

Potenziale der Photogrammetrie bei der Vermessung von Verarbeitungsmaschinen

Riedel, Mirko¹; Holowenko, Olaf²; Ihlenfeldt, Steffen^{1,2}

Zusammenfassung

Um die Prozessstabilität in Verarbeitungsmaschinen auch bei hohen Ausbringungen bewerten und darauf aufbauend sicherstellen zu können ist eine geometrisch-kinematische Analyse des realen Bearbeitungsprozesses notwendig. Dazu wird im Beitrag ein optisches Hochgeschwindigkeits-Mehrkamera-Messsystem vorgestellt, mit dem auch schnelle Prozesse berührungslos analysiert werden können. Es wird gezeigt, wie durch die Zusammenführung von Bewegungsanalyse und Daten aus der Maschinensteuerung der Informationsgehalt und damit auch die Aussagefähigkeit von Messungen deutlich erhöht werden kann. Als Beispielprozess wird der intermittierende Transport kleinformatiger Stückgüter (z.B. Schokoladenriegel) gewählt. Dieser Beitrag knüpft an [GHR15] an.

1 Einleitung

Verarbeitungsmaschinen dienen der automatisierten Produktion von Massenbedarfsgütern mit hohen Stückzahlen. Eine Steigerung der Produktivität ist aus wirtschaftlicher Sicht eine zentrale Forderung, wobei allerdings zwingend spezifische Anforderungen eingehalten werden müssen, z. B. an Produktqualität, Prozessstabilität, Energieverbrauch oder Umgebungsbeeinflussung. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Produktivität ist die Steigerung der Arbeitstaktrate. Mit ihrer Erhöhung ändern sich prinzipbedingt auch die zeitlichen Verläufe der Bewegungsgrößen am Arbeitsorgan. Damit verbunden ist, dass vermehrt unerwünschte Effekte auftreten, wie z.B. instabile Prozesse, sinkende Produktqualität, Schwingungen, Lärm oder erhöhter Energieverbrauch. Eine Steigerung der Arbeitstaktrate ist dadurch grundsätzlich begrenzt.

Das abgeschlossene DFG-geförderte Projekt „Modellbasierte Bahnplanung“ widmete sich diesem Thema. Es wurde untersucht und nachgewiesen, wie sich ausgewählte, störende Effekte beherrschen lassen und damit die Arbeitstaktrate signifikant gesteigert werden kann [HK17, TSM⁺18b]. Als Beispielprozess wurde der intermittierende Transport kleinformatiger

¹ Fraunhofer IWU

² TU Dresden, IWM

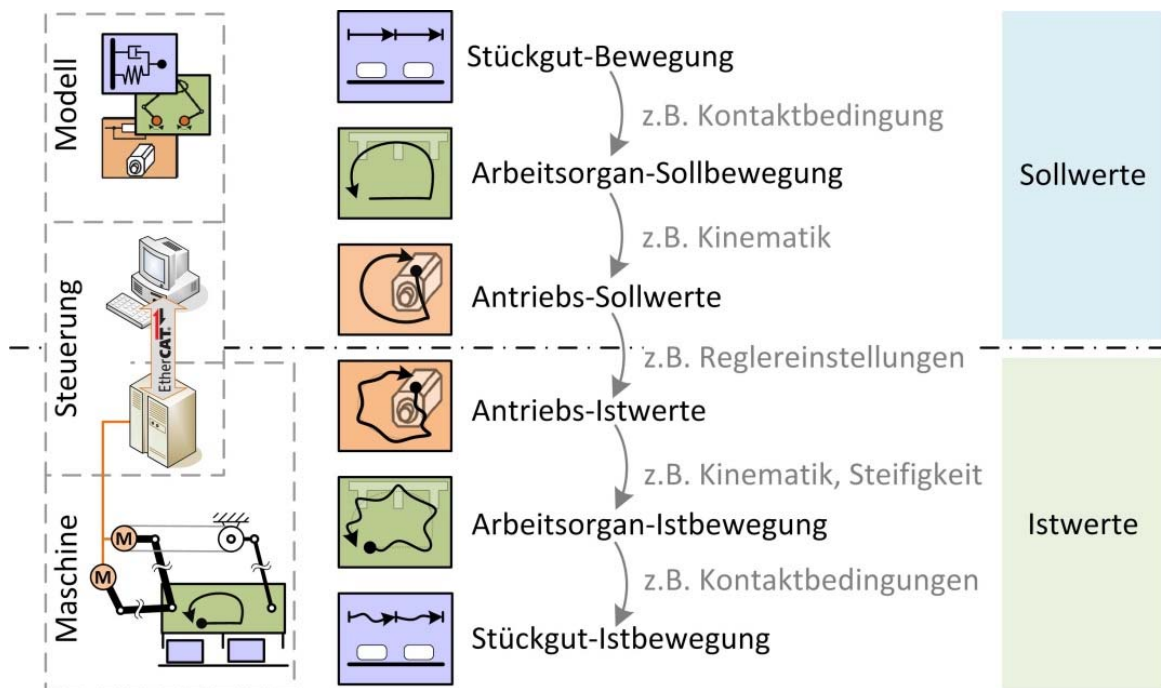


Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Erstellung und Abarbeitung von Bahnbewegungen

gemessen werden können, ist es notwendig, die reale Arbeitsorgan- und Stückgutbewegung mit einem externen Messsystem zu messen. Damit können die exemplarischen Größen der Eigenschaften bestimmt und in der Optimierung berücksichtigt werden.

Grundsätzlich kann der Einsatz von High-Speed-Kameras zur berührungslosen Analyse schnelllaufender Prozesse als Stand der Technik bezeichnet werden. Weniger bekannt sind jedoch die Möglichkeiten zur Auswertung der aufgenommenen Bilder mit photogrammetrischen Methoden. In dieser Arbeit werden einige der Potenziale aufgezeigt. Es wird ein photogrammetrisches Messsystem vorgestellt, welches die reale Arbeitsorganbewegung mit einer hohen zeitlichen und örtlichen Auflösungen ermöglicht. Weiterhin wird die Steigerung des Informationsgehaltes durch die Zusammenführung mit steuerungsinternen Prozessgrößen an beispielhaften Messungen an der realen Kinematik demonstriert.

2 Stand der Technik - Photogrammetrie

„Unter Photogrammetrie versteht man allgemein Methoden, aus einem oder mehreren Bildern eines beliebigen Objektes indirekt dessen Form und Lage [...] zu gewinnen“ [Luh10]. Mit den dabei verwendeten Methoden kann ein hohes Genauigkeitsniveau erreicht werden. Der grundlegende Ablauf photogrammetrischer Vermessung gliedert sich in Bildaufnahme, Bildmessung und Objektrekonstruktion, Abbildung 3.

Unter dem Begriff der Bildaufnahme wird das Aufnehmen der digitalen Bilder des zu vermessenden Objektes verstanden. Mehrere zeitlich aufeinanderfolgend aufgenommene

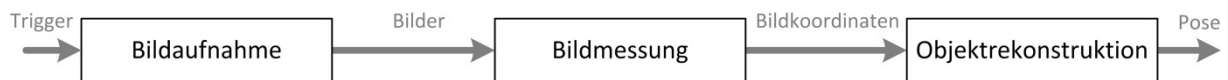


Abbildung 3: Ablauf bei der photogrammetrischen Messung

Bilder werden als Bildsequenz bezeichnet. Die Bildmessung umfasst die Bestimmung von Koordinaten bekannter Objekte in den Bildern (Bildkoordinaten in Pixel). Bei der Objektrekonstruktion wird daraus unter Berücksichtigung von Vorwissen ein geometrisches 3D-Modell erstellt. Aus diesem Modell können dann 3D-Koordinaten von Marken oder Positionsinformationen, beispielsweise von Arbeitsorgan und Stückgurt relativ zum Gestell, abgeleitet werden. Aus Bildsequenzen können dann Bewegungen ermittelt werden.

2.1 Bildaufnahme

Stand der Technik zur Vermessung schnelllaufender Prozesse ist der Einsatz von Hochgeschwindigkeits-Kameras, z.B. [Aic18, GD14]. Sie erreichen Aufnahmezeiten im kHz-Bereich bei Sensorauflösungen von mehreren Megapixeln. Sie bieten weiterhin Möglichkeiten zur synchronisierten Bildaufnahme durch einen externen Trigger.

Generell ist bei der Bildaufnahme wichtig, dass die Bilder einen ausreichend hohen Bildkontrast und Schärfentiefe bieten, was neben dem Einsatz entsprechender zusätzlicher Beleuchtung auch eine sorgfältige Versuchsvorbereitung erfordert. Die Güte der aufgenommenen Bilder bestimmt dabei direkt die Anzahl der erfassbaren Merkmale und deren erreichbare Genauigkeit bei der Bildmessung, was sich somit direkt auf die Güte der Objektrekonstruktion auswirkt.

2.2 Bildmessung

Bei der Bildmessung wird die Position bzw. der Bildkoordinaten bekannter Merkmalen in den aufgenommenen Bildern bestimmt. Dafür haben sich kreisrunde Marken bewährt deren Ellipsenmittelpunkt blickwinkelunabhängig ist. Diese Marken erlauben eine eindeutige und deutlich genauere Bestimmung der Positionen der Objekte, als dies über die natürliche Textur (z. B. Kanten) möglich wäre. Der Markenmittelpunkt kann bei einem Markendurchmesser von über 15 Pixeln dabei theoretisch mit einer sehr hohen Genauigkeit von bis zu $1/500$ Pixel berechnet werden [Luh10]. Die Genauigkeit wird durch eine Messung einer hohen Anzahl von Kantenpunkten sichergestellt, aus denen eine ausgleichende Ellipse berechnet wird. Die tatsächlich erreichbare Genauigkeit (**Abbildung 4**, rechts) hängt jedoch stark von verschiedenen Faktoren wie Markengröße aber auch von äußeren Störeinflüssen wie beispielsweise Abschattungen ab. Unter realen Aufnahmebedingungen können mit den

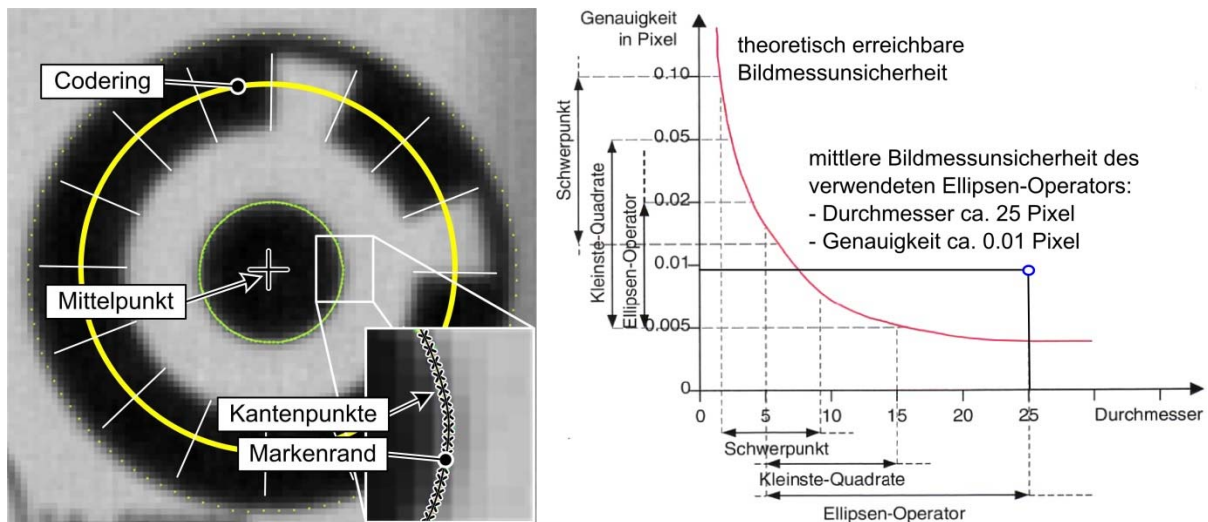


Abbildung 4: Bildmessung: links Kantenpunkte einer Marken [GHR15] sowie rechts theoretisch erreichbare Bildmessgenauigkeit nach [Luh10].

zur Bildmessung eingesetzten Ellipsen-Operatoren mittlere Genauigkeiten von 1/100 Pixel sicher und zuverlässig erreicht werden.

Zu automatischen Identifikation einzelner Marken im Bild können codierte äußere Ringe eingesetzt werden, deren Codierung sich mit einem Barcode für jede Marke vergleichen lassen. Sie dienen dazu, einzelne Marken im Bild zu identifizieren und später Objekten bei der Rekonstruktion zuordnen zu können.

Die in der Praxis verwendeten Marken lassen sich sehr kostengünstig mit handelsüblichen Druckern auf selbstklebendem Papier in unterschiedlichen Größen anfertigen und mit der Hand applizieren. Da die Marken an beliebigen Stellen appliziert werden können, ist der Aufwand zur Messungsvorbereitung der zu erfassenden Objekte sehr gering.

2.3 Objektrekonstruktion

Die Transformation der gemessenen 2D-Bildkoordinaten in den 3D-Raum, dem sogenannten Objektraum, wird als *Objektrekonstruktion* bezeichnet. Dazu haben sich unterschiedliche Methoden etabliert. Die am weitesten verbreitete Methode der Stereobildauswertung kann prinzipbedingt nur 3D-Koordinaten bestimmen und aus diesen Objektposen (Position und Orientierung) ableiten. Bei der Bestimmung der 3D-Koordinaten müssen die Marken in beiden Kameras gleichzeitig gemessen werden können. Ist eine Bildmessung nur in einer Kamera möglich, werden diese Informationen verworfen und stehen somit nicht zur Bestimmung der Objektpose zur Verfügung. Bei den zu untersuchenden Objekten entsteht dadurch ein sehr hoher Verlust an Bildmessungen, der zu einer erheblichen Senkung des erreichbaren Genauigkeitsniveaus führen würde. Aus diesem Grunde bieten sich für die

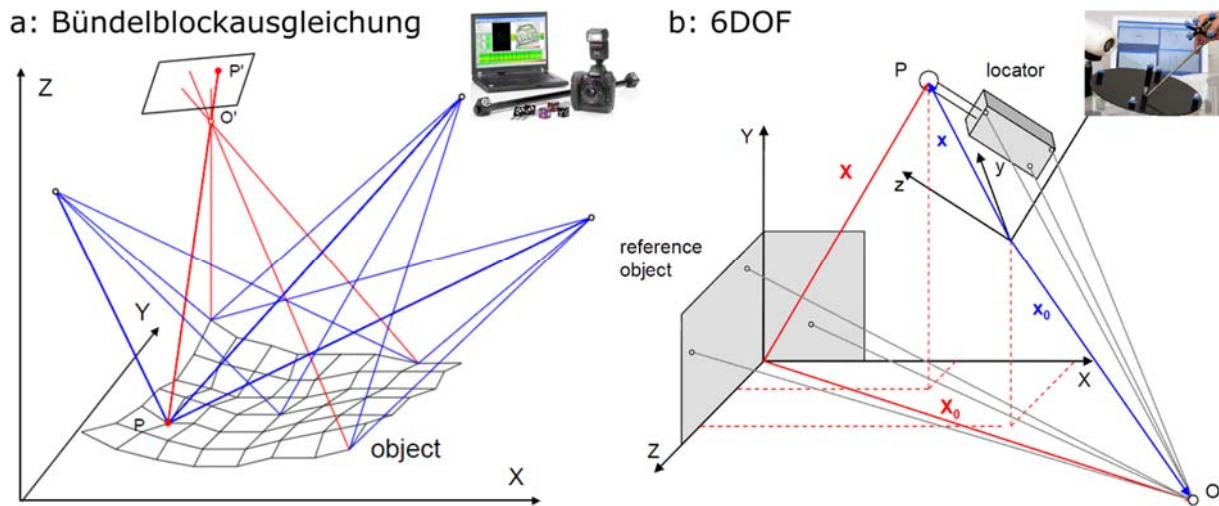


Abbildung 5: Bündelblockausgleich und 6 DOF [Luh10]

Analyse und Bewertung des Beispielprozesses die Methoden des 6 DoF und der Bündelblockausgleichung an (Abbildung 5).

Die Bündelblockausgleichung ermittelt im Vorfeld aus einer ausreichend hohen Anzahl von Bildern (Bildsatz) einer handgeführten Kamera aus den Bildkoordinaten der Markenmittelpunkte die zugeordneten 3D-Koordinaten im Objektraum. Daraus lassen sich die Markenanordnungen der zu vermessenden Objekte charakterisieren. Das 6 DoF-Verfahren bestimmt dann während der Bewegungsmessung der Pose der bereits charakterisierten Objekte relativ zueinander. Mit diesem Vorgehen kann prinzipbedingt entstehende Informationsverlust bei der Stereobildauswertung vermieden und ein hohes Genauigkeitsniveau sichergestellt werden.

Da bei photogrammetrischen Messungen in der Regel eine hohe Anzahl von Bildmessungen zur Verfügung stehen, aus denen wenige gesuchte Größen ermittelt werden müssen, können statistische Kenngrößen bei der Berechnung ermittelt werden. Dabei werden die Unsicherheit der Gesamtmessung (σ_0) sowie Unsicherheit der ermittelten Größen (beispielsweise für die Pose des Arbeitsorganes σ_x , σ_y , σ_z , σ_u , σ_v , σ_w) bestimmt. Diese Unsicherheiten sind dabei „interne“ Unsicherheitskenngrößen und zeigen in welcher Güte die Zielgrößen aus den Eingangsinformationen bestimmbar sind. Eine direkte Übertragung der internen Unsicherheiten in Genauigkeitskenngrößen ist zwar nicht möglich, jedoch liefern sie starke Hinweise auf die externe (äußere) Unsicherheit [Luh10].

3 Zielstellung

Das Ziel der vorgestellten Arbeiten war es, die schnell laufenden Prozesse an Verarbeitungsmaschinen mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung (75...100 Hz) und geometrischen

Genauigkeit ($100\ \mu\text{m}$ und 0.1°) und Auflösung ($<10\ \mu\text{m}$) vermessen zu können. Die aufgenommenen Daten sollen für einen Soll-Ist-Vergleich im Rahmen der Optimierung des Bewegungsdesigns verwendet werden, weshalb gleichzeitig die Soll- und Ist-Bahnen aus der Steuerung erfasst und mit der Bildaufnahme zusammengeführt werden müssen.

Auf Grund der hohen Anzahl der Messungen für die Bahnoptimierung soll mit einem möglichst geringen Aufwand bei der Messwertaufnahme und der Auswertung die genannte Genauigkeit erreicht werden.

4 Lösungsansatz

Der Lösungsansatz gliedert sich in die Ermittlung von 3D-Koordinaten der Marken an den Objekte, die anschließende Bewegungsmessung als 6 DoF-Posemessung und die Zusammenführung von Posemessung und steuerungsinternen Kenngrößen. In den folgenden Abschnitten werden, ausgehend von der Beschreibung des verwendeten Messaufbaus, die verwendete photogrammetrische Auswertesoftware und die eingesetzten Methoden beschrieben.

4.1 Messaufbau

Zur Vermessung des bereits beschriebenen Transportprozesses wurde der in Abbildung 6 dargestellte, photogrammetrische Messaufbau verwendet. Zwei auf einem CFK-Kameraträger angebrachte Hochgeschwindigkeits-Kameras (Vieworks-3MC) sind dabei auf den Verarbeitungsprozess ausgerichtet und beobachten diesen. Diese sogenannte Szene ist ausreichend stark beleuchtet, um einen guten Bildkontrast zu realisieren. Zum Auslösen der Bildmessung sind die Kameras über einen sehr schnellen Trigger (Beckhoff, EL2252) in den Antriebsbus der Steuerung angebunden. Die Speicherung und Auswertung der getriggerten Bilder erfolgt in einem separaten Auswerterechner.

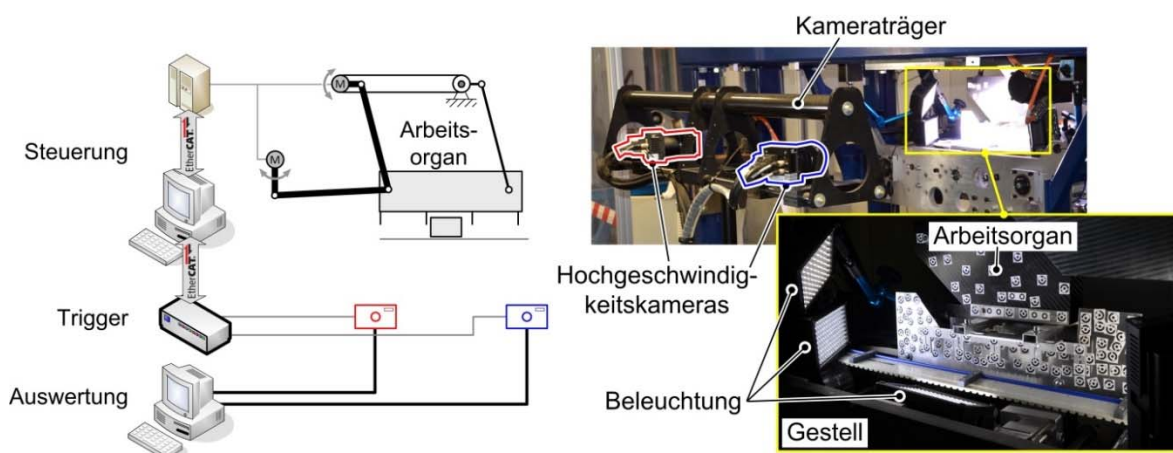


Abbildung 6: Messaufbau, links Skizze, rechts Foto

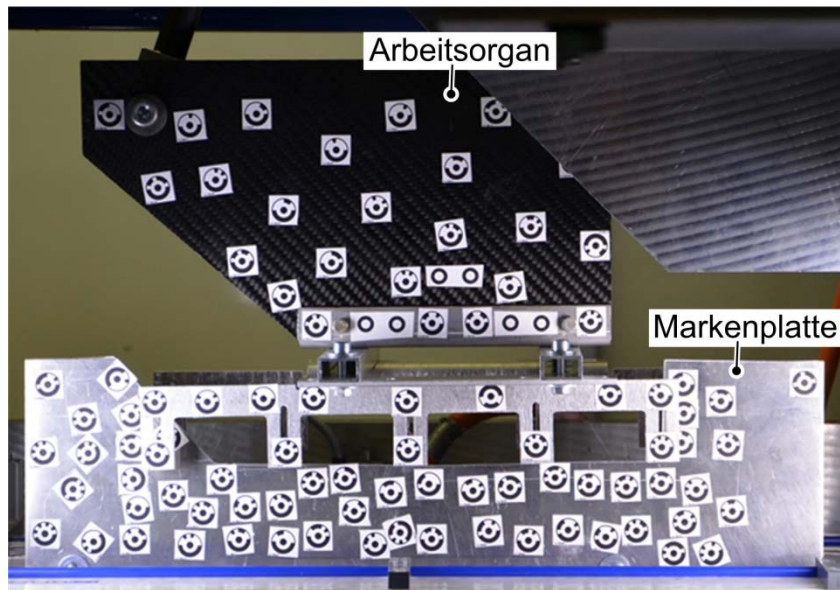


Abbildung 7: Signalisierung der Markenplatte und des Arbeitsorgans

Zur Signalisierung werden das Arbeitsorgan und der Riegel direkt mit Marken versehen, zur Signalisierung des Gestells eine eigene zusätzliche mit dem Gestell verschraubte Markenplatte (Referenzplatte) verwendet, Abbildung 7. Mit diesem Messaufbau kann sichergestellt werden, dass neben der tatsächlichen Arbeitsorganbewegung an der Wirkstelle auch Schwingungen des Gestells erfasst werden kann.

4.2 Auswertesoftware

Zur Bildmessung und Objektrekonstruktion wurde eine am IWM entwickelte Software verwendet. Deren Kernstück ist die softwareseitige Unterstützung zur Erstellung nutzer-spezifischer Modelle zur Objektrekonstruktion. Sie stellt einen „photogrammetrischen Modellbaukasten“ zur Verfügung und ermöglicht somit die Verwendung unterschiedlicher Auswertemethoden und die effiziente Erstellung unterschiedlicher Modelle. Dies ermöglicht die Definition der zur Objektrekonstruktion benötigten Methoden Bündelblockausgleichung und 6 DoF aus vorkonfigurierten Modellobjekten.

Als Basisobjekte des Modellbaukastens stehen photogrammetrische Elemente (Kamera und Marken) sowie allgemeine und kinematische Transformationselemente zur Verfügung, Abbildung 8, links (vgl. [GKR12]). Mit den allgemeinen Transformationselementen können räumliche Transformationen mit einzeln steuer- und ausgleichbaren Freiheitsgraden beschrieben werden, was beispielsweise für das Welt- und Arbeitsorgan-Koordinatensystem notwendig ist. Den Transformationselementen werden die 3D-Koordinaten der Messmarken und ggf. von Kameras zugeordnet. Dadurch ist bekannt, wie Marken und Kameras zueinander ausgerichtet sind. Prinzipiell können auch Messergebnisse weitere

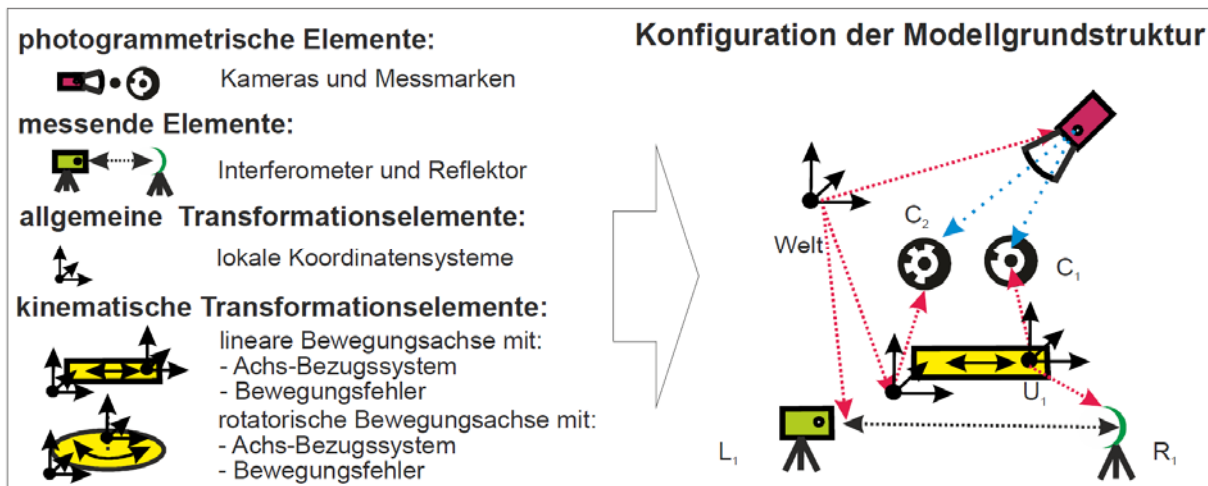


Abbildung 8: modellbasierte Photogrammetrie, Modellbaukasten und Modell [GKR12]

Messsysteme, beispielsweise Laserinterferometer, zu einer Gesamtmessung zusammengeführt werden, was hier jedoch nicht notwendig ist.

4.3 Bündelblockausgleichung zur Bestimmung der 3D-Objektkoordinaten

Zur Bestimmung der 3D-Objektkoordinaten von Referenzplatte und dem Arbeitsorgan wurde eine ausreichend hohe Anzahl an Bildern aus möglichst vielen unterschiedlichen Blickrichtungen aufgenommen. Hierfür wurden mit einer handgeführten digitalen Spiegelreflexkamera (Canon EOS 5dsr) insgesamt 17 Bildern aufgenommen. Aus diesem Bildsatz können mit Hilfe der Bündelblockausgleichung die 3D-Koordinaten der Marken auf den Objekten bestimmt werden. Daraus leiten sich die Koordinatensysteme der Objekte für die 6 DoF-Posemessung ab. Bei der Bündelblockausgleichung wird gleichzeitig zur Bestimmung der 3D-Koordinaten eine Kamerakalibrierung durchgeführt, was ein hohes Genauigkeitsniveau sicherstellt.

Die Unsicherheiten der ermittelten 3D-Koordinaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Sie liegen bei der Gestell-Referenz in Z-Richtung etwas höher als in den anderen Koordinaten-

Tabelle 1: Unsicherheiten der ermittelten 3D-Koordinaten der Objekte

Objekt	Markenanzahl	Mittlere Unsicherheit		
Gestell-Referenz	96	$\sigma_x = 5 \mu\text{m}$	$\sigma_y = 5 \mu\text{m}$	$\sigma_z = 10 \mu\text{m}$
Arbeitsorgan	53	$\sigma_x = 5 \mu\text{m}$	$\sigma_y = 5 \mu\text{m}$	$\sigma_z = 5 \mu\text{m}$

richtungen, was auf die teilweise Verdeckung durch das Arbeitsorgan zurückgeführt werden kann. Das Gesamtniveau von unter $10\ \mu\text{m}$ ist jedoch für die hier genannte Messaufgabe vollkommen ausreichend.

4.4 6 DoF-Messung zur Bestimmung der Pose

Da bei der 6 DoF-Posemessung kommen die High-Speed-Kameras zum Einsatz, welche zur Minimierung des Aufwandes für den Anwender noch nicht kalibriert sind. Mit einer Kalibrierung der Kameras im Vorfeld werden Objektiv, Blende und Fokusslage fest eingestellt und können, ohne Verlust der Kalibrierung, nicht verändert werden. An der Maschine ist es jedoch notwendig das photogrammetrische System sehr einfach und schnell an die Umgebungsbedingungen anzupassen, d.h. Änderungen an Kamera und Objektiv um beispielsweise Blickfeld oder Fokusslage einzustellen. Um die Kalibrierung mit geringem Aufwand herstellen zu können wird eine eingeschränkte Kamerakalibrierung während der Posemessung (Simultankalibrierung) verwendet. Diese erreicht zwar nicht das maximal erreichbare Genauigkeitsniveau aber ermöglicht eine Reduktion der notwendigen Arbeitsschritte und erreicht damit eine Zeitersparnis. Notwendig für die eingeschränkte Kamerakalibrierung ist dabei eine vollständige Abdeckung des Blickfeldes durch Objekte mit bekannten 3D-Koordinaten, was mit einfachen Mitteln realisierbar ist.

Zur 6 DoF-Posemessung werden die Bilder aller Kameras einer Bewegungssequenz zu einer Gesamtmessung zusammengeführt. Bei dieser Messung wird zu jedem Ausnahmezeitpunkt die Pose des Arbeitsorganes relativ zum Referenzobjekt sowie über alle Aufnahmezeitpunkte hinweg werden gleichzeitig die Kalibrierungen der Kameras bestimmt. Da diese Vorgehensweise derzeit nicht von kommerzieller Software unterstützt wird, kam an diese Stelle die selbst entwickelte Software zur Anwendung.

5 Messergebnisse

Aus allen durchgeführten Messungen wurden bewusst Fälle ausgewählt mit denen die Potenziale des Messsystems zur Analyse von Kinematik und Prozess demonstriert werden können. Diese beziehen sich auf einen Zwischenstand des mechanischen Aufbaues der Transportkinematik, die mit Hilfe der Messergebnisse analysiert und verbessert werden konnte. Da die Verbesserungen sehr erfolgreich waren [TSM⁺18a, TSM⁺18b]), wurde nicht die optimierte Kinematik zur Demonstration der Fähigkeiten des Messsystems genutzt.

Zur Beurteilung des Messsystems werden als Kenngrößen die Unsicherheiten der Messungen beurteilt. Beispielhaft werden dabei unterschiedliche Konfigurationen zur photogrammetrischen Posemessung sowie die Streuung von Wiederholungsmessungen an unterschiedlichen Bewegungen des Arbeitsorgans vorgestellt. Die Beurteilung der Kinematik

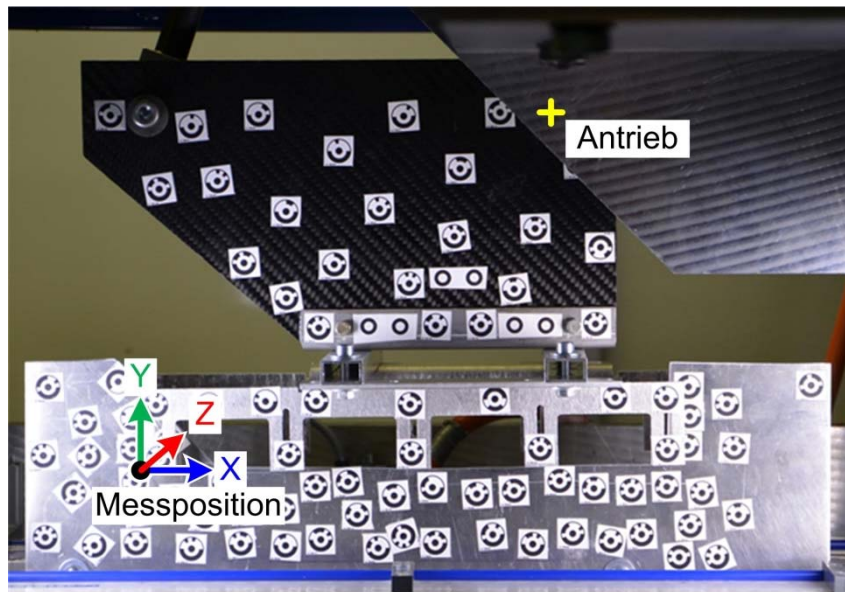


Abbildung 9: Messposition am Arbeitsorgan

erfolgt anhand zweier Bewegungsvarianten (H = horizontale geradlinige Bewegung, V = vertikale geradlinige Bewegung). Zur Beurteilung der Prozessgüte wurden zwei Prozessvarianten gewählt (K = kontinuierlich, S = stop and go). Alle Messungen wurden quasistatisch mit einer Taktrate von 0.1 Takten pro Sekunde (= 0.1 Hz) über zwei Bewegungen sowie bei 6.0 Takten pro Sekunde (= 6 Hz) über 13 Bewegungen durchgeführt.

Zur Auswertung wurde das Koordinatensystem an die untere, linke Ecke des Arbeitsorgans gelegt, Abbildung 9. Diese Position liegt weit entfernt vom Punkt der Anbindung der angetriebenen Delta-Kinematik entfernt. Vor allem Winkelfehler aus der Parallelführung übersetzen sich, Aufgrund des großen Abstandes zu den Gelenkpunkten, stark. Diese Position ist jedoch zur Beurteilung der Bewegungsgüte aus Sicht des Riegels ideal.

5.1 Genauigkeitspotenzial der Messungen

Die einfachste Beurteilung einer photogrammetrischen Messung kann durch eine Analyse der Unsicherheit der Ausgleichung (σ_0) erfolgen. Diese ist bei der verwendeten Software in Pixel angegeben und muss über die Ortsauflösung umgerechnet werden. Bei der Auflösung der verwendeten Bilder von 1696 x 1000 Pixel und einem sichtbaren Bereich des Messobjektes von ca. 350 mm beträgt die Ortsauflösung ca. 0.2 mm/Pixel. Bei den quasistatischen Messungen konnte eine mittlere Unsicherheit von unter 0.05 Pixeln bzw. ca. 10 μm am Objekt (Tabelle 2) erreicht werden. Bei der dynamischen Messung ist die Unsicherheit insgesamt leicht höher. Die maximalen Abweichungen aller Bildmessungen (D_{max}) überschreiten dabei 0.5 Pixel nicht, was am Objekt 0.1 Pixel entspricht. Die maximalen Abweichungen werden dabei durch Abschattungseffekte des Arbeitsorgans vor der Referenz

Tabelle 2: Unsicherheiten der Berechnungen

	Quasistatisch (0.1Hz), 2 Bewegungen			Dynamisch (6.0Hz), 13 Bewegungen		
	Messungen n	σ_0 [Pixel]	D_{max} [Pixel]	Messungen n	σ_0 [Pixel]	D_{max} [Pixel]
K	34067	0.031	0.322	215015	0.086	0.558
S	34028	0.034	0.418	214767	0.143	0.706
H	30606	0.036	0.442	192837	0.054	0.488
V	33934	0.030	0.372	214028	0.072	0.548

verursacht und sind prinzipbedingt nicht vermeidbar. Die Größenordnung dieser Effekte ist jedoch hinreichend klein.

Bei der S-Messung (stop and go) zeigen sich erhöhte Unsicherheiten (Tabelle 2), was auf hochfrequente Kraftspitzen und daraus resultierenden Schwingungen zurückgeführt werden kann. Diese bewirken eine Bewegungsunschärfe der Marken im Bild, was jedoch durch eine kürzere Belichtungszeit ausgeglichen werden könnte. Die maximalen Abweichungen aller Bildmessungen (D_{max}) sind von unter 0.7 Pixel nur unwesentlich höher. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Objektrekonstruktion sicher in einem Bereich deutlich unterhalb der nominellen Kameraauflösung durchgeführt werden kann. Insgesamt wurde eine Sub-Pixelauflösung im Bild von ca. 0.05 Pixeln erreicht, was einer Auflösung am Objekt von ca 10 μm entspricht.

Zur Bestimmung des Genauigkeitsgewinns durch die Verwendung von zwei Kameras zur Posemessung wurde für einen Bildsatz (H) die Pose des Arbeitsorgans aus jeweils einer Kamera und der Kombination beider Kameras bestimmt. Zum Vergleich werden die

Tabelle 3: Unsicherheiten der ermittelten Pose des Arbeitsorgans

	Kamera B001	Kamera B002	Kameras B001 und B002
σ_x [μm]	9.1	8.5	0.3
σ_y [μm]	1.0	1.2	0.5
σ_z [μm]	189.7	119.3	7.6
σ_u [$^\circ$]	0.0151	0.0165	0.0073
σ_v [$^\circ$]	0.0074	0.0086	0.0013
σ_w [$^\circ$]	0.0002	0.0002	0.0001

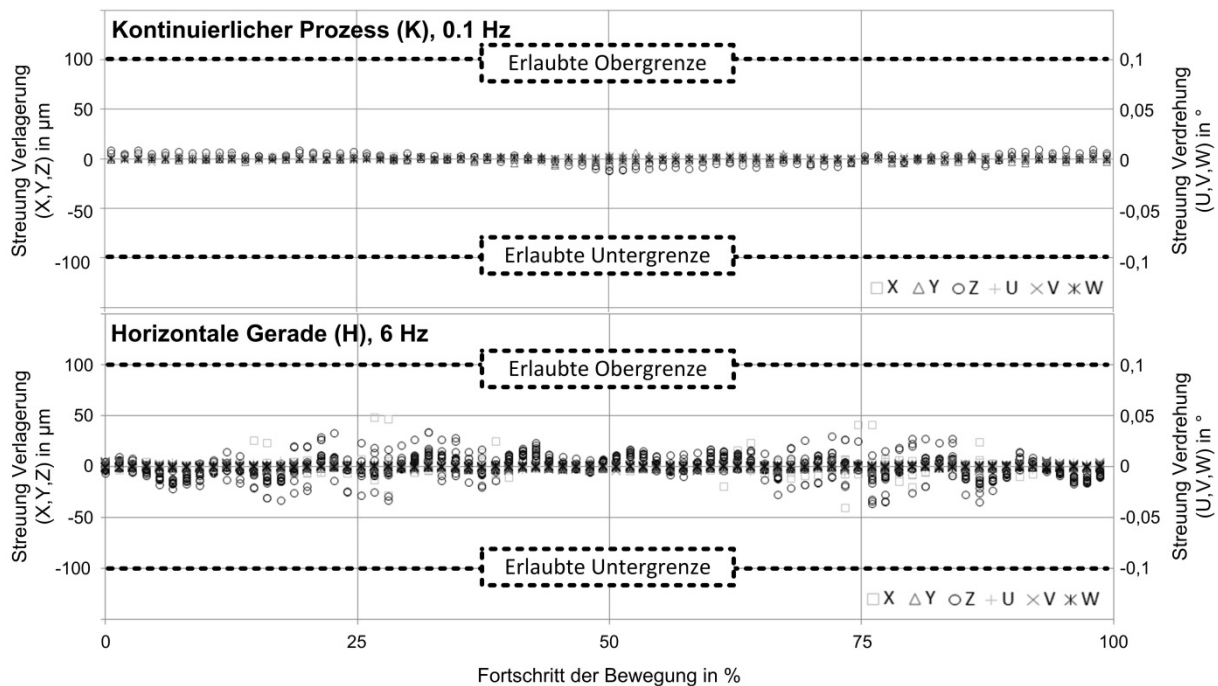


Abbildung 10: Streuung von Wiederholmessungen

Unsicherheiten der Arbeitsorgan-Pose betrachtet (Tabelle 3). Während bei Verwendung einer Kamera die Unsicherheit in Z-Richtung (σ_z) deutlich über der geforderten Genauigkeit liegen, kann davon ausgegangen werden dass die Ergebnisse die Anforderungen nicht erfüllen. Durch die Verwendung beider Kameras sinkt die Unsicherheit deutlich, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Genauigkeit auch erreicht wird.

Da die Unsicherheit von einzelnen Messungen noch keinen Aufschluss über die Wiederholbarkeit ermöglicht wurden Wiederholungsversuche unter gleichen Randbedingungen durchgeführt. Beispielhaft werden der quasistatische, kontinuierliche Prozess sowie die dynamische, horizontale Bewegung dargestellt, Abbildung 10. Dabei zeigt sich eine Wiederholbarkeit der Lage von deutlich unter 100 µm sowie der Orientierung von unter 0.01 °. Diese Analyse zeigt, dass mit dem Messsystem die gestellten Anforderungen hinsichtlich Auflösung und Genauigkeit erreicht werden.

5.2 Analyse der Kinematik

Zur Analyse der Kinematik wurden die horizontale und die vertikale geradlinige Bewegung (H und V) mit jeweils 0.1 Hz und 6 Hz gefahren und vermessen. Die Messergebnisse sind für jeweils zwei Messungen (Photogrammetrie und Steuerung) in Abbildung 11 dargestellt. Bei den photogrammetrischen Messergebnissen ist die gemessene, reale Bewegung des Arbeitsorgans dargestellt, die steuerungsinternen Messergebnisse zeigen die Arbeitsorganposition, die aus den in das kartesische Koordinatensystem transformierten Antriebsst-

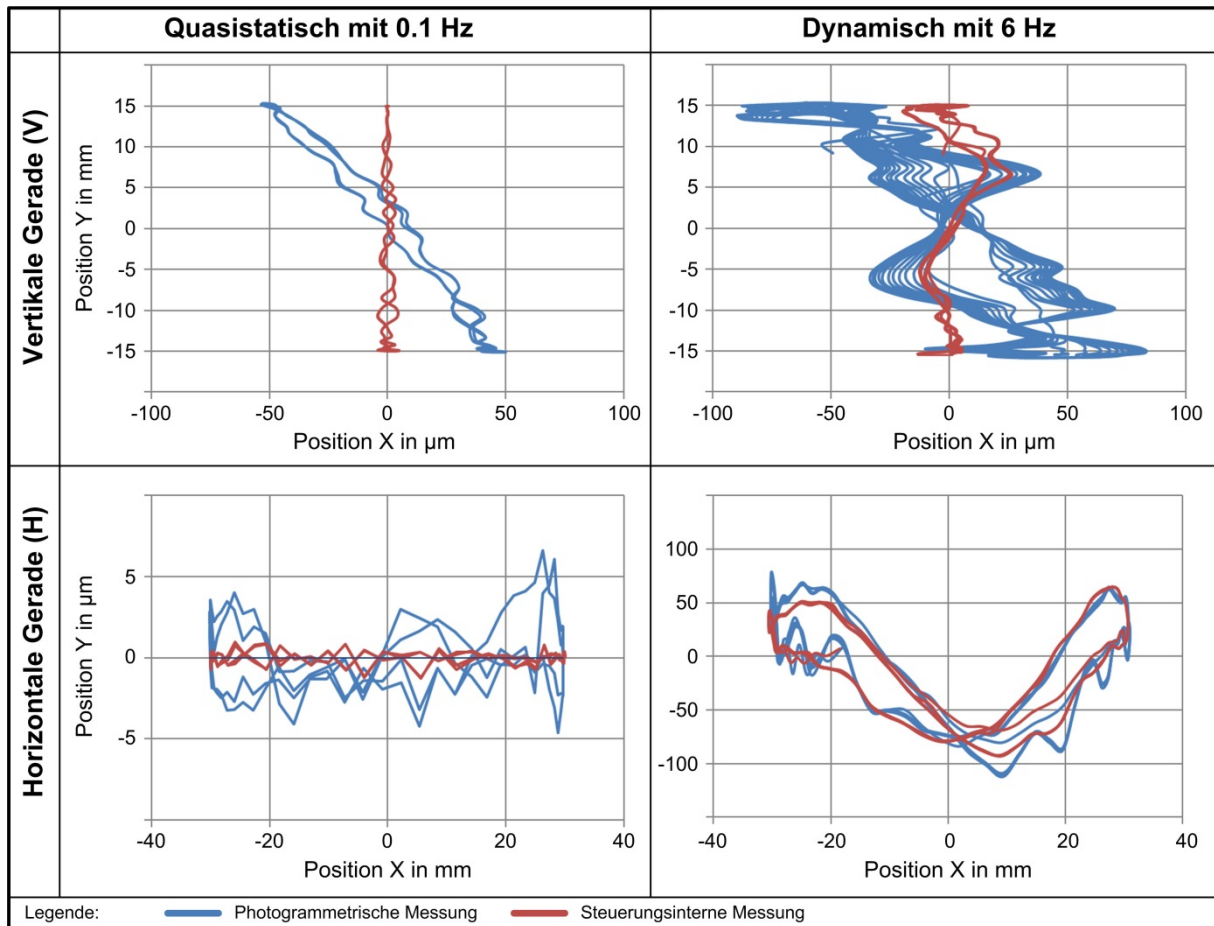


Abbildung 11: Positionen bei quasistatischer und dynamischer Bewegung des Arbeitsorgans in horizontaler und vertikaler Richtung

werten resultiert. Die Messungen der quasistatischen Bewegung soll dazu genutzt werden, die Kinematik ohne dynamische Effekte zu analysieren. Bei idealem Verhalten der Mechanik dürfte keine Bewegung in X bei der vertikalen und keine in Y bei der horizontalen geradlinigen Bewegung gemessen werden. Da beim vorgestellten Messsystem die 6 DoF-Auswertung verwendet wird, können (anders als bei Anwendung der ebenen Bewegungsmessung) zusätzlich die Verlagerungen gemessen werden, die so nicht offensichtlich sichtbar sind. Dabei handelt es sich um die Bewegung in Z-Richtung („aus dem Bild heraus“) sowie die Neigung um die X-Richtung (U) und Y-Richtung (V). Diese werden im Anschluss diskutiert.

Rechtwinkeligkeit der Bewegungsachsen

Deutlich zu erkennen ist, dass die Bewegungsachsen der Arbeitsorganbewegung nicht senkrecht aufeinander stehen, die gemessene Abweichung beträgt 0.18° bzw. 3.2 mm/m . Die Ursache für diesen Fehler deutet entweder auf Fertigungs- oder Montagefehler der Kinematik, oder aber ein nicht ausreichend genau parametrisiertes Modell der Kinematik hin.

Abhilfe könne eine Kalibrierung des kinematischen Modells, d.h. eine Anpassung der nominalen Lage der Gelenkpunkte und Längen des Koppelgetriebes, schaffen.

Hysterese

Im Gegensatz zur horizontalen ist bei der vertikalen geradlinigen Bewegung eine Hysterese im Bereich von bis zu 10-20 μm zu erkennen. Sie erhöht sich bei der dynamischen Bewegung auf max. 100 μm . Auch die horizontale Bewegung zeigt unter dynamischer Belastung eine Hysterese von ca. 50 μm . Während in der horizontalen Richtung die Hysterese eindeutig dem Antriebsverhalten zuzuordnen ist, sind die Hauptanteile in der Vertikalen der Mechanik anzulasten, da sie sich nicht in den Steuerungsmesswerten widerspiegeln. Nach einer Analyse der mechanischen Struktur der Antriebskinematik wurde darauf geschlossen, dass die Steifigkeit des eingesetzten Riementriebs im dynamischen Fall nicht ausreichend hoch ist und so eine Parallelführung des Arbeitsorganes nicht gewährleistet ist. Dem entsprechend konnte der mechanische Aufbau des Koppelgetriebes, auf Basis dieser Bewegungsanalyse, deutlich verbessert werden.

Verzerrte Bewegung

Bei der dynamischen Fahrt in horizontaler Richtung ist eine Durchbiegung der Bahn in Y-Richtung zwischen den Rändern und der Mitte in einer Größenordnung von etwa 120 μm erkennbar. Da es keine gravierenden Unterschiede zwischen photogrammetrischer- und steuerungsinterner Messung gibt, ist dieser Effekt den Antrieben zuzuordnen. Hier könnte durch Nutzung besserer Vorsteuerwerte die Bewegungsgenauigkeit erhöht werden. Dabei zeigt sich der Informationsgewinn durch das Zusammenführen von steuerungsinternen und externer Bewegungsanalyse deutlich.

Bewegung in Z

Abbildung 12 zeigt die Z-Bewegung sowie die Drehungen um X und Y während der quasistatischen Bewegung des Arbeitsorganes in horizontaler und vertikaler Richtung. Deutlich ist eine starke Änderung in Z-Richtung von der Größenordnung 0.6 mm / 30 mm in Y-Richtung sowie um 0.5 mm / 60 mm in X erkennbar, die sich mit der Schiefstellung des Arbeitsorganes zur Referenzplatte begründen lässt. Eine Schiefstellung dieser Größenordnung wäre bei Anwendung z. B. einer ebenen Bildauswertung problematisch. Da im Messsystem jedoch die 6 DoF-Messung verwendet wurde, ist dieser Effekt im Modell berücksichtigt und damit unkritisch. Dies wiederum hat zur Folge, dass die Einrichtung des Messaufbaues mit dem vorgestellten Messsystem vereinfacht wird, was der Zielstellung entspricht.

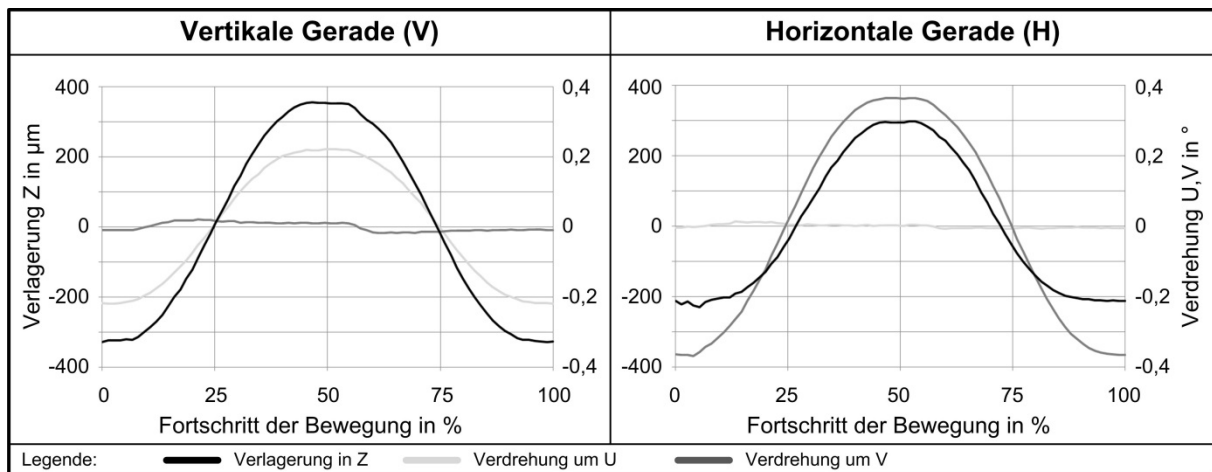


Abbildung 12: Bewegungen in Z sowie Drehung im X-Richtung (U) und Y-Richtung (Y) für quasistatische Bewegungen (V und H)

Verdrehung des Arbeitsorgans

In der Messung ist weiterhin eine Neigungsänderung um die X-Achse (U) beim Verfahren in vertikaler Bewegung sowie eine Neigungsänderung um die Y-Achse (V) bei der horizontalen Bewegung sichtbar. Das Ergebnis ist ebenfalls bei der Vermessung des Prozesses sichtbar, Abbildung 13. Diese deuten darauf hin, dass es sich bei der Kinematik – anders als idealisiert angenommen – nicht um eine ebene Kinematik, sondern um eine Räumliche handelt. Es wird vermutet, dass die bei der idealisierten Kinematik als parallel angenommene Achsen der Struktur in der Realität windschief zueinander sind.

Bei genauer Betrachtung ist zu erkennen, dass beim Fahren in der Vertikalen in V sowie bei der Horizontalen in U ein Sprung auftritt, Abbildung 12. Der Sprung findet in dem Moment statt, wenn die Bewegungsrichtung umkehrt und die wirkenden Kräfte ihre Richtung ändert. Daraus ist ersichtlich, dass in der realen Kinematik die Gelenke spielbehaftet sind.

5.3 Analyse der Prozesse

Abbildung 13 zeigt die Messergebnisse eines repräsentativen Prozessverlaufes im eingeschwungenen Zustand, ähnlich wie er bei der Bewegungsoptimierung in [TSM⁺18a, TSM⁺18b] generiert wird. Die Prozesse unterscheiden sich darin, dass Messung K (Abbildung 13, oben) einen kontinuierlichen Bewegungsverlauf besitzt, während in Messung S (Abbildung 13, unten) zwei Rastpositionen vorliegen.

Die Messergebnisse aus Abbildung 12 werden hier bestätigt. Die Schiefstellungen des Arbeitsorgans zur Referenzplatte überlagern sich. Auch die Neigungsänderung des Arbeitsorgans ist, in überlagerter Form, wiederzufinden.

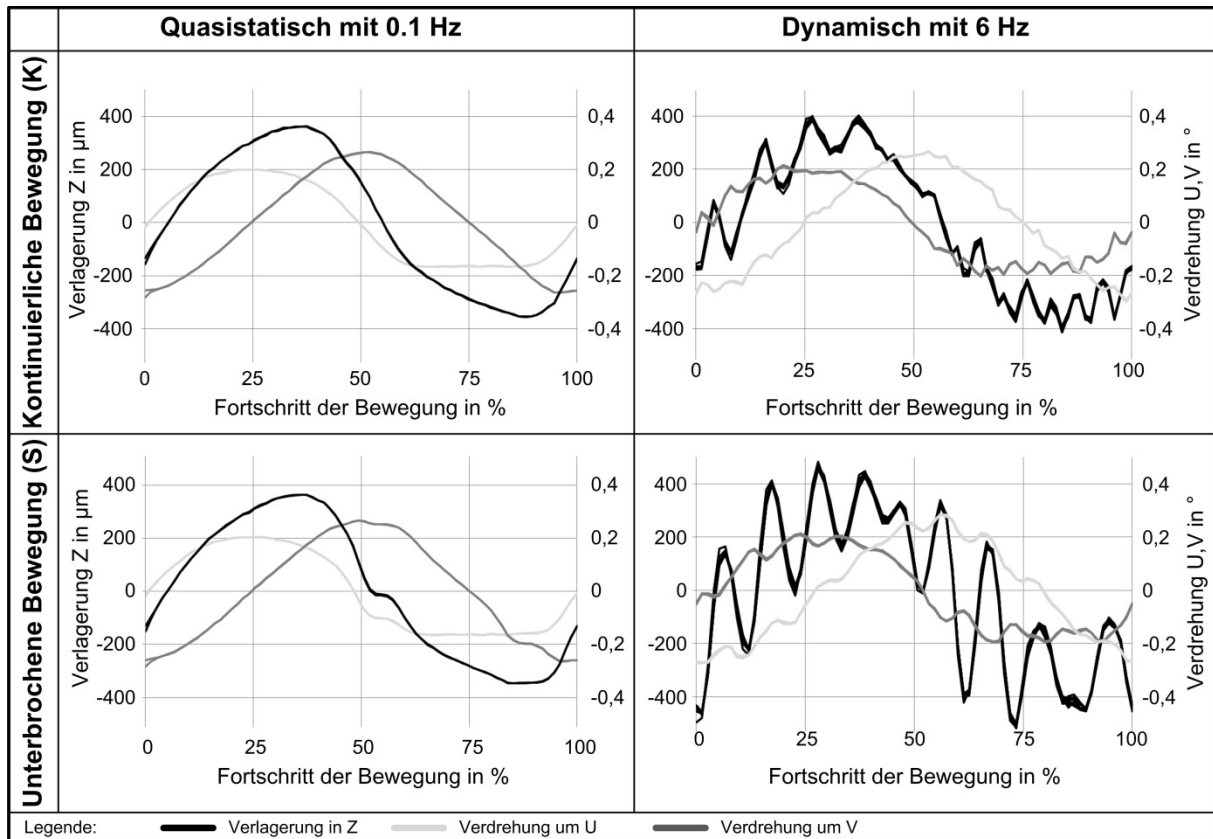


Abbildung 13: Verlagerung in Z und Verdrehung um U und V in der Bewegung

Schwingungen in Z-Richtung

Bei der dynamischen Ausführung der Bewegung mit 6 Hz sind deutliche Schwingungen, vor allem in der Z-Richtung (auf die Kamera zu) erkennbar. Diese rühren daher, dass die angetriebenen Achsen am Versuchsstand außermittig gelagert sind und sich durch die zyklische Anregung bewegen. Die lange Übersetzung zwischen Achsen und Arbeitsorgan (ca. 400 mm) verstärkt den Effekt und verursacht Amplituden von bis zu $\pm 100 \mu\text{m}$.

Schwingungen um X- und Y-Richtung

Im Falle der Messung S, welche den optimierten Prozessen am nächsten kommt, kommen deutliche Schwingungen um die X-Richtung (U) und die Y-Richtung (V) hinzu. Diese deuten wiederum auf Schwachstellen der Konstruktion auf. Eine Versteifung der bewegten Teile in genau diesen Richtungen könnte Abhilfe schaffen.

6 Zusammenfassung

In der Arbeit wurde ein neuartiges, photogrammetrisches System zur berührungslosen Vermessung von Komponenten an schnelllaufenden Verarbeitungsmaschinen mit einer geringen Messunsicherheit von deutlich unter $10 \mu\text{m}$ vorgestellt. Anders als heute üblich

erfolgt eine Zusammenführung von steuerungsinternen Daten (z. B. Antriebs-Istwerte, Motor-momente) und der Bewegungsmessung der realen Struktur. Dies führt zu einer deutlichen Steigerung des Informationsgehaltes und eröffnet neue Möglichkeiten zur Analyse und Optimierung von Verarbeitungsmaschinen. In der beispielhaften Analyse des Demonstrators aus dem DFG-Projekt „Modellbasierte Bahnplanung“ konnten Schwachstellen in der Mechanik und den Antrieben aufgezeigt und im weiteren Verlauf des Projektes beseitigt werden.

7 Literatur

- [Aic18] Fa. Aicon: <http://www.aicon3d.com/de-DE/products/vehicle-testing/wheelwatch>, Stand: 19.01.2018
- [GD14] Godding, Robert; Dose, Wibke: High-Speed-Bildverarbeitung für sicherere Fahrzeuge. In: Optik & Photonik Bd. 9 (2014), Nr. 3, S. 40–42
- [GHR15] Großmann, K.; Holowenko, O.; Riedel, M.: *Photogrammetrische Bahnvermessung an einer schnelllaufenden Verarbeitungsmaschine*. In: Tagungsband der Fachtagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik VVD 2015 - Praxis trifft Wissenschaft, S. 145-158, 2015
- [GKR12] Großmann, K. ; Kauschinger, B. ; Riedel, M. : *Photogrammetrischer Modellbaukasten zur Erfassung von Bewegungsfehlern an Werkzeugmaschinen*. In: Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tag, Wichmann-Verlag Heidelberg, 2012
- [GKR+13] Großmann, K.; Kauschinger, B.; Riedel, M.; Holowenko, O.: Effiziente Abarbeitung hoch dynamischer Bewegungen. Teil 2: Vorteile und Grenzen beim Einsatz taktratenabhängiger Bewegungen an Verarbeitungsmaschinen, ZWF 108 (2013) 9, S. 664-669
- [GKM+14] Großmann, K.; Kauschinger, B.; Merx, M.; Riedel, M.; Galant, A., 2014A. *Effiziente modell- und experimentgestützte Analyse des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen*; in: 2. Wiener Produktionstechnik Kongress 2014 „Industrie 4.0 – die intelligente Fabrik der Zukunft“, Hrsg.: Bleicher und Bleicher, Wien : Klein Publishing GmbH
- [HKI17] Holowenko, O.; Kauschinger, B.; S. Ihlenfeldt: *Increasing the Performance of Processing Machines by Executing Output Rate Dependent Motion Profiles*. International Journal of Automation Technology 11 (2017) 2, S. 165-170

- [Luh10] Luhmann, T: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2010
- [TSM+18a] Troll, C.; Schebitz, B.; Majschak, J.-P.; Döring, M.; Holowenko, O.; Ihlenfeldt, S.: *Commissioning new Applications on Processing Machines. Part I: Process Modelling*. Eingereicht bei Advances in Mechanical Engineering
- [TSM+18b] Troll, C.; Schebitz, B.; Majschak, J.-P.; Döring, M.; Holowenko, O.; Ihlenfeldt, S.: *Commissioning new Applications on Processing Machines. Part II: Implementation*. Eingereicht bei Advances in Mechanical Engineering
- [WWW] TU Dresden, IWM: www.iwm.info/bahnplan, Stand: 15.03.2018