bimaq.de.

<https://orcid.org/0000-0002-0936-3655>

**Marina Terlau**, BIMAQ, Universität Bremen, 28359 Bremen, Germany, E-mail: m.terlau@bimaq.de. <https://orcid.org/0000-0002-5698-7049>

**Dirk Stöbener und Andreas Fischer**, BIMAQ, MAPEX Center for Materials and Processes, Universität Bremen, 28359 Bremen, Germany, E-mail: d.stoebener@bimaq.de (D. Stöbener), andreas.fischer@bimaq.de (A. Fischer). <https://orcid.org/0000-0002-1624-2106> (D. Stöbener). <https://orcid.org/0000-0001-7349-7722> (A. Fischer)

**Abstract:** For forming large metal sheets in small quantities, incremental sheet forming is an economical alternative to deep drawing. However, tool deflections lead to increased form deviations. With an in-process measurement of the tool deflection, which is independent of the machine kinematics, the geometric deviations of the manufactured part could be compensated, i. e. minimized. For this purpose, an optical multi-sensor system is designed to enable non-contact measurements of the tool position with the required measurement uncertainty of 15 µm at a measurement distance of up to 2 m. The sensor system concept is based on a large number of inexpensive sensors, each of which measures an angle to a point 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 can be calculated by multiangulation. The measurement uncertainty achievable with the overall system was estimated by means of an experimental characterization of a realized angulation sensor and an uncertainty propagation. As a result, the multi-sensor concept fulfills all requirements for in-process measurement of tool deflection in incremental sheet metal forming.

**Keywords:** incremental sheet forming; multi-angulation; shadow imaging.

## 1 Einleitung

Die inkrementelle Blechumformung stellt für die Herstellung großer Blechteile in kleinen Losgrößen aufgrund der kostengünstigen und flexiblen Werkzeuge eine wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Umformverfahren dar [1]. Bei der inkrementellen Blechumformung entstehen jedoch Geometrieabweichungen durch die Rückfederung des Blechs [2] und Ablenkungen des Umformdorns [3]. Für eine Kompensation der Werkzeugablenkung muss diese 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. Eine direkte Messung der Werkzeugablenkung

ist von diesen Einschränkungen unabhängig und ermöglicht eine geringere Unsicherheit.

Ein potentielles Messsystem muss die Werkzeugablenkung in-Prozess und nahe am Werkzeugkontaktpunkt messen. Außerdem soll die Messung berührungslos und unabhängig von der Werkzeugmaschinenkinematik erfolgen. Mögliche Ansätze werden daher auf optische Systeme eingegrenzt. Bezogen auf die Messung der Werkzeugablenkung im konkreten Anwendungsfall muss ein Messvolumen von  $2,0 \times 1,0 \times 0,2 \text{ m}^3$  abgedeckt werden. Ausgehend von einer Werkzeugauslenkung von  $150 \text{ }\mu\text{m}$  bis  $450 \text{ }\mu\text{m}$  [4] ist nach der goldenen Regel der Messtechnik eine Positions-messunsicherheit von  $15 \text{ }\mu\text{m}$  erforderlich, was einem herausfordernden dynamischen Messbereich  $>10^5$  entspricht (Quotient aus Messbereich und geforderter Unsicherheit).

## 1.1 Stand der Technik

Messungen großer Objekte bzw. in großen Messvolumina können prinzipiell mittels Triangulation, z. B. linienförmig [5] oder flächig per Streifenprojektion, sowie auch mittels Vollfeld-Photogrammetrie [6] realisiert werden. Der erforderliche dynamische Messbereich kann mit diesen Messprinzipien jedoch nicht erreicht werden.

Einzelne optische Abstandssensoren bieten eine geringe Messunsicherheit, weisen i. d. R. aber einen lateralen Messbereich auf, der für die geplante Anwendung zu gering ist. Mit interferometrischen Tracking-Systemen, wie beispielsweise Lasertracker [7], kann der Messbereich zwar erweitert werden, allerdings ist hierbei eine aktive Regelung erforderlich, um eine Bewegung zur Verfolgung des Zielpunkts zu ermöglichen. Daher darf die Sichtverbindung zum Messpunkt während der Maschinenbewegung nicht unterbrochen werden. Andererseits kann auch mit gängigen Scanning-Systemen der Messbereich erweitert werden. Mit diesen Systemen kann aber keine Scandauer pro Messpunkt von weniger als  $300 \text{ }\mu\text{s}$  erreicht werden, welche erforderlich ist, um bei einer üblichen Vorschubgeschwindigkeit von  $50 \text{ mm/s}$  [8] eine Bewegungsunschärfe zu vermeiden.

Multi-Sensor-Messsysteme [9] hingegen bieten grundsätzlich die Möglichkeit, eine Werkzeugposition im Messvolumen mittels Multiangulation oder Multilateration zu erfassen. Verschiedene Multi-Sensorsystemansätze haben sich bereits für in-Prozess Messungen bewährt, wie beispielsweise zur hochauflösenden Messung an schnell rotierenden Körpern bei der Materialprüfung [10] oder an rotierenden Bauteilen in einer Drehmaschine [11].

Während etablierte Laterations-Messsysteme weder als Multisensorsystem noch in Form von trackenden oder scannenden Systemen für die geplante Anwendung geeignet sind, erscheint der erforderliche laterale und axiale Messbereich mittels Multiangulation grundsätzlich realisierbar. Bei einem vielversprechenden Ansatz eines einzelnen Angulationssensors wirft eine Lichtquelle, die an der Werkzeugspitze angebracht wird, einen Schatten durch eine kodierte Maske auf eine Kamera. Das Prinzip wird daher auch als Schattenabbildung bezeichnet [12]. Aus der Position des Schattenbilds auf einem optischen Sensor, z. B. einer digitalen Kamera, kann auf den Beobachtungswinkel zur Lichtquelle geschlossen werden. Im Gegensatz zu abbildenden Prinzipien ist hier ein wesentlicher Vorteil, dass die Information über das Bild verteilt und nicht auf wenige Pixel konzentriert ist. Hierdurch wird eine Mittelwertbildung und somit eine Verringerung der Messunsicherheit ermöglicht.

Die Bewegung der Lichtquelle kann mit verschiedenen Bildauswertungsalgorithmen aus der Verschiebung des Schattenbilds berechnet werden. Bei periodischen Schattenmustern kann die Phasenverschiebung zur Bestimmung der Musterverschiebung verwendet werden [13, 14]. Alternative Möglichkeiten für die Berechnung der Musterverschiebung sind Korrelationsalgorithmen [15] oder eine quadratische Approximation zur Lokalisierung der Streifen [16]. Untersuchungen belegen erreichbare Musterverschiebungs-Standardunsicherheiten von  $1,5/1000 \text{ px}$  [15] bzw.  $4,9/1000 \text{ px}$  [14]. Die Möglichkeit der Subpixel-Auflösung unterstreicht das hohe Potenzial des Schattenbildprinzips, denn die Verschiebung einer Punktlichtquelle im Messvolumen führt zu einer proportionalen Verschiebung des auf dem Kamerachip abgebildeten Schattenmusters. Je nach Pixelgröße des Kamerasensors und des Abstands zwischen Schattenmuster und Kamerachip ist theoretisch ein lateraler dynamischer Bereich von  $>7 \cdot 10^5$  möglich.

Ein Multiangulations-Messsystem (MAM) auf Basis der Schattenabbildung stellt also einen grundsätzlich geeigneten Ansatz zur Messung der Werkzeugablenkung dar. Jedoch verbleibt zu klären, in welchem Messvolumen die geforderte Messunsicherheit der Werkzeugablenkung erreichbar ist, um die Anzahl und Anordnung der Sensoren in dem Multi-Messsystemkonzept festzulegen.

## 1.2 Zielsetzung und Gliederung

Das Ziel dieser Arbeit ist es für die Messung der Werkzeugablenkung bei der inkrementellen Blechumformung, die mit einem MAM erreichbare Messunsicherheit in

seinem Messbereich abzuschätzen. 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 experimentellen Versuchsaufbau, die zu untersuchenden Bildauswertungsalgorithmen sowie die Simulationen zur Untersuchung systematischer Einflüsse. Die erreichbaren Unsicherheiten bei der Bestimmung der Musterverschiebung 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, die lichtdurchlässige und lichtundurchlässige Anteile enthält, zusammen. Zusätzlich wird eine Lichtquelle an der zu erfassenden Werkzeugspitze 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 Winkel  $\Theta_M$  im MKS eine Gerade

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

aufspannen, auf der sich die Lichtquelle  $(x_L, y_L)$  befindet. Der Parameter  $s_L$  definiert dabei die Position der Lichtquelle. Er lässt sich aus einer Schnittpunktberechnung mit einer von einem weiteren Sensor gemessenen Geraden berechnen. Die Geradenorientierung im MKS

$$\Theta_M = \Theta_S - \gamma \quad (2)$$

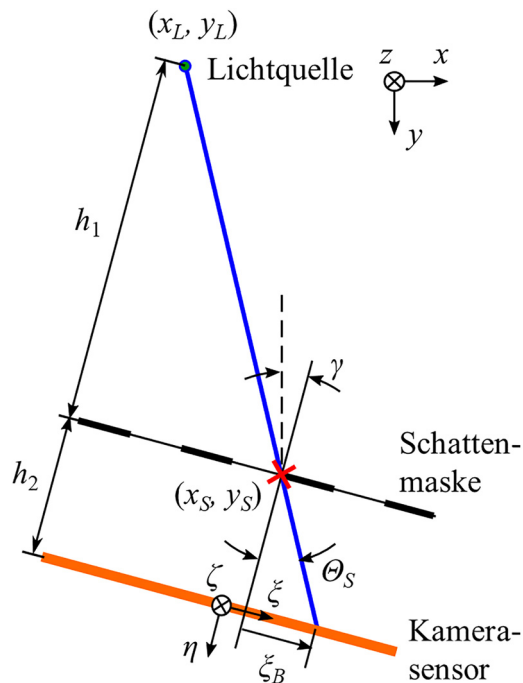
setzt sich aus dem vom Sensor gemessenen Winkel  $\Theta_S$  und dem Winkel  $\gamma$  zusammen, um den das  $(\xi, \eta, \zeta)$ -Sensorkoordinatensystem (SKS) zum MKS um die  $\zeta$ -Achse rotiert ist. Die Rotation um die  $\xi$ -Achse hat keinen Einfluss

auf die Geradenorientierung im MKS. Eine Verdrehung um die  $\eta$ -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.

Bei dem Winkel  $\Theta_S$  handelt es sich um die Zwischengröße, die der einzelne Sensor ausgibt. Das zugrunde liegende Prinzip ist in Abbildung 1 visualisiert. Eine Lichtquelle wirft einen Schatten durch die Schattenmaske auf den Bildsensor in der  $(\xi, \zeta)$ -Bildebene des SKS, sodass das Schattenbild eines beliebigen Punktes der Schattenmaske an der Bildposition  $\xi_B$  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  $\xi_B$  und dem Abstand  $h_2$  zwischen Maske und Sensor. Die Bildposition wird durch Verarbeitung der mit dem Kamerachip aufgenommenen Bilder ermittelt.



**Abbildung 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  $\xi_B$  im Sensorkoordinatensystem  $(\xi, \eta, \zeta)$  auf dem Kamerachip im Abstand  $h_2$  zur Schattenmaske.

### 3 Methode

Dieser Abschnitt beschreibt das methodische Vorgehen, das sich in die drei Bereiche Messsystemaufbau, Bildverarbeitung und Simulation aufteilt. Darin wird der experimentelle Aufbau und die verwendeten Algorithmen beschrieben, mit denen die zufälligen Anteile der Messabweichungen analysiert werden. Die Simulation dient ergänzend der Charakterisierung systematischer Messabweichungen.

#### 3.1 Experimenteller Aufbau

Zur experimentellen Validierung des Sensorprinzips wird der in Abbildung 2 dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Mit einer Verfahreinheit wird eine LED mit einer Spitzen-Wellenlänge von 518 nm lateral zur Sensorblickrichtung bewegt. Dies simuliert die Bewegung des Umformdorns bei der inkrementellen Blechumformung, an dem eine LED nahe der Werkzeugspitze befestigt ist. Ein Laser-Interferometer dient dabei zur Referenzmessung der Verschiebung der LED, die auf dem Messspiegel befestigt ist.

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  $640 \times 480$  Pixeln mit einer Größe von jeweils 5,6  $\mu\text{m}$ .

Um mit diesem Aufbau die Unsicherheit der Musterverschiebung zu bestimmen, wird die LED mit Hilfe der Verfahreinheit schrittweise um je 200  $\mu\text{m}$  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 des auf dem Kamerachip abgebildeten Schattenmusters. Durch den Vergleich von zwei aufeinander folgenden Bildern, ist diese Verschiebung bestimmbar. Die Verschiebungen lassen sich kontinuierlich aufsummieren, woraus sich die Gesamtverschiebung ergibt.

Um die Verschiebungen 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 des Musters angenähert und anschließend die Verschiebung der Maxima berechnet wird.

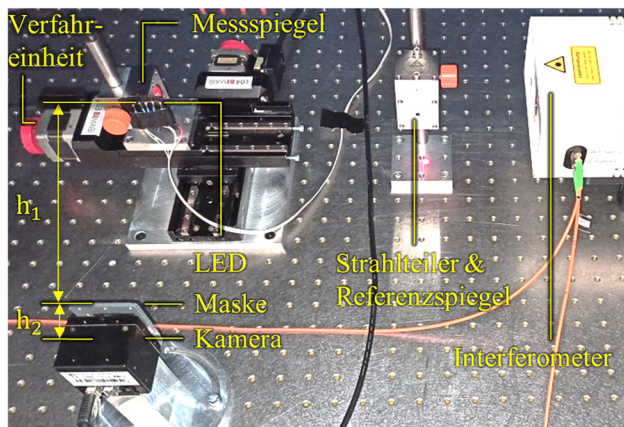
Die phasenbasierte Auswertung beinhaltet die Zerlegung der Intensitätsverläufe in sinusförmige Signale mittels schneller Fourier-Transformation, um die Phasenlage des periodischen Verlaufs des Streifenmusters im Bild zu ermitteln. Die Differenz der Phasenlagen zwischen zwei Bildern  $\Delta\phi$  stellt ein Maß für die Verschiebung zwischen diesen Bildern dar, aus der sich die Musterverschiebung

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

in Pixel umrechnen lässt.

Die phasenbasierte Auswertung erreicht geringe Unsicherheiten, eignet sich jedoch besonders gut bei periodischen Mustern in der Maske. Zur Erweiterung des eindeutigen Messbereichs mittels aperiodischer Anteile werden daher zwei weitere Ansätze zur Bildauswertung untersucht.

Bei der ersten alternativen Methode zur Auswertung der Musterverschiebung wird eine Kreuzkorrelation zwischen zwei verschobenen Bildern durchgeführt. Mit der von Guizar-Sicairos et al. [17] vorgeschlagenen Bildregistrierungsmethode wird die horizontale Verschiebung von einem Bild zum anderen mit einer Auflösung von  $10^{-3}$  px bestimmt.



**Abbildung 2:** Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung der Unsicherheit der Musterverschiebungsmessung.



Als zweite Alternative zur Phasenauswertung wird ein Algorithmus entwickelt, mit dem Ziel, die Musterverschiebung 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:

$$I'_M = I_0 + A \cdot e^{-\left(\frac{\xi - \mu}{w}\right)^2}$$

$$I_M(\xi) = \begin{cases} I'_M & \text{für } I'_M(\xi) < I_{\max} \\ I_{\max} & \text{für } I'_M(\xi) \geq I_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

Darin beschreibt  $I_0$  das Intensitätsminimum,  $A$  die Amplitude der Funktion, d. h. die Differenz zwischen Maximum und Minimum,  $\mu$  die Position des Maximums innerhalb des Intensitätsausschnitts und  $w$  die Breite der gaußförmigen Anhebung.  $I'_M$  ist eine unbegrenzte Gauß-Funktion, deren Höhe durch den Grenzwert  $I_{\max}$  begrenzt wird, sodass eine abgeflachte Spitze vorliegt. Die Approximation der Modellfunktion an den Intensitätsverlauf liefert die Parameter der Modellfunktion und damit die Position des Maximums  $\mu$ . 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 Musterverschiebung.

### 3.3 Simulation

Um systematische Einflüsse der Auswertalgorithmen bei der Ermittlung von Musterverschiebungen zu untersuchen, werden synthetische Bilder simuliert, deren Eigenschaften den experimentell aufgenommenen Bildern ähneln. Die generierten Bilder stimmen in der Auflösung und Pixelgröße mit den Kamerabildern überein. Ein synthetisches Bild enthält vertikale Streifen, deren ideale Abstände aus den realen Bildern übernommen sind. Die Form der erzeugten Streifen entspricht einer limitierten Gauß-Funktion nach Gleichung (5) mit den Parametern, die im Kamerabild bei Anwendung der Modellfunktion approximiert werden. Damit liegen in einem Bild mehrere ideale Streifen mit gleichem Abstand und gleicher Form vor. Zur Simulation des Bildrauschens wird ein konstantes, im experimentellen Bild

bestimmtes, Signal-zu-Rausch-Verhältnis angewendet, d. h. abhängig von der Intensität des Pixels wird ein zufälliger, normalverteilter Rauschwert addiert.

Zur Erzeugung einer Messreihe, also einer Bildreihe, die mit verschiedenen Lichtpositionen korrespondiert, werden die zu Grunde liegenden Streifen von Bild zu Bild um einen definierten Wert verschoben. Die vorgegebene, exakt bekannte Verschiebung ermöglicht eine Untersuchung systematischer algorithmusbedingter Abweichungen der ausgewerteten Verschiebungsmesswerte.

## 4 Ergebnisse zur erreichbaren Messunsicherheit

In diesem Abschnitt werden einerseits die experimentellen und simulativen Ergebnisse der Charakterisierung eines Einzelsensors vorgestellt und diskutiert. Andererseits werden die ermittelten Unsicherheiten der Verschiebungsmessung dann zur Positionsmessunsicherheit beim Einsatz in einem MAM fortgepflanzt.

### 4.1 Charakterisierung eines Einzelsensors

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

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

proportional zur Verschiebung  $\Delta L$  der Lichtquelle, wobei  $h_2$  der Abstand zwischen Sensor und Maske ist und  $h_1$  der konstante axiale Abstand zwischen Maske und Lichtquelle (vgl. Abbildung 1). Über den proportionalen Zusammenhang kann die interferometrisch gemessene LED-Verschiebung als Referenzmessung zur Bestimmung der Unsicherheit der Musterverschiebung herangezogen werden, obwohl die Bestimmung der Musterverschiebung in der Bildebene erfolgt, während das Interferometer die reale LED-Verschiebung misst. Da die Abstände  $h_1$  und  $h_2$  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 Musterverschiebung ( $\overline{\Delta\xi}$ ). In der Realität bewegt sich die LED jedoch nicht ideal parallel zur Sensorebene, was dazu führt, dass die Musterverschiebungen auf der

einen Seite des 60 mm Gesamtverfahrwegs größer sind als auf der anderen. Die Steigung in den Musterverschiebungswerten wird per linearer Regression erfasst und anschließend so korrigiert, dass der Mittelwert erhalten bleibt. Die Transformationen ermöglichen den Vergleich zwischen mittels Angulationssensor gemessener Musterverschiebung und mittels Interferometer gemessener LED-Verschiebung. Somit kann die mittlere quadratische Abweichung der Musterverschiebung

$$u^2(\Delta\xi) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta\xi_{c,i} - \Delta L_{s,i})^2 \quad (8)$$

aus allen  $n$  Messwerten der korrigierten Musterverschiebung  $\Delta\xi_c$  und der skalierten LED-Verschiebung  $\Delta L_s$ , die als Referenzwert dient, berechnet werden. Die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung wird als Maß für die Standardunsicherheit verwendet. Die Unsicherheit der Musterverschiebung 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.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der experimentellen Messung für einen Ausschnitt von 100 Verschiebungswerten. Dabei sind die transformierten Musterverschiebungen  $\Delta\xi_T$ , also die skalierte LED-Verschiebung  $\Delta L_s$  und die korrigierte Musterverschiebung  $\Delta\xi_c$ , über der interferometrisch gemessenen LED-Position  $x_L$  aufgetragen. Die Referenzverschiebungswerte schwanken alternierend zwischen zwei Schrittweiten der Verfahrenheit.

Die mittels Phasenauswertung bestimmten Musterverschiebungen sind in Abbildung 3(a) dargestellt. Sie streuen mit einem scheinbar periodischen Verhalten um die skalierten LED-Verschiebungen herum. Weil das Muster 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 Musterverschiebungen erklärt. Eine schwankende Bildfrequenz führt bei der Phasenauswertung unmittelbar zu Abweichungen der Musterverschiebung. Bei den in Abbildung 3(b) dargestellten Musterverschiebungen, die mittels Kreuzkorrelation ermittelt wurden, liegen viele ausgewertete Verschiebungswerte nahe an den Referenzwerten. Einzelne gemessene Musterverschiebungen weichen aber deutlicher von den interferometrisch erfassten Verschiebungen ab. Die Auswertung mittels Approximation einer Modellfunktion, deren Ergebnisse in Abbildung 3(c) zu sehen sind, liefert Musterverschiebungen, die durchweg nah an den Referenzverschiebungen liegen.

Im Vergleich der Algorithmen bei der Auswertung experimentell aufgenommener Bilder zeigen sich unterschiedliche Mittelwerte der Musterverschiebungen, was ein Indiz für methodisch bedingte systematische Abweichungen sein könnte. Zur Analyse möglicher systematischer Einflüsse bei der Verschiebungsauswertung wird die in Unterabschnitt 3.3 beschriebene Simulation durchgeführt und jeweils mit den drei Bildverarbeitungsalgorithmen ausgewertet. Die berechneten mittleren Verschiebungsabweichungen sind ein Maß für systematisch bedingte Abweichungen. Sie sind zusammen mit den experimentell ermittelten Standardunsicherheiten der Musterverschiebungen in Tabelle 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Standardunsicherheiten der Musterverschiebung stets größer als die mittleren Verschiebungsabweichungen sind. Die Standardunsicherheit ist bei der phasenbasierten Auswertung am höchsten 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 Musterverschiebung eignet.

## 4.2 Messung der LED-position

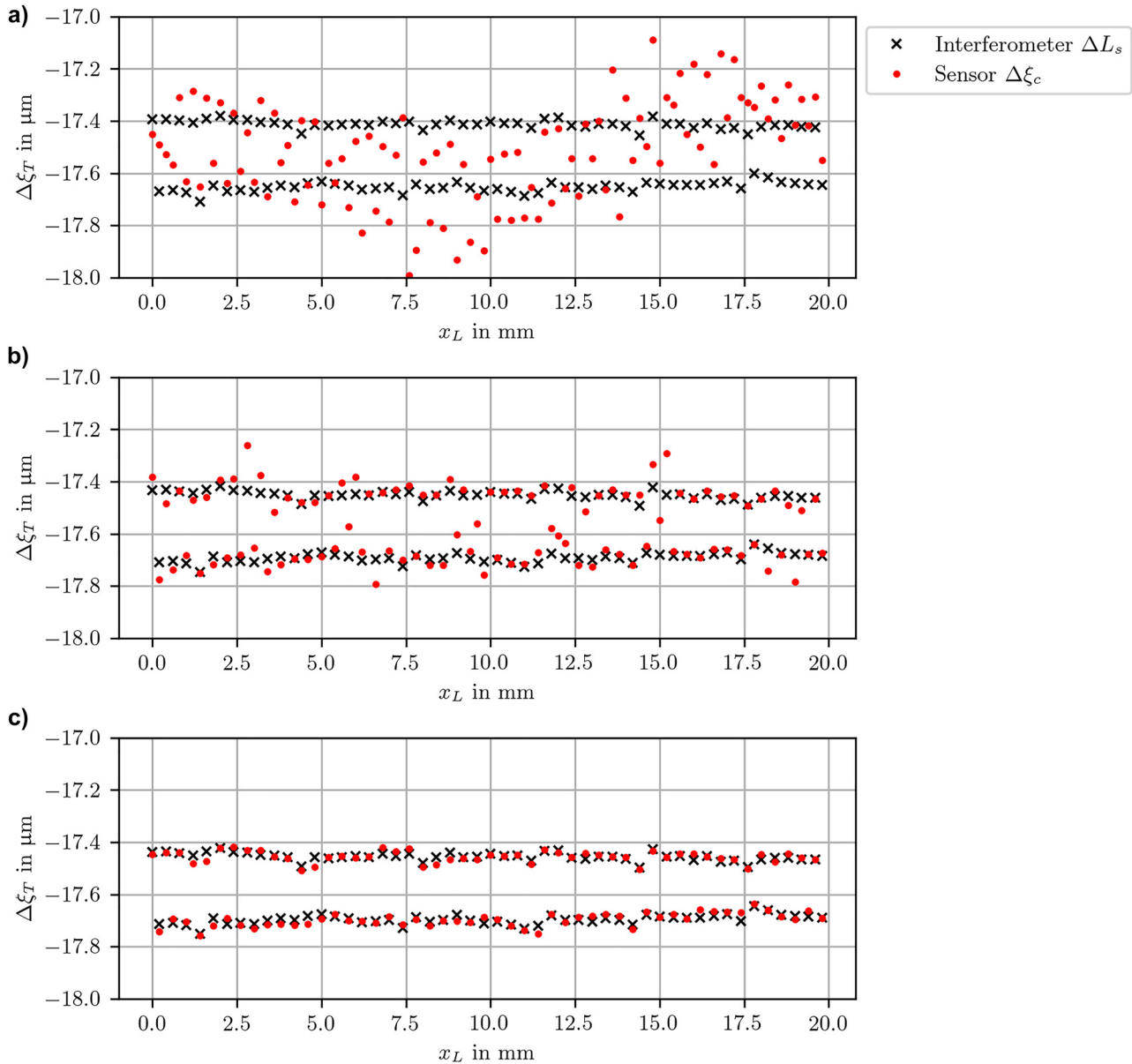
Für die Messung der Werkzeugablenkung bei der inkrementellen Blechumformung ist die Unsicherheit der Positionsmessung der an der Werkzeugspitze befestigten LED von Interesse. Die Positionsunsicherheit lässt sich aus der Unsicherheitsfortpflanzung für die Modellgleichung (1) bestimmen. Zur Charakterisierung 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  $\gamma$  und Abstand  $h_2$  zwischen Schattenmaske und Kamerasensor sowie der Bildposition  $\xi_B$  ab.

Entsprechend der Unsicherheitsfortpflanzungsrechnung werden die Unsicherheiten der Positionskomponenten aus den Empfindlichkeiten der Positionskomponenten gegenüber den Einflussgrößen und den Unsicherheiten der Einflussgrößen berechnet:

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



**Abbildung 3:** Ausgewertete Musterverschiebungen und zugehörige Referenz-Musterverschiebungen für experimentell aufgenommene Bilder: a) phasenbasierte Auswertung; b) Auswertung mittels Kreuzkorrelation; c) Auswertung mittels Modellfunktion.

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

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 Sensorpositionskomponenten zu  $u(x_s) = u(y_s) = 3 \mu\text{m}$ . Diese Annahmen beruhen auf Monte-Carlo Simulationen des Kalibrierprozesses mit einer limitierten Anzahl an Kalibrierstellen. Als Bildpositionsunsicherheit wird die experimentell erreichte Standardunsicherheit der Musterverschiebung von  $u(\xi_B) = 14,2 \text{ nm}$  verwendet.

Aus der Unsicherheitsfortpflanzung folgt die in Abbildung 4 dargestellte Unsicherheit in Abhängigkeit der

**Tabelle 1:** Mittlere Verschiebungsabweichungen (Simulation) und Standardunsicherheiten der Musterverschiebung (Experiment).

	Mittlere Verschiebungsabw.	Standardunsicherheit
Phasenauswertung	1,5 nm	151,0 nm
Korrelation	−20,6 nm	44,5 nm
Modellfunktion	−1,4 nm	14,2 nm

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

Die Kompensation der Werkzeugablenkung beim inkrementellen Blechumformen erfordert eine In-Prozess-Messung der Werkzeugposition mit einer Unsicherheit vom 15  $\mu\text{m}$ . Dies soll mit einem optischen Multi-Sensorsystem auf der Basis von schattenbasierten Angulationssensoren realisiert werden. In einem ersten Schritt wurde der Beitrag eines Einzelsensors zur Positionsmessunsicherheit untersucht.

Der Vergleich der drei Auswertemethoden Phasenauswertung, Korrelation und Approximation einer

Modellfunktion zeigt, dass die zufälligen Abweichungen die Messunsicherheit der Musterverschiebungen dominieren. Experimentelle Untersuchungen ergeben, dass die Approximation einer Modellfunktion mit einer Standardabweichung von 14,2 nm die geringste Messunsicherheit bei der Bestimmung der Musterverschiebung erreicht. Eine Abschätzung der weiteren Anteile des Messunsicherheitsbudgets belegt, dass die erforderliche Positionsmessunsicherheit grundsätzlich mit dem verwendeten Messprinzip erreichbar ist. Um den in dieser Anwendung geforderten Messbereich von  $2\text{ m} \times 3\text{ m}$  in der Arbeitsebene abzudecken, ist auf Basis dieser Erkenntnisse ein Multiangulations-Messsystem mit etwa 20 Sensoren erforderlich.

Gegenstand anschließender Arbeiten ist die Untersuchung des Einflusses von Umgebungslicht sowie der Unsicherheitsbeiträge der Kalibriergrößen. Weiterhin wird quantitativ analysiert, in welchen Grenzen die Positionsunsicherheit mit steigender Sensoranzahl reduziert werden kann.

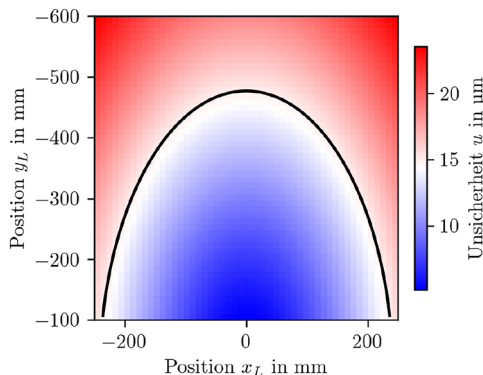
**Author contributions:** All the authors have accepted responsibility for the entire content of this submitted manuscript and approved submission.

**Research funding:** 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.

**Conflict of interest statement:** The authors declare no conflicts of interest regarding this article.

## Literatur

- [1] A. Kumar and V. Gulati, "Experimental investigations and optimization of forming force in incremental sheet forming," *Sādhanā*, vol. 43, no. 10, p. 42, 2018.
- [2] H. Ren, J. Xie, S. Liao, D. Leem, K. Ehmann, and J. Cao, "In-situ springback compensation in incremental sheet forming," *CIRP Ann.*, vol. 68, no. 1, pp. 317–320, 2019.
- [3] P. Konka, R. Lingam, U. A. Singh, C. H. Shivaprasad, and N. V. Reddy, "Enhancement of accuracy in double sided incremental forming by compensating tool path for machine tool errors," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, nos. 3–4, pp. 1187–1199, 2020.
- [4] P. Konka, R. Lingam, and 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," *J. Manuf. Process.*, vol. 58, pp. 510–523, 2020.
- [5] M. Auerswald, A. von Freyberg, and A. Fischer, "Laser line triangulation for fast 3d measurements on large gears," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 100, nos. 9–12, pp. 2423–2433, 2019.



**Abbildung 4:** Räumliche Verteilung der Unsicherheit  $u$  der Lichtquellenposition  $(x_L, y_L)$ . Die schwarze Kontur hebt die geforderte Grenze der Messunsicherheit von 15  $\mu\text{m}$  hervor.



- [6] D. Sims-Waterhouse, M. Isa, P. Samanta, and R. Leach, "Uncertainty model for a traceable stereo-photogrammetry system," *Precis. Eng.*, vol. 63, pp. 1–9, 2020.
- [7] U. Mutilba, J. A. Yagüe-Fabra, E. Gomez-Acedo, G. Kortaberria, and A. Olarra, "Integrated multilateration for machine tool automatic verification," *CIRP Ann.*, vol. 67, no. 1, pp. 555–558, 2018.
- [8] A. Kumar, V. Gulati, and P. Kumar, "Investigation of process variables on forming forces in incremental sheet forming," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 680–684, 2018.
- [9] M. Pillar, A. von Freyberg, and A. Fischer, "Scalable multi-distance measurement approach for the optical assessment of tooth-individual shape parameters of large gearings," *tm – Tech. Mess.*, vol. 89, nos. 7–8, pp. 544–553, 2022.
- [10] K. Philipp, A. Filippatos, R. Kuschmierz, et al., "Multi-sensor system for in-situ shape monitoring and damage identification of high-speed composite rotors," *Mech. Syst. Signal Process.*, vols. 76–77, pp. 187–200, 2016.
- [11] R. Kuschmierz, A. Davids, S. Metschke, et al., "Optical, in-situ, three dimensional, absolute shape measurements in cnc metal working lathes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 84, no. 9, pp. 2739–2749, 2016.
- [12] P. Masa, E. Franzi, and C. Urban, "Nanometric resolution absolute position encoders," in *Proceedings of 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, A. Wilson, Ed., ESA, 2009.
- [13] A. N. Andre, P. Sandoz, B. Mauze, M. Jacquot, and G. J. Laurent, "Sensing one nanometer over ten centimeters: a microencoded target for visual in-plane position measurement," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 25, no. 3, pp. 1193–1201, 2020.
- [14] V. Guelpa, G. J. Laurent, P. Sandoz, J. G. Zea, and C. Clévy, "Subpixelic measurement of large 1d displacements: principle, processing algorithms, performances and software," *Sensors*, vol. 14, no. 3, pp. 5056–5073, 2014.
- [15] L. Iafiglia, L. Witthauer, A. Zam, G. Rauter, and P. C. Cattin, "Proof of principle of a novel angular sensor concept for tracking systems," *Sens. Actuators, A*, vol. 280, pp. 390–398, 2018.
- [16] H. Yu, Q. Wan, Z. Mu, Y. Du, and L. Liang, "Novel nano-scale absolute linear displacement measurement based on grating projection imaging," *Measurement*, vol. 182, p. 109738, 2021.
- [17] M. Guizar-Sicairos, S. T. Thurman, and J. R. Fienup, "Efficient subpixel image registration algorithms," *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 2, pp. 156–158, 2008.

## Bionotes



**Axel von Freyberg**  
Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Bremen,  
[a.freyberg@bimaq.de](mailto:a.freyberg@bimaq.de),  
<https://orcid.org/0000-0002-0936-3655>

Axel von Freyberg hat an der Universität Bremen Produktionstechnik studiert. Er arbeitet als Gruppenleiter im BIMAQ und schloss seine

Promotion im Jahr 2021 ab. Seine Forschungsinteressen beinhalten die Geometriemesstechnik und die Messdatenauswertung.



**Marina Terlau**  
Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Bremen,  
[m.terlau@bimaq.de](mailto:m.terlau@bimaq.de),  
<https://orcid.org/0000-0002-5698-7049>

Marina Terlau hat an der Universität Bremen Produktionstechnik studiert. Seit 2021 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am BIMAQ. Ihre Hauptarbeitsgebiete liegen in der optischen Messtechnik und in der Bildverarbeitung.



**Dirk Stöbener**  
Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Bremen,  
[d.stoebener@bimaq.de](mailto:d.stoebener@bimaq.de),  
<https://orcid.org/0000-0002-1624-2106>

Dirk Stöbener absolvierte ein Physik-Studium und promovierte 2016 an der Universität Bremen im Fachbereich Produktionstechnik. Er ist seit 2000 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) angestellt. Seit 2003 leitet er die Arbeitsgruppe „In-prozess Messtechnik und Optik“ und übernahm 2020 die Position des Oberingenieurs. Seine Forschungsinteressen umfassen fertigungsnahe und In-Prozess-Messverfahren (optisch, akustisch und taktil) z. B. zur Positionsbestimmung und zur Charakterisierung von (geometrischen) Werkstückeigenschaften.



**Andreas Fischer**  
Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Bremen,  
[andreas.fischer@bimaq.de](mailto:andreas.fischer@bimaq.de),  
<https://orcid.org/0000-0001-7349-7722>

Andreas Fischer erhielt 2004 sein Diplom in Elektrotechnik und schloss 2009 seine Promotion an der Technischen Universität Dresden ab. Während seiner Tätigkeit als Leiter der Gruppe „Messsystemtechnik“ im Fachgebiet Mess- und Sensorsystemtechnik (2009–2016) habilitierte er im Jahr 2014. Seit 2016 ist er Professor im Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen und Leiter des Bremer Instituts für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ). Seine Forschungsbereiche umfassen Messsystemtechnik, optische Messprinzipien für die Strömungs- und Fertigungsmesstechnik sowie die Anwendung modellbasierter Messsysteme und die Untersuchung ihrer Messbarkeitsgrenzen.