

Beleuchtungsabhängige Effekte bei der Bildmessung von kreisförmigen Zielmarken¹

Illumination-dependent Effects in Image Measurement of Circular Targets

Mirko Riedel, Jessica Deutsch, Frank Liebold, Steffen Ihlenfeldt

In der Praxis zeigen sich bei Messanordnungen mit variablen Lichtbedingungen beleuchtungsabhängige Einflüsse in Form von Verlagerungen des Mittelpunkts, was sowohl im Bild- als auch im Objektraum nachweisbar ist. Zur Ursachenanalyse wurde ein Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung unterschiedlicher Beleuchtungssituationen realisiert. Damit konnte das beleuchtungsabhängige Verhalten bestätigt werden: Unter ungünstigen Bedingungen können Abweichungen im Bild bis zu 1 Pixel betragen. Einflussgrößen für diese Abweichungen sind dabei das Markenmaterial und dessen spezifisches Rauheitsprofil sowie die blickrichtungsabhängige Strahlgeometrie. Bekannte Reflexionsmodelle, beispielsweise aus dem Bereich der Computergrafik (Phong, Cook-Torrence u. ä.), bilden zwar Strahlgeometrie und Reflexionsverhalten sehr gut ab, können aber die Verlagerung des Markenzentrums nicht schlüssig erklären oder einen Korrekturansatz liefern. Deshalb wurden experimentelle Untersuchungen zu diesem Verhalten durchgeführt. Es zeigt sich, dass der Effekt systematisch ist, sodass im ersten Schritt eine Korrektur des Markendurchmessers erreicht werden konnte. Im zweiten Schritt wurde am Lehrstuhl ein optimiertes Markendesign entwickelt, das sowohl die Stabilität der Bildmessung deutlich steigern konnte als auch unter bestimmten Bedingungen die helligkeitsabhängige Verlagerung des Ellipsenmittelpunkts verringert.

Schlüsselwörter: Bildmessung, Ellipsenerkennung, Beleuchtung

Measuring arrangements with variable light conditions show illumination-dependent influences as deviations of the measured target's centre, which is detectable in both image and object space. To analyse the causes, an experimental setup was realised for the experimental investigation of different lighting situations, where the illumination-dependent behaviour was confirmed: deviations up to 1 pixel were measured in image space under suboptimal conditions. Influencing factors for these deviations are the target's material and its specific roughness profile as well as the beam geometry, depending on the direction of view. Known reflection models, for example in the field of computer graphics (Phong, Cook-Torrence, etc.), allow to compute beam geometry and reflection behaviour very well. Nevertheless, the models cannot conclusively explain the relocation of the target's centre or provide a corrective approach. Therefore, experimental studies have been conducted, which show a systematic effect. In a first step, a correction of the target diameter could be achieved. In the second step, an optimized target design was developed, which both significantly increased the stability of the image measurement and, under certain conditions, reduces the illumination-dependent shift of the ellipse centre.

Keywords: Image measurement, ellipse detector, illumination

¹ Dieser Artikel ist eine überarbeitete und erweiterte Version des Beitrages zu den Oldenburger 3D-Tagen 2019: „Untersuchung beleuchtungsabhängiger Effekte bei der Bildmessung“ von Mirko Riedel, Jessica Deutsch, Frank Liebold, Florian Richter und Steffen Ihlenfeldt.

1 MOTIVATION UND ZIELSTELLUNG

Die steigenden Anforderungen an Produktionssysteme im Kontext von Industrie 4.0 hinsichtlich Flexibilität und Adaptivität bei gleichzeitig sinkenden Losgrößen stellen im Maschinenbau eine besondere Herausforderung dar. Dies erfordert eine Steigerung der Anpassbarkeit einer Maschine auf neue Fertigungsverfahren sowie an veränderte Prozess- und Umgebungsbedingungen. Ein Schlüssel hierbei ist die Charakterisierung von Bewegungsfehlern und Kalibrierung der Maschinen. Daraus resultiert unmittelbar die Notwendigkeit, vorhandene Messmethoden, beispielsweise auch photogrammetrische, dafür zu adaptieren. Für die hochgenaue Messung von 3D-Koordinaten bzw. von Starrkörperbewegungen im Raum (6-DoF) bieten sich photogrammetrische Messmethoden an (Abb. 1).

Am Institut für mechatronischen Maschinenbau (IMD) sowie am Fraunhofer Institut für Umformtechnik (IWU) werden damit beispielsweise an Maschinen neben geometrischen Fehlern /Großmann et al. 2012, 2013a/ auch elastische und thermo-elastische Fehler gemessen /Großmann et al. 2013b, 2013c/. Hierfür ist in Abb. 1 der Messaufbau an einer Parallelkinematik „MiniHex“ zur optischen Erfassung des zeitlich veränderlichen thermischen Maschinenzustands mit einer 6-DoF-Messung (Relativverlagerung zwischen Gestell und Plattform in 6 Freiheitsgraden) dargestellt. Diese Messkonfiguration ermöglicht es, unter Laborbedingungen Unsicherheiten von $5\ \mu\text{m}$ für Verlagerungen und $10\ \mu\text{m}/\text{m}$ für die Neigung zu erreichen /Großmann 2013b/. Um den gesamten Bewegungsbereich der Maschine zu erfassen, sind jeweils drei Kameras am Maschinengestell und an der bewegten Plattform des Endeffektors montiert.

Bedingt durch diese Messanordnung, werden die Herausforderungen der variablen Beleuchtung deutlich, die vor allem bei einem Standortwechsel auftreten und nur begrenzt beeinflussbar sind. Da sich die Kameras gegenseitig im Bild erfassen, ist der Einsatz von gerichteter aktiver Beleuchtung (z.B. Punktleuchten, Blitz) oder Flächenbeleuchtung nicht möglich. Schon durch die

gegebenen und nicht veränderbaren Randbedingungen, bestehend aus Deckenbeleuchtung, Fenster und Spiegelungen, tritt im Bild ein hoher und vor allem variabler Kontrastumfang auf (Abb. 1), der auch durch Kamerasensoren mit einem hohen Dynamikumfang nicht vollständig erfasst werden kann. Auch Polarisationsfilter können in diesem Messaufbau nicht eingesetzt werden, da sie das Licht zu stark dämpfen. Hinzu kommt die Bewegung der Maschine und somit des Messsystems, sodass sich die Aufnahmerichtung und die resultierende Beleuchtungssituation in einem hohen Maße ändern. Der tatsächliche Dynamikumfang im Bild reicht von direkter Beleuchtung mit einer starken Überstrahlung (Abb. 1a und Abb. 1b) bis hin zu abgeschatteten Bereichen (Abb. 1c und Abb. 1d).

Um die Stabilität der im Vorfeld mittels erweiterter Bündelblockausgleichung kalibrierten Messanordnung und der 6DoF-Auswertung zu prüfen, ist ein initialer Test durchgeführt worden. Über mehrere Stunden hinweg ist die Position der Maschinenplattform (P) relativ zum Gestell (G) im statischen Zustand, also ohne Last oder Bewegung, vermessen worden.

Das Ergebnis zeigt eine systematische Abweichung der Messung (Abb. 2 links), die sich allerdings nicht in der Messunsicherheit widerspiegelt (Abb. 2 rechts). Die konstante Standardabweichung der Koordinaten deutet auf eine stabile Kalibrierung hin. Es scheint weder ein Fehler in der Messanordnung noch in der Kamerakalibrierung vorzuliegen. Der Verlagerungsfehler beträgt in Z-Richtung (vgl. Koordinatensystem der Plattform in Abb. 2) trotzdem bis zu $50\ \mu\text{m}$, obwohl alle Randbedingungen konstant gehalten wurden. Die Maschine war unbewegt, das heißt auch, die Temperatur der Maschine war konstant, da die Motoren unbestromt geblieben sind. Einzig die Veränderung der Beleuchtung durch die großen Dachfenster konnte nicht konstant gehalten werden, was nahelegt, dass hier die Ursache für die hohe Verlagerung der Koordinatenmessung zu suchen ist.

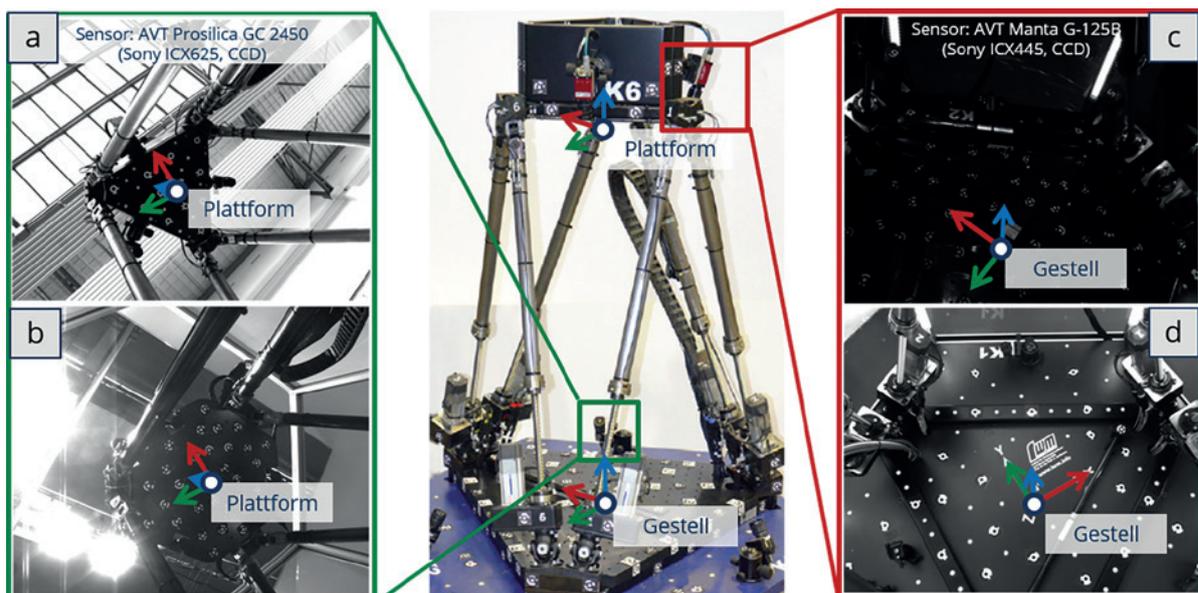


Abb. 1 | Breiter Helligkeitsbereich an der Parallelkinematik „MiniHex“; a) und b) positionsabhängige Überstrahlung im Bild durch Fenster und Spiegelung; c) und d) abgedunkelte Bildbereiche durch variable Umgebungsbeleuchtung (Koordinatensystem: rot X-, grün Y- und blau Z-Richtung)

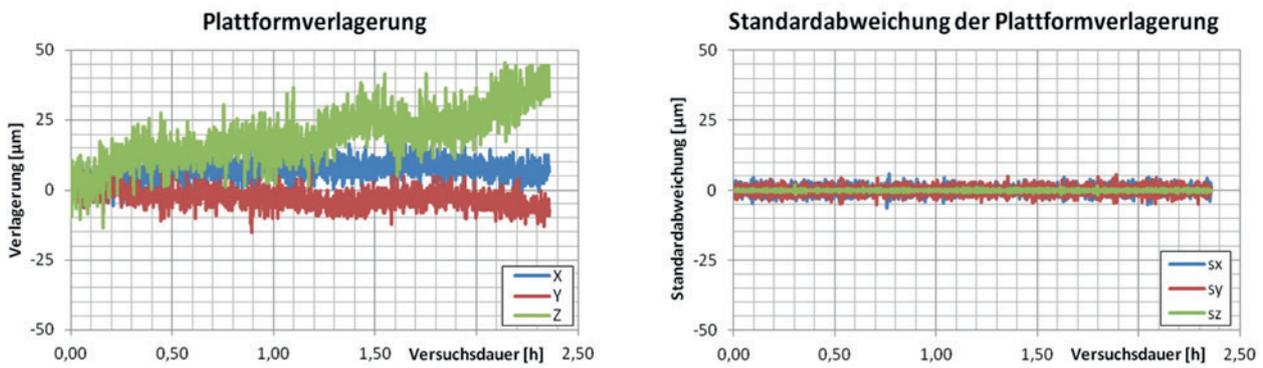


Abb. 2 | Links: Ergebnis der Verlagerungsmessung unter veränderlichen Beleuchtungsverhältnissen an einer abgeschalteten Maschine unter konstanten thermischen Bedingungen; rechts: Standardabweichung der Messung für die Verlagerung der Plattform

Aus praktischen Gesichtspunkten muss das Messsystem unter all diesen Bedingungen einsatzfähig sein und konzeptionell kann die Konfiguration nicht verändert werden. Für eine stabile und zuverlässige Messung sollen folgende Fragen geklärt werden:

- Kann der Effekt sauber erkannt werden, um fehlerhafte Messungen ausschließen zu können, bzw. kann der Effekt in der Bildmessung korrigiert werden?
- Kann eine Bildmessung realisiert werden, die unabhängig von der Beleuchtungssituation den tatsächlichen Mittelpunkt einer Ellipse ermittelt?

Um mögliche Ursachen für den beleuchtungsbedingten Effekt benennen zu können, werden an einem vereinfachten Beispiel unter definierten Laborbedingungen die Bildentstehung und die Bildmessung näher untersucht. Am Institut werden selbst implementierte Algorithmen verwendet: Hier soll daher auch geklärt werden, ob die Abweichungen in der Messung auch mit professioneller Software reproduzierbar sind. Es ist bekannt, dass seit 35 Jahren professionelle Systeme eine Genauigkeit von mehr als 1/20 Pixel im Bild erreichen können sollen (Genauigkeit für Bildkorrelation: /Ackermann 1984/, /Grün 2012/; Genauigkeit im Bündelblock: /Maas & Kersten 1994/). Die selbst entwickelten Algorithmen sollen gegenüber der kommerziellen Software verglichen und verifiziert werden.

Anschließend folgt eine Untersuchung der Auswirkungen im Bild- und Objektraum, um den beleuchtungsbedingten Einfluss zu quantifizieren, die prinzipielle Korrekturfähigkeit zu prüfen sowie ggf. einen Korrekturansatz für den beleuchtungsabhängigen Effekt auf die Bildmessung zu entwickeln.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Bildentstehung

An der Bildentstehung beteiligt sind prinzipiell die Lichtquelle, der Kamerasensor sowie das Objekt bzw. die Signalisierung auf dem Objekt, das vermessen wird (Abb. 3a). Der Einfluss dieser Elemente auf die erreichbare Messgüte im resultierenden Bild soll hier kurz diskutiert werden, um den Parameter zu identifizieren,

der am wahrscheinlichsten für den in Abschnitt 1 beschriebenen Effekt ursächlich ist.

Zwei Beispiele aus der Literatur beschäftigen sich mit zu unserer Problemstellung verwandten Thematiken. Bei Längenmessungen mit Retromarken sind richtungsabhängige Verlagerungen des Mittelpunkts beobachtet worden /Zumbrunn 1995/. Hier wird ein Bezug zu der Blickwinkelneigung hergestellt, der zu Abweichungen von $\pm 30 \mu\text{m}$ führt. In dem Zusammenhang muss auch auf die Abbildungsexzentrizität als weitere mögliche systematische Abweichung hingewiesen werden /Dold 1996/.

Das zweite Beispiel bezieht sich auf eine Beobachtung an einem Schachbrettmuster /Kreutzer 2016, S. 116/. Hier wird postuliert, dass die Lage des Bezugspunkts (gemeint ist der Eckpunkt zwischen vier Schachbrettfeldern) einerseits mit der Bestrahlungsstärke und andererseits mit der Beleuchtungsrichtung variiert, es wird ein systematischer Messfehler festgestellt.

Bei der Art der Lichtquelle unterscheidet man indirekte und direkte Lichtquellen, wobei direkte Belichtung unterschiedlich gerichtet sein kann. Für den genannten Anwendungsfall sind solche direkten, gerichteten Lichtquellen nicht vermeidbar, wobei sich zusätzlich die Einfallsrichtung abhängig von der Bewegung der Maschine ändert. Der Einfluss der Beleuchtung auf die Bildmessung äußert sich außerdem in der gewählten Wellenlänge des Lichts, welche die Interaktion mit der Oberfläche von Objekten beeinflusst. Dabei gibt das Rayleigh-Kriterium einen ersten Aufschluss darüber, ob

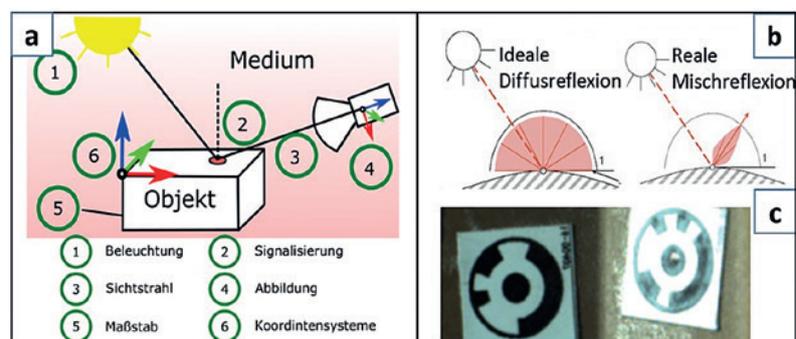


Abb. 3 | a) Einflüsse in der Bildentstehung; b) Beleuchtungsmodell mit idealer diffuser Reflexion und einer Mischreflexion aus diffusem und spekularem Anteil /Luhmann et al. 2014/; c) Vergleich stark überstrahlter Aufnahmen, beleuchtungsabhängiger Effekt auf eine Marke (vgl. Versuche in /Jähne 2012, S. 65/)

das Licht gerichtet oder diffus reflektiert wird. Wird das Kriterium im Zusammenhang mit der Rauheit der Oberfläche erfüllt, wird die Oberfläche als optisch glatt angesehen. Ideal sind optisch raue Materialien, die einen hohen Anteil des einfallenden Lichts diffus reflektieren /Kraus & Schneider 1988/. Dabei tritt in der Praxis immer ein Mischverhalten auf, wobei bei der Auswahl des Markenmaterials auf einen möglichst hohen diffusen und möglichst geringen spekularen Reflexionsanteil geachtet werden sollte (Abb. 3b und Abb. 3c). Weitere Einflüsse auf das Reflexionsverhalten sind die Farbe der Oberfläche sowie die Eindringtiefe in das Material.

Ebenso hat das umgebende Licht Einfluss auf den Kamerasensor, dessen Empfindlichkeit und Dynamikumfang beschränkt sind. Die *Empfindlichkeit* ist dabei wellenlängenabhängig und *nicht-linear* /Jähne 2012/, was zu einer Änderung der gefundenen Kantenpositionen und des Durchmessers der Marken führen kann. Ob dies jedoch weiterhin einen Einfluss auf die Lage des Mittelpunkts hat, ist nicht bekannt.

Um die Bildentstehung physikalisch basiert beschreiben und modellieren zu können, existieren im Bereich der Computergraphik Reflexionsmodelle, sogenannte BRDFs (Bidirectional Reflectance Distribution Function, Abb 3b). Diese beschreiben die Oberfläche eines Objekts als Fläche von Mikrofacetten, die das Licht reflektieren und sich dabei gegenseitig verdecken und abschatten. Manche BRDFs beziehen dabei die Fresnelschen Gleichungen und Verteilungen der Facetten aufgrund der Oberflächenstruktur ein (Berücksichtigung der Polarisation in den Fresnelschen Gleichungen). /Cook & Torrance 1982/ beschreiben außerdem, dass die Reflexion aus mehreren Teilen besteht: ein gerichteter Anteil gemäß dem Reflexionsgesetz, ein diffuser Anteil, der sich in alle Richtungen ausbreitet, und ein ambierter Anteil, welcher als Umgebungshelligkeit verstanden werden kann. Außerdem wird beschrieben, dass die diffuse Komponente hauptsächlich für die Farbgebung verantwortlich ist. Dies führt zu dem Schluss, dass Zielmarken für photogrammetrische Anwendungen so gefertigt werden sollten, dass sie nahezu nur diffus reflektieren. Gleichzeitig benötigt der Algorithmus zur Merkmalserkennung einen optischen Kontrast der Marke, sodass auch auf idealen Marken farbabhängig unterschiedliche Reflexionseigenschaften vorhanden sind (Abb. 3c).

Die Reflexionsmodelle der Computergrafik sind dabei zur Beschreibung der Vorgänge sowie zur Ermittlung der Kenngrößen der BRDF hilfreich. Die Modelle sind jedoch vor allem zur effizienten Erzeugung einer optisch ansprechenden Darstellung von 3D-Szenen geeignet. Sie betrachten die Gesichtspunkte der hochgenauen

Bildmessung nicht. Abschließend kann hiermit keine Erklärung für die Verlagerung des Mittelpunkts von Messmarken gefunden werden, sodass eine empirische Untersuchung der einzelnen Schritte der Bildmessung notwendig wird.

2.2 Bildmessung – Auswahl der Punktmessoperatoren

In der Bildmessung von kreisförmigen Zielmarken werden Methoden angewendet, die aus dem Helligkeitsverlauf im Bild die gesuchten Objektpunkte identifizieren können. Dabei erscheint die kreisförmige Marke im Bild als Ellipse. Übliche Verfahren sind Template-Matching- und Schwerpunktverfahren sowie kantenbasierte Ellipsenoperatoren. Für unsere Anwendungen eignen sich die Ellipsenoperatoren deshalb am besten, weil bei unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben der Zielmarken im Bild die besten Genauigkeiten erreicht werden können /Luhmann et al. 2014/. Es sind drei Varianten von Kantenoperatoren implementiert und deren Ergebnisse verglichen worden, um auszuschließen, dass der zu untersuchende Effekt durch mathematische Eigenschaften des Operators beeinflusst wird (Abb. 4b bis Abb. 4d).

Bei der Bildmessung von kreisrunden Zielmarken wird davon ausgegangen, dass der Ellipsenmittelpunkt, um die Abbildungsexzentrizität korrigiert, mit dem Mittelpunkt der kreisförmigen Zielmarke übereinstimmt. Die Berechnung eines Ellipsenmittelpunkts erfolgt anhand von mehreren Kantenpunkten, deren genaue Position entlang von Suchstrahlen mithilfe von Kantenoperatoren als Wendepunkte von Dunkel zu Hell ermittelt werden. Die Berechnung der Suchstrahlen erfolgt iterativ, indem der durch Ellipsenausgleich gefundene Mittelpunkt als Näherungswert der folgenden Iteration verwendet wird. Der klassische Sternoperator (Abb. 4a) legt konventionell die Suchstrahlen in einem winkelkonstanten Inkrement an einen Schätzwert an. Dies führt dazu, dass der Ellipsenumfang unterschiedlich dicht abgetastet wird. Die Variante, die Suchstrahlen umfangskonstant anzulegen, behebt zwar dieses Problem, führt jedoch dazu, dass einzelne Suchstrahlen sehr flach auf die Kante auftreffen. Um die Suchstrahlen optimal zu positionieren, wird deshalb die Kantennormale berechnet, sodass das Auftreffen auf die Kante senkrecht erfolgt. Die Vorschriften für den Gradientenoperator sind aus /Luhmann et al. 2014/, das Moment-Präservations-Verfahren ist aus /Tabatabai & Mitchell 1984/ entnommen und implementiert worden. Gleiches gilt für den Gran-Operator,

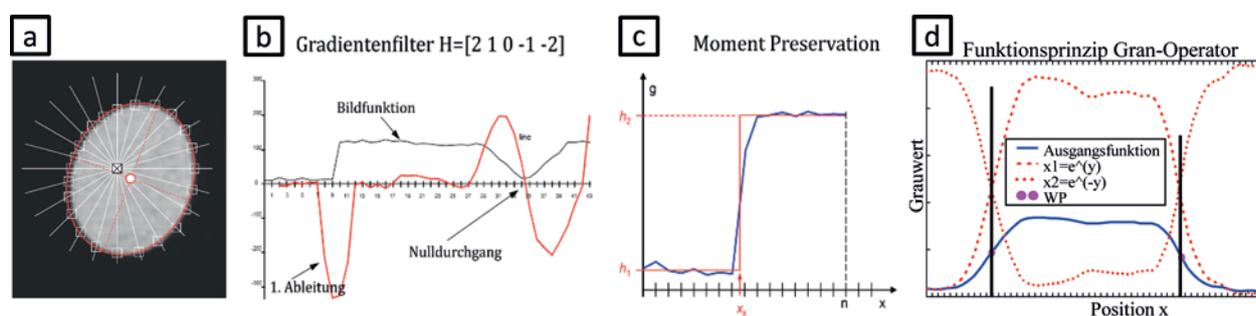


Abb. 4 | a) Prinzip des Stern-Operators; b) Schema verschiedener Kantenoperatoren: Gradientenoperator; c) Moment Preservation; d) Gran-Operator (a, b, c aus /Luhmann et al. 2014/)

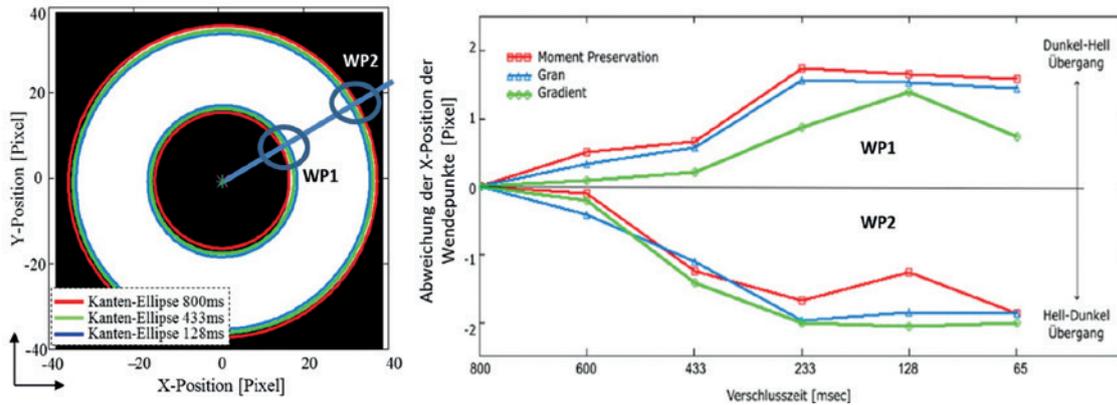


Abb. 5 | Ergebnisse der Kantenpunktmessungen mit diesen verschiedenen Operatoren in Abhängigkeit von der Beleuchtung

der ursprünglich im chemischen Prozess des Titrierens Anwendung findet /Gran 1950/ bzw. /Anderson et al. 1992/ und den gesuchten Wendepunkt als Schnittpunkt zweier Exponentialfunktionen berechnet.

Abschattungen der Marken werden über eine Kontrolle über die Stetigkeit der Helligkeit in einem definierten Abstand innerhalb und außerhalb der gefundenen Kante geprüft. Damit können effektiv gestörte Marken im Bild detektiert werden (z. B. teilweise abgeschattete Marken).

Abb. 5 zeigt beispielhaft Ergebnisse der Kantenmessung unter unterschiedlichen Belichtungseinstellungen einer optisch matten Marke aus Papier, die mit einem handelsüblichen Laserdrucker angefertigt wurde. Die detektierten Positionen des Wendepunkts werden an einem willkürlich ausgewählten Suchstrahl demonstriert (Abb. 5 rechts). Der resultierende Verlauf zeigt, dass sich die X-Position der Kantenpunkte im Dunkel-Hell-Übergang mit sinkender Gesamthelligkeit nach rechts verschiebt. Der Hell-Dunkel-Übergang verhält sich komplementär und verschiebt sich nach links. Abb. 5 zeigt deutlich auf, dass diese Operatoren an realen Kanten den Wendepunkt innerhalb einer Belichtungsreihe an unterschiedlichen Positionen detektieren. Gleichzeitig ist die Schwankungsbreite der Mittelpunkts-Koordinaten deutlich geringer als die Schwankungsbreite der resultierenden Durchmesseränderung. Die Wahl des Operators hat also Einfluss auf das Messergebnis, erklärt jedoch nicht den wandernden Mittelpunkt. Da alle Operatoren insgesamt ein vergleichbares beleuchtungsabhängiges Verhalten aufweisen, kann die Ursache für diesen Effekt nicht in der Auswahl des Operators liegen. Der Effekt bleibt unabhängig von der Wahl des Kantenoperators bestehen /Riedel et al. 2017/. Um die weitere Analyse zu vereinfachen, werden die folgenden Auswertungen daher nur noch mit einem Kantenoperator durchgeführt. Das Autorenteam entscheidet sich für den Gran-Operator.

3 VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

Zur experimentellen Untersuchung wurde ein Versuchsstand konzipiert, der reproduzierbar die einzelnen Einflussgrößen gezielt steuern kann (Abb. 6). Dafür wurden alle Versuche in einem fensterlosen Raum mit konstanter Umgebungstemperatur durchgeführt.

Zusätzlich wurde der Versuchsstand vom einfallenden Restlicht (z. B. Monitor) abgeschirmt.

Auf einen Grundrahmen wurde positionierbar die flächige Lichtquelle (ProLux Pix-A145) montiert. Diese kann sowohl einen Polarwinkel α von -90° bis $+90^\circ$ als auch einen Höhenwinkel β von 10° bis 90° abdecken (Abb. 6 links oben). An einem zweiten Schwenkarm wurden zwei Kameras in einer Stereoaordnung montiert (Stereobasis ca. 370 mm, Höhe ca. 350 mm). Bei den gewählten Kameras handelt es sich um zwei „Jai Go 5000C“ mit „CVO GMG 42514MCN“-Objektiv ($f = 25$ mm, Blende 8). Für die Versuchsdurchführung wurde ein Prüfkörper aus Modellbaukunststoff mit einer Größe von 210 x 175 x 50 mm betrachtet (Abb. 6), sodass das Blickfeld der Kameras ausgefüllt werden kann. Außerdem ist die Oberseite mit einem Relief versehen, welches einen maximalen Höhenunterschied von 30 mm aufweist und somit die eingangs beschriebenen Probleme von teils abgeschatteten und teils überstrahlten Flächen nachbilden soll. Die Kalibrierung des Kamerasystems (innere und relative Orientierung) und des Prüfkörpers (3D-Koordinaten) erfolgte über eine Simultankalibrierung unter Berücksichtigung von Kontrollstrecken mit der selbstgeschriebenen Software /Großmann et al. 2012/.

Mit den Versuchen sollen unterschiedliche Beleuchtungssituationen simuliert werden (Abb. 6 rechts). Dazu wird die Stereoaordnung der Kameras so geneigt, dass eine Kamera (K1) nahezu senkrecht auf den Prüfkörper schaut und die andere Kamera (K2) zur Grundplatte geneigt ist. Somit trifft das reflektierte Licht in unterschiedlichen Winkeln auf den Sensor der Kameras. Außerdem wurde die Einfallsrichtung der Lichtquelle in 45° -Schritten variiert. Für das folgende Beispiel wurde der Probekörper mit $\alpha = 0^\circ$ beleuchtet. Um die Stabilitätsgrenzen ermitteln zu können, muss der gesamte Helligkeitsbereich abgedeckt werden, sodass auch der Sättigungsbereich des Sensors erreicht wird. Entsprechend wurden je Messkonfiguration 30 Bilder mit Verschlusszeiten von 2,5 ms bis 500 ms erzeugt. Der Bereich ist bewusst großzügig gewählt, um die Auswirkungen und die Grenzen einer Über- als auch einer Unterbelichtung erfassen zu können. Aus diesem Grund sind in den folgenden Diagrammen diese Bereiche mit aufgeführt, wohl wissend, dass in professionellen Anwendungen diese Bildmessungen kontrast- und helligkeitsabhängig automatisch mittels Schwellenwerten ausgeschlossen werden. Um das Einlaufverhalten der Kameras in den Bilddaten eliminieren zu können, wurde die

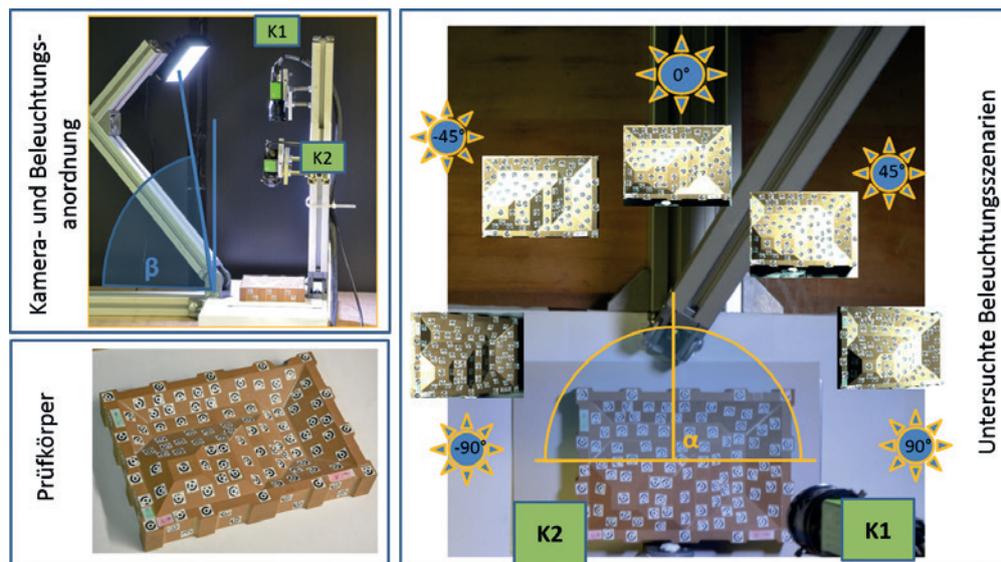


Abb. 6 | Versuchsaufbau und Prüfkörper (links), beleuchteter Prüfkörper in verschiedenen Beleuchtungskonfigurationen (rechts)

Folge von Belichtungszeiten sowohl aufsteigend als auch absteigend aufgenommen.

4 AUSWIRKUNG: OBJEKTRAUM

Zur Untersuchung der Einflüsse im Objektraum werden im ersten Schritt die 3D-Koordinaten der drei ausgewählten Marken aus der Stereoaufnahme mittels räumlichem Vorwärtsschnitt berechnet (Abb. 7 oben). Dabei wurde darauf geachtet, dass die Aufwärmphase der Kameras abgeschlossen ist und sowohl Kameras als auch der gesamte Aufbau konstant temperiert bleiben. So können thermische Effekte ausgeschlossen werden, die einen Einfluss auf die innere und äußere Orientierung haben können. Dies wird weiterhin bei der Versuchsdurchführung (zeitlich versetzte Mehrfachmessungen) überprüft.

In Abb. 7 wird anhand der unterschiedlichen Helligkeitsbereiche der Marken auf dem Prüfkörper deutlich, dass die verwendeten Papiermarken kein ideal diffuses Verhalten aufweisen, wie unter realen Testbedingungen zu erwarten ist.

Die beleuchtungsabhängigen Verlagerungen, vor allem in Tiefenrichtung (Z), sind gut erkennbar. Dabei ist bei kurzen Belichtungszeiten (< 20 ms) ein Rauschen der Koordinaten aller betrachteten Marken von bis zu $15 \mu\text{m}$ zu erkennen, die minimalen Helligkeitsunterschiede liegen bei ca. 10 Grauwerten. Die Marken 703 und 645 (Abb. 8) weisen Verlagerungen zwischen $10 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$ auf. Die Koordinate der Marke 111, die in direkter Reflexion auf den Kamerasensor trifft, weist in Z -Richtung sogar Verlagerungen bis $80 \mu\text{m}$ auf. Da eine Deformation des Probekörpers in dieser Größenordnung ausgeschlossen werden kann, muss dieser Fehler aus der Bildmessung stammen.

Bei der 6-DoF-Messung wird die Lage und Orientierung des Prüfkörpers mit dem Koordinatensystem $\{0\}$ relativ zu den Kameras bestimmt (Abb. 7 unten). Auch hier sind bei kurzen Belichtungszeiten ein Rauschen, in diesem Fall von bis über $50 \mu\text{m}$, aufgrund der äußerst geringen und systematisch verteilten Markenanzahl

erkennbar. Diese Bereiche führten zu klaren Fehlmessungen und müssen im späteren Einsatz ausgeschlossen werden. Insgesamt zeigen sich hier deutliche Unterschiede im Verhalten beider Kameras. In Kamera 1 tritt zu Beginn eine lineare Verlagerung in X - und Z -Richtung bis ca. 250 ms Belichtungszeit auf. Dann bricht die Anzahl der validen Bildmessungen auf den zu der Lichtquelle hin geneigten Flächen deutlich ein (lokale Überstrahlung), was sich in einem scheinbaren Rückgang der Verlagerung bis 400 ms zeigt. Danach fangen auch die restlichen Flächen an zu überstrahlen, was zu einer scheinbaren Stagnation des Trends führt. In Kamera 2 ist insgesamt der Anteil der direkten Reflexion geringer, was gut in der Gesamthelligkeit des Bilds erkennbar ist. Die scheinbare Verlagerung erfolgt hier wieder in Z - ($50 \mu\text{m}$) und X -Richtung mit einer zusätzlichen Neigung in V - ($200 \mu\text{m}/\text{m}$) und später in U -Richtung. Der Trend ist in beiden Kameras gleich, jedoch werden hier die Marken nicht überstrahlt und die Bildmessungen bleiben valide.

Da aufgrund des Messaufbaus und der Versuchsdurchführung thermische Effekte minimiert wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die beleuchtungsabhängigen Einflüsse einen Effekt im Objektraum aufweisen. Die Verlagerung ist abhängig von der Markenhelligkeit sowie der Ausrichtung der Marke zum Kamerasensor bzw. zur Lichtquelle.

5 URSACHENANALYSE IM BILDRAUM

Bildmessungen sind die entscheidende Grundlage für die Objektrekonstruktion. Die Auswertung erfolgt im grünen Farbkanal, um chromatische Fehler zu minimieren. Ausgewertet wird die Versuchsreihe, in der die Beleuchtung bei $\alpha = 0^\circ$ eingestellt ist (vgl. Versuchsaufbau Abb. 6).

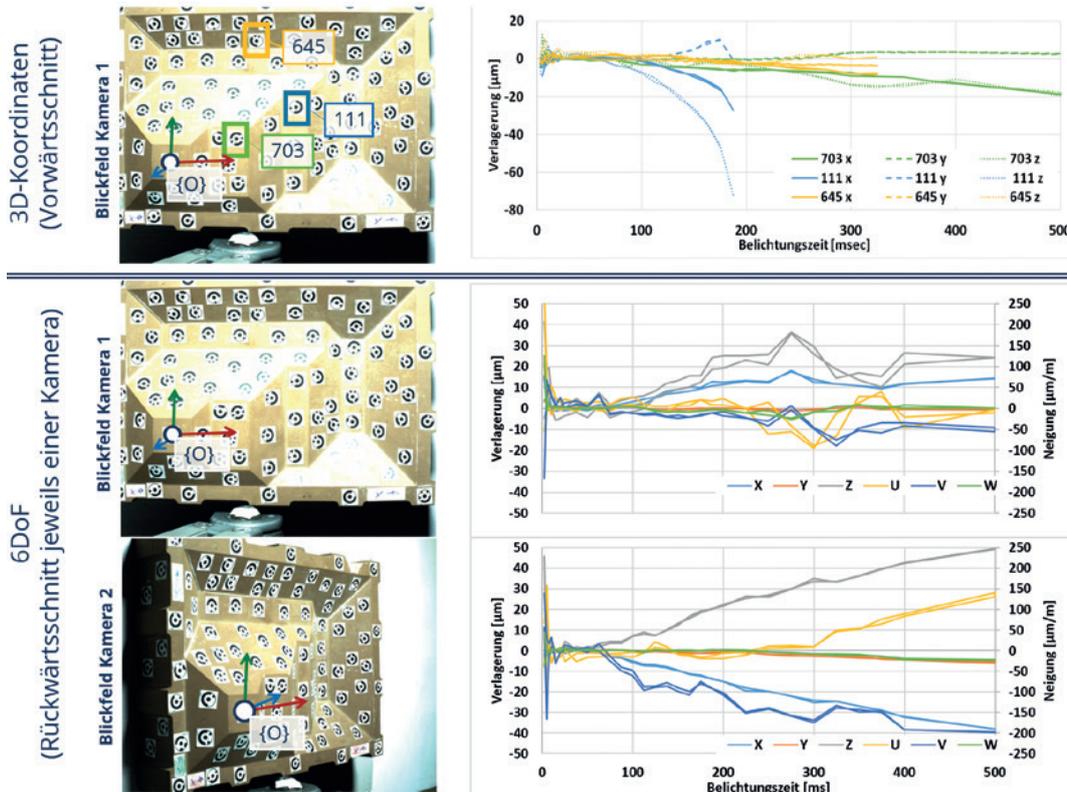


Abb. 7 | Auswertung im Objektraum; oben: Berechnung von 3D-Koordinaten für drei Marken, unten: 6-DoF-Berechnung des Prüfkörpers relativ zur Kamera (Koordinatensystem: rot X-, grün Y- und blau Z-Richtung)

5.1 Einzelmarke

Die Ergebnisse für die Mittelpunktbestimmung sind in *Abb. 8* dargestellt. Zunächst kann festgestellt werden, dass die Hysterese der Bildreihen mit aufsteigender bzw. absteigender Belichtungszeit klein ist. Ein thermischer Einfluss auf Kamera und Messanordnung kann ausgeschlossen werden und die Reproduzierbarkeit des Effekts ist somit gegeben.

Außerdem ist ein helligkeitsabhängiger Einfluss auf die Verlagerung im Bildraum deutlich erkennbar, da die Reflexionen der Lichtquelle auf den Marken ersichtlich werden, was durch das nicht ideale, diffuse Reflexionsverhalten verursacht wird (*Abb. 3b*). Das Rauschen der Objektkoordinaten und der Posemessung bei Belichtungszeiten < 20ms kann klar auf die Bildmessung zurückgeführt werden. Daraus ergeben sich die im Bild gemessenen Helligkeitsunterschiede der Kantenübergänge von ca. 20 Grauwerten als untere Schranke. Die maximale Abweichung wird in X-Richtung

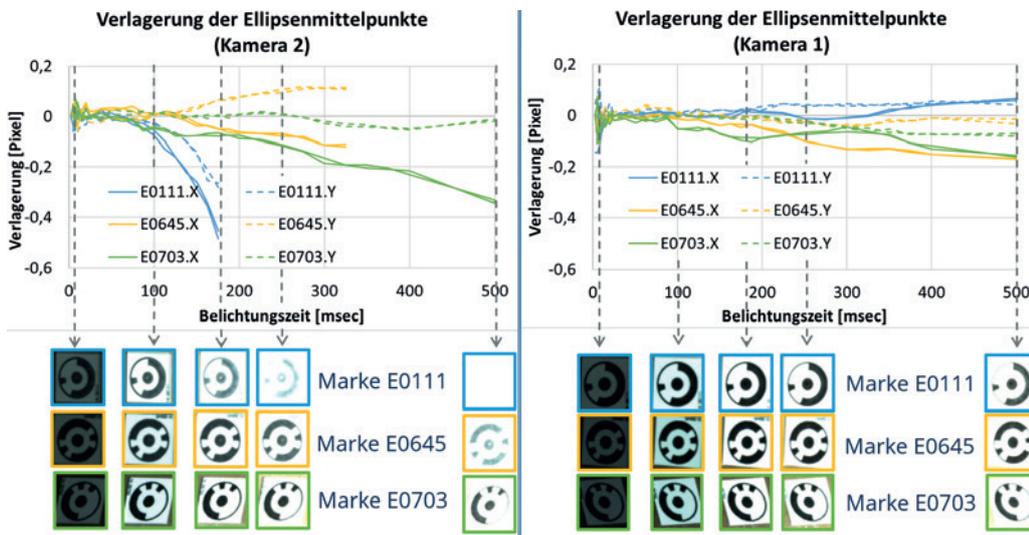


Abb. 8 | Resultierende Verlagerung des Ellipsenmittelpunkts bei variierender Belichtung für drei Marken in beiden Kameras

bei Marke 111 in Kamera 2 mit $-0,55$ Pixel erreicht (blauer Graph, *Abb. 8*). Diese Marke ist einerseits bereits bei 200 ms so stark überstrahlt, dass die Auswertung an dieser Stelle abbricht, da keine Informationen mehr vorliegen. Andererseits steht die entsprechende Kamera K2 auch in einem so stark geneigten Winkel zur Prüfkörpernormalen, dass die reflektierenden Strahlen nahe einer Totalreflexion sind. Diese Marken lassen sich aufgrund der üblichen Schwellenwerte einfach als Fehlmessung ausschließen. Die gleiche Marke wird auch mit Kamera K1 aufgenommen. Diese Kamera steht senkrecht über dem Prüfkörper und kann alle Marken bei allen Belichtungszeiten erfassen. Die Verlagerungen sind entsprechend kleiner und variieren zwischen $-0,17$ und $+0,11$ Pixel. Dabei tritt ohne signifikante Überstrahlung auch eine Verlagerung der Mittelpunkt-Koordinaten auf, die nicht über die üblichen Schwellenwerte identifiziert werden kann.

5.2 Analyse der Verlagerung im Bild

Nachdem der beleuchtungsabhängige Effekt sowohl im Bild- als auch im Objektraum nachgewiesen werden konnte, soll das Verhalten im Bildraum noch weiter untersucht werden. Hierbei soll die Abhängigkeit des Fehlers von der Entfernung zum Bildzentrum untersucht werden. Dazu wird eine DIN-A4-Seite vorbereitet, auf der in einem gleichmäßigen Raster Marken verteilt werden. Als nominelle Bildkoordinaten werden die Mittelwerte der Aicon-Messung über alle Bilddaten hinweg definiert (*Abb. 9*). Anschließend werden nahezu senkrechte Aufnahmen mit den bekannten Beleuchtungseinstellungen des Musters gemacht und ausgewertet. Weder Kamera noch die Objektpunkte werden während des Versuchs bewegt. Weiterhin werden Wiederholungsversuche durchgeführt, um thermische Effekte mit einem Einfluss auf die innere (Brennweite) und äußere Orientierung ausschließen bzw. identifizieren zu können. Es ändert sich lediglich die Beleuchtung. Nach /Dold 1996/ ergibt sich bei paralleler Objekt- und Sensorebene keine Abbildungsexzentrizität, weshalb diese Konstellation im Experiment gewählt wurde.

Die Verlagerungen des Mittelpunkts vom geschätzten Wert sind bei gleichmäßiger Beleuchtung radialsymmetrisch (*Abb. 9* links). Außerdem erhöht sich der Effekt mit zunehmendem Abstand zum Bildzentrum und beträgt in den Randbereichen bis über 1 Pixel (*Abb. 9* rechts). Der Effekt verhält sich systematisch und eine

vergleichende Untersuchung zwischen der selbst implementierten Auswertung und einem kommerziell erhältlichen Bildmessungstool zeigt, dass der Effekt mit beiden Softwarelösungen nachweisbar ist und die gleiche Größenordnung zeigt. Dies bestätigt die Vermutung aus Abschnitt 2, dass diese Effekte unabhängig vom Kantenoperator und der verwendeten Software sind. Die Verwendung des Gran-Operators hat den Vorteil, eine höhere Toleranz gegenüber schwacher Beleuchtung zu zeigen, was sich in der Häufung der gemessenen Bildkoordinaten im „stabilen“ Bereich zeigt.

6 KORREKTURFUNKTION ZUR BILDPOINTMESSUNG UND MARKENDESIGN

Ausgangspunkt ist der Suchstrahl, beginnend beim Näherungswert für die Mittelpunkt-Koordinate. In *Abb. 10a* sind die Ausgleichs-ellipsen aus dem ersten und zweiten Kantenübergang ohne Korrektur als durchgezogene Linie bei variierender Beleuchtung gezeigt. Es zeigt sich, dass die Position der gefundenen Wendepunkte beleuchtungsabhängig schwankt. Die Schwankungsbereiche ΔWP_1 und ΔWP_2 sind eingezeichnet. Im Abbild der Marke zeigt sich dieses Verhalten so, dass der Durchmesser der weißen Kreisinge mit steigender Gesamthelligkeit größer wird.

Als Grundlage für die Erstellung eines Korrekturansatzes für diesen Effekt werden in *Abb. 10b* die beleuchtungsabhängigen Intensitätsverläufe entlang eines Suchstrahls betrachtet. Die jeweils gefundene Position der Wendepunkte vom dunklen Markenkern auf den hellen Markenring (WP_1) sowie die Wendepunkte vom hellen Markenring auf den zweiten dunklen Markenring (WP_2 , vgl. *Abb. 10b*) usw. sind markiert. Im Diagramm zeigt sich, dass der Betrag des Gradienten unabhängig von der Art des Übergangs (hell-dunkel bzw. dunkel-hell) und über alle Suchstrahlen hinweg gleich ist. Es bestätigt sich, dass die Position des Wendepunkts beleuchtungsabhängig ist.

Die Verschiebung zweier benachbarter Kantenpunkte auf einem Strahl erfolgt durch die unterschiedlich gearteten Übergänge (hell-dunkel zu dunkel-hell) symmetrisch. Dieses symmetrische Verhalten der Wendepunkte kann für eine Korrekturfunktion genutzt werden. Auf Basis des Mittelwerts beider Kantenpunkte kann ein korrigierter Wendepunkt bestimmt werden, der dann für die Bestimmung des Ellipsenmittelpunkts herangezogen wird.

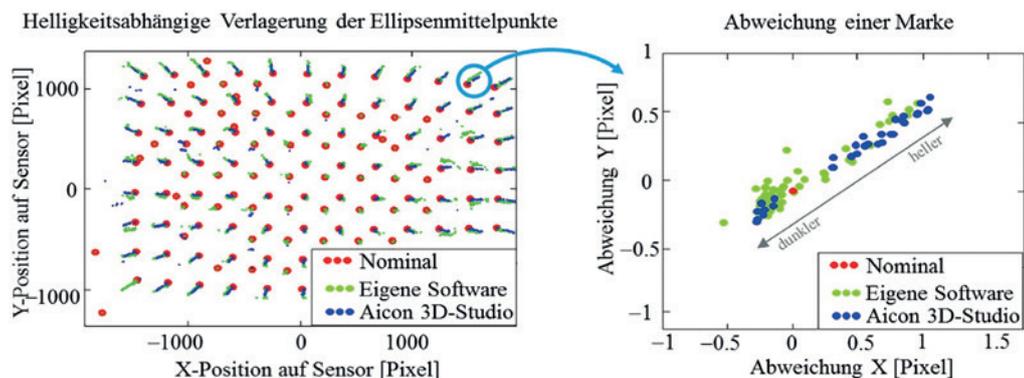


Abb. 9 | Bestimmung der Verlagerung der Mittelpunkts-Koordinaten gemessener Ellipsen (Überhöhungsfaktor 100) mit unterschiedlichen Softwarelösungen

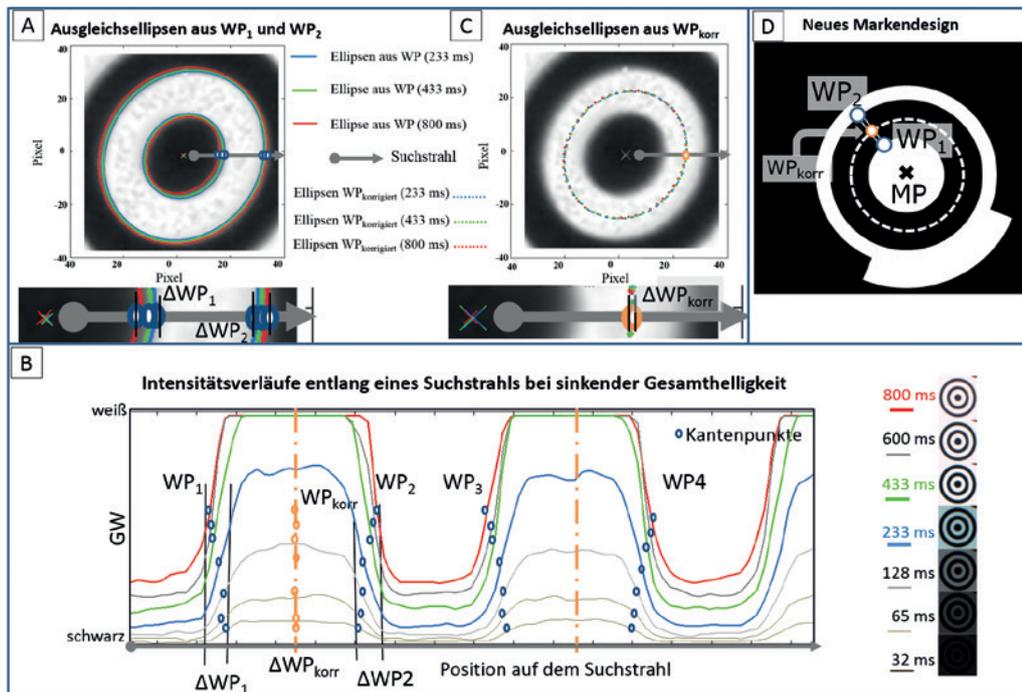


Abb. 10 | Korrekturansatz für die beleuchtungsabhängige Verlagerung; A) Ausgleichsellipsen, die mit Wendepunkten berechnet wurden, sowie beleuchtungsabhängiger Schwankungsbereich dieser Wendepunkte; B) Prinzip der zueinander symmetrischen Lage der Wendepunkte an einem Suchstrahl; C) Ausgleichsellipsen, die aus den gemittelten Wendepunkten berechnet wurden, sowie beleuchtungsabhängiger Schwankungsbereich; D) von diesem Prinzip abgeleitetes, neues Markendesign

$$WP_{\text{korr}} = \frac{WP_2 - WP_1}{2} + WP_1. \quad (1)$$

Außerdem kann durch die Verwendung von mehr Kanteninformationen pro Position die Ellipsenbestimmung wesentlich robuster erfolgen. Der Einfluss von Ausreißern kann dadurch reduziert werden bzw. die notwendige Anzahl der Suchstrahlen gesenkt werden. Mit Berücksichtigung der Abhängigkeit der Markenposition zum Bildzentrum ist die Korrektur an einer zentrumsfernen Marke getestet worden. In *Abb. 10c* sind die resultierenden Ausgleichsellipsen bei variierender Beleuchtung mit Korrektur (Gl. (1)) als gestrichelte Linie gezeigt. Der Schwankungsbereich ΔWP_{korr} ist deutlich kleiner als bei der Ausgangssituation mit Schwankungsbreiten der Wendepunkte ΔWP_1 und ΔWP_2 . Dieser Ansatz zeigt sehr gute Korrekturwirkung, denn durch die Korrektur des Durchmessers kann die helligkeitsabhängige Änderung des Ellipsendurchmessers signifikant reduziert werden. Damit einher geht eine Verbesserung der Verlagerung der Ellipsenmittelpunkte, was auch in /Riedel et al. 2017/ beschrieben wurde. Das Ergebnis ist nicht mehr von der Gesamthelligkeit im Bild abhängig.

Um diese Erkenntnisse zur Korrektur der Objektkoordinaten nutzen zu können, wird ein neues Markendesign entwickelt. Daran kann der Korrekturansatz, wie oben beschrieben, umgesetzt werden (*Abb. 10d*) und erlaubt eine gute Kontrolle der Helligkeitsverhältnisse. Dazu wird eine Marke mit weißem Kern um einen Kontrollring erweitert. So kann ein Wendepunkt an einem Hell-Dunkel-Übergang (WP_1) und der Komplementärwert an einem Dunkel-Hell-Übergang (WP_2) gemessen werden. Mit dem Mittelungsansatz wird daraus die korrigierte Ellipse berechnet. Im weiteren Vorgehen

ist zusätzlich eine Bestimmung der Abbildungsexzentrizität (/Dold 1996/, /He et al. 2012/ und /Wrobel 2012/) geplant. Auf diese Weise ist die Maximierung des Informationsgehalts im Bild möglich.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die deutlichen Unterschiede zwischen Labor- und Versuchsfeldmessungen konnten auf den Beleuchtungseinfluss auf die Bildmessungen zurückgeführt und in einem Laborversuchsstand reproduziert werden. Damit kann der beleuchtungsabhängige Effekt in Form von Verlagerungen des Mittelpunkts bei variierender Beleuchtung sowohl im Bild- als auch im Objektraum wiederholbar demonstriert werden, was das Hauptziel der bisherigen Arbeiten war. Dieser Effekt ist abhängig von der Helligkeit im Gesamtbild, der Helligkeit lokal auf der Marke sowie vom Beleuchtungswinkel und dem Markenmaterial. Es konnte gezeigt werden, dass sich der Effekt bei einer Senkrechtaufnahme radialsymmetrisch und unabhängig vom gewählten Kantenoperator verhält und bei unterschiedlichen Systemen auftritt. Das Verhalten des Effekts scheint systematischer Natur zu sein, was auf eine prinzipielle Korrekturfähigkeit schließen lässt. Dies wurde beispielhaft an der Korrektur der Markendurchmesser dargestellt. In nachfolgenden Arbeiten sind Erweiterungen zum Korrekturansatz und das Einbeziehen der Abbildungsexzentrizität vorgesehen. Außerdem ist eine Validierungsmessung geplant, in der die Vermessung einer Maschine mit dem neuen Markendesign durchgeführt wird.

DANK

Die dargestellten Ergebnisse entstanden mit freundlicher Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer: 174223256-TRR96 im TP C06.

LITERATUR

- Ackermann, F. (1984): Digital Image Correlation: Performance and Potential Application in Photogrammetry. In: Photogrammetric Record 11(1984)64, 429–439.
- Anderson, L. G.; Haraldsson, C.; Lindegren, R. (1992): Gran linearization of potentiometric Winkler titration. In: Marine chemistry 37(1992), 179–190.
- Cook, R. L.; Torrance, K. E. (1982): A Reflectance Model for Computer Graphics. In: ACM Transactions on Graphics 1(1982)1, 7–24.
- Dold, J. (1996): Influence of Large Targets on the Results of Photogrammetric Bundle Adjustment. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 31(1996)B5.
- Gran, G. (1950): Determination of the equivalent point in potentiometric titrations. In: Acta Chemica Scandinavica 4(1950)4, 559–577.
- Großmann, K.; Kauschinger, B.; Riedel, M. (2012): Photogrammetrischer Modellbaukasten zur Erfassung von Bewegungsfehlern an Werkzeugmaschinen. In: Luhmann, Th.; Müller, Ch. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Wichmann, Berlin/Offenbach, 332–339.
- Großmann, K.; Kauschinger, B.; Riedel, M. (2013a): Optische Verlagerungsmessung an Kardangelenken. In: wt-online 103(2013), 402–409.
- Großmann, K.; Müller, J.; Merx, M.; Riedel, M. (2013b): Untersuchung des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen – Grundlagen der experimentellen Analyse mit Hilfe der selektiven Thermografie. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 108(2013), 492–497.
- Großmann, K.; Merx, M.; Riedel, M. (2013c): Thermografie und Nahbereichsphotogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern. 16. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar. In: Tradition und Gegenwart bei der Analyse des thermischen Verhaltens spanender Werkzeugmaschinen. DWM e.V.
- Grün, A. (2012): Development and Status of Image Matching in Photogrammetry. In: Photogrammetric Record 27(2012)137, 36–57.
- He, D.; Liu, X.; Yin, Y.; Li, A.; Peng, X. (2012): Correction of Circular Center Deviation in Perspective Projection. In: Proceedings of SPIE 8499, Applications of Digital Image Processing XXXV, 84991V.
- Jähne, B. (2012): Digitale Bildverarbeitung. 7. Auflage. Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg.
- Kraus, K.; Schneider, W. (1988): Fernerkundung. Band 1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. Dümmler, Bonn.
- Kreutzer, M. (2016): Entwurf, Simulation und Optimierung mehrkamera-basierter 6D-Pose-Messsysteme zur Verringerung der Positionsunsicherheit in der robotergestützten Koordinatenmesstechnik. Dissertation, Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau, TU Clausthal. Veröffentlichung des Instituts für Prozess- und Produktionsleittechnik der TU Clausthal, Clausthal.
- Luhmann, T.; Hastedt, H.; Tecklenburg, W. (2006): Modelling of Chromatic Aberration for high precision Photogrammetry. In: Proceedings of ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology, 25.–27. September 2006, Dresden, 36(2006)5, 173–178.
- Luhmann, T.; Robson, S.; Kyle, S.; Boehm, J. (2014): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 2. Auflage. De Gruyter, Berlin/Boston.
- Maas, H.-G.; Kersten, T. (1994): Digitale Nahbereichsphotogrammetrie bei der Endmontage im Schiffsbau. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF) (1994)3.

Riedel, M.; Deutsch, J.; Müller, J.; Ihlenfeld, S. (2017): Experimentelle Untersuchung des Beleuchtungseinflusses auf die Güte von Ellipsenmessungen. In: 20. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten. Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFal), 7.–8. Dezember 2017, Berlin, 43–52.

Tabatabai, A. J.; Mitchell, O., R. (1984): Edge Location to Subpixel Values in Digital Imagery. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 6(1984)2, 188–201.

Torrance, K. E.; Sparrow, E. M. (1967): Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces. In: Journal of the Optical Society of America 57(1967)9, 1105–1114.

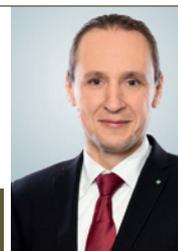
Wrobel, B. (2012): Kreismarken in perspektiver Abbildung – im Bild und im Bündelblock. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), (2012)3, 221–236.

Zumbrunn, R. (1995): Systematic pointing errors with retroreflective targets. In: Optical Engineering 34(1995)9, 2691–2695.

Mirko Riedel

FRAUNHOFER INSTITUT FÜR
UMFORMTECHNIK

Bamberger Str. 7 | 01187 Dresden
mirko.riedel@iwu.fraunhofer.de



Dipl.-Ing. Jessica Deutsch

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
INSTITUT FÜR MECHATRONISCHEN
MASCHINENBAU

Helmholtzstraße 7a | 01069 Dresden
jessica.deutsch@tu-dresden.de



Dipl.-Ing. Frank Liebold

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND
FERNERKUNDUNG

Helmholtzstraße 10 | 01069 Dresden
frank.liebold@tu-dresden.de



Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
INSTITUT FÜR MECHATRONISCHEN
MASCHINENBAU

Helmholtzstraße 10 | 01069 Dresden
steffen.ihlenfeldt@tu-dresden.de



Manuskript eingereicht: 30.09.2019 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet