

Untersuchung von Orientierungs- und Matchingverfahren für die hochgenaue 3D-Oberflächenerfassung von Schweißnähten mit einem mobilen Kamerasystem

SIMON NIETIEDT¹, OLIVER KAHMEN¹ & THOMAS LUHMANN¹

Zusammenfassung: Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Masterarbeit vorgestellt, die im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung eines kompakten Prototyps zur hochgenauen 3D-Oberflächenmessung unter Wasser“ durchgeführt wurde. Ziel der Arbeit war es, verschiedene Orientierungs- und Matchingverfahren für die hochgenaue Erfassung von Schweißnähten zu untersuchen. Hierfür werden ausschließlich synthetische Daten verwendet, sodass die Erkenntnisse zusätzlich auf weitere Anwendungen übertragbar sind und der jeweilige Einfluss einzelner Parameter gezielt simuliert werden kann. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen auf, dass die aktuell verwendete Aufnahmekonfiguration modifiziert werden muss, wenn der gesamte Bildverband anhand der untersuchten Orientierungsverfahren mit der erforderlichen Genauigkeit orientiert werden soll. Zudem eignen sich beide der untersuchten Matchingverfahren prinzipiell für die hochgenaue 3D-Oberflächenerfassung, da die erforderliche Rekonstruktionsgüte erreicht wird.

1 Motivation

Das Schweißen hat in den letzten Jahrzehnten durch die ansteigenden technologischen Anforderungen an Bedeutung gewonnen. Besonders im Bereich risikobehafteter Unterwasserbauwerke, wie beispielsweise Pipelines, müssen Schweißnähte hohen Qualitätsanforderungen genügen, die durch aktuelle Prüfverfahren nur schwer zu verifizieren sind. Deshalb steigt nach NEILL (2016) die Nachfrage an objektiven Prüfverfahren, die kleine Defekte zuverlässig aufdecken können. Hierfür haben bereits EKKELE et al. (2015) ein Prüfverfahren entwickelt, das unter Wasser eingesetzt werden kann und die Oberfläche mithilfe einer projizierten Laserlinie erfasst. Zudem wird aktuell am Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik der Jade Hochschule (IAPG) im Rahmen des Projektes „Entwicklung eines kompakten Prototyps zur hochgenauen 3D-Oberflächenmessung unter Wasser“ ein neues Prüfverfahren entwickelt. Das Projekt wird durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert. Das Messkonzept der Neuentwicklung sieht vor, die Schweißnahtoberflächen mithilfe von Matchingverfahren hochgenau zu rekonstruieren. Die praxisnahe Verifizierung des Konzeptes ist jedoch aufgrund der speziellen Umweltbedingungen und den hohen Genauigkeits- und Auflösungsanforderungen von 30 µm derzeit noch nicht realisierbar und mit sehr hohem praktischen Aufwand verbunden. Deshalb wurde in der zugrundeliegenden Masterarbeit ein Konzept erarbeitet, um Orientierungs- und Matchingverfahren anhand von synthetischen Daten möglichst realitätsnah zu untersuchen.

¹ Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Straße 16/19, D-26121 Oldenburg, E-Mail: [simon.nietiedt, oliver.kahmen, thomas.luhmann]@jade-hs.de

2 Konzeption

Das Konzept, welches aktuell am IAPG entwickelt wird, ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Hierbei kann das mobile Kamerasystem mithilfe von Messmarken, die um die Schweißnaht herum angeordnet sind, orientiert werden. Die verwendeten Bilder der einzelnen Kamerapositionen tasten die Oberfläche sequentiell ab, wodurch die gesamte Schweißnaht in überlappenden Bildbereichen vorliegt. Zwei Einzelbilder können als Stereosystem aufgefasst werden, sodass die Rekonstruktion der Schweißnahtoberfläche durch Vorwärtsschnitte erfolgen kann. Die benötigten korrespondierenden Pixel können mit einem Matchingverfahren bestimmt werden.

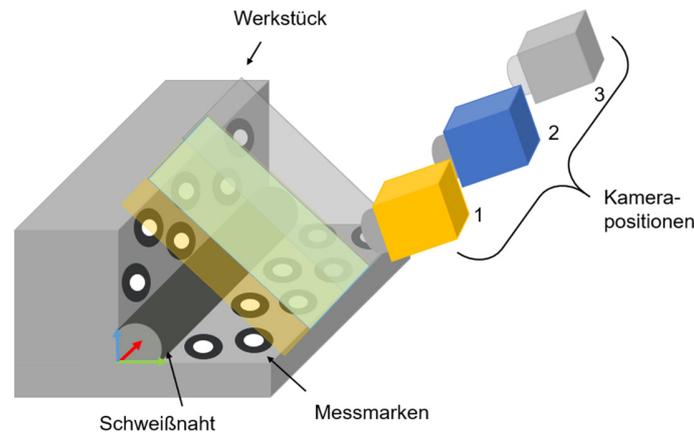


Abb. 1: Schematische Darstellung des Aufnahmekonzeptes für die Erfassung von Schweißnähten

Die Genauigkeit, Vollständigkeit und Auflösung der Rekonstruktion hängt im Wesentlichen von der Aufnahmeconfiguration, den Einflüssen der Umwelt sowie von den verwendeten Orientierungs- und Matchingverfahren ab. In diesem Beitrag wird die Untersuchung der Aufnahmeconfiguration im Zusammenhang mit den Orientierungs- und Matchingverfahren in drei Abschnitte gegliedert.

2.1 Untersuchung der Matchingverfahren

Als Matchingverfahren werden das Semi-Global Matching (SGM) und Least-Squares Matching (LSM) untersucht. Beim LSM handelt es sich um ein Zuordnungsverfahren, welches die optimale Zuordnung über eine nichtlineare Ausgleichung nach kleinsten Quadraten ermittelt. Hierbei wird nach GRÜN (1985) als funktionales Modell eine Affintransformation verwendet, die um zwei radiometrischen Parameter erweitert wurde. Beim SGM nach HIRSCHMÜLLER (2005) wird dagegen folgende Energiefunktion minimiert, welche durch die optimalen Disparitäten D beschrieben wird.

$$E(D) = \sum_p \left(C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \right)$$

Um diese Disparitäten zu berechnen, wird ein beliebiges Ähnlichkeitsmaß $C(p, D_p)$ eingesetzt. Zusätzlich werden die Strafterme P_1 und P_2 verwendet, um den Einfluss der benachbarten Pixel N_p zu steuern.

Für die Untersuchung von Matchingverfahren haben unter anderem SCHARSTEIN & SZELISKI (2002, 2003) und SCHARSTEIN et al. (2014) unterschiedliche Datensätze von verschiedenen Objekten veröffentlicht. Diese Datensätze konnten jedoch nicht im Rahmen dieser Untersuchungen verwendet werden, da die Aufnahmeconfiguration weitestgehend unbekannt ist und die Objektgeometrien nicht mit der gefordertern Genauigkeit und Auflösung vorliegen. Daher wurden zwei synthetische Testfelder in Form eines rotationssymmetrischen Sinusoids entwickelt, die sich durch zehn unterschiedliche Ringe auszeichnen. Während beim ersten Testfeld, welches in Abbildung 2 dargestellt ist, die Höhe der Ringe variiert, unterscheiden sich die Ringe beim zweiten Testfeld durch ihre Breite. Die Wahl der Textur basiert auf einem Texturmerkmal, dass vorab hinsichtlich der Nutzbarkeit zur Beschreibung des Zuordnungsniveaus untersucht wird. Hierfür wird unter anderem das Leistungsspektrum untersucht, dass nach POHLE (2004) feine Strukturen durch hohe Frequenzen beschreibt. Des Weiteren wird der Grauwertgradient analysiert, der nach SCHNEIDER (1991) als Beschreibungsmerkmal des Zuordnungsniveaus verwendet werden kann.

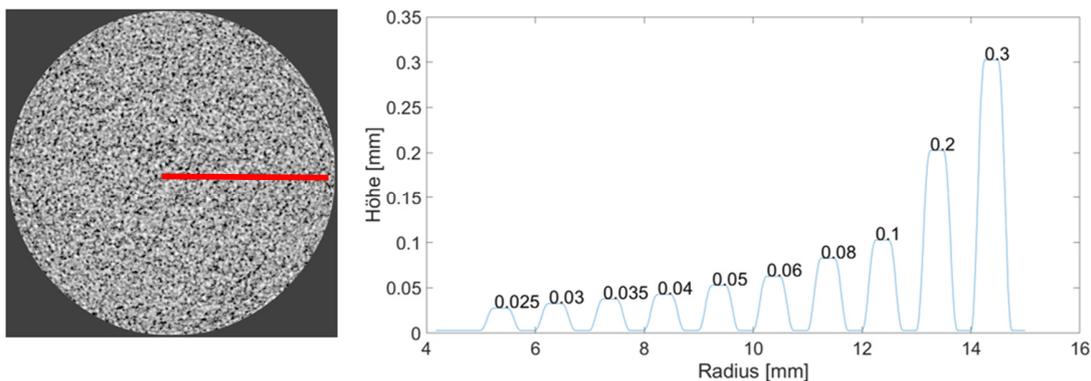


Abb. 2: Testfeld mit vertikaler Variation. Links: Draufsicht mit farblich markiertem Radius. Rechts: Vertikaler Querschnitt des farblich markierten Radius mit den verwendeten Höhen

Das Leistungsspektrum der verwendeten Textur zeichnet sich durch hohe Amplituden von niedrigen und hohen Frequenzen aus, da nach den Erkenntnissen der Voruntersuchungen somit eine hohe Zuordnung erwartet werden kann. Für die Untersuchung zum Einfluss der Fenstergröße (Bereich der Bildinformation) und beim SGM zusätzlich der Strafterme P_1 und P_2 , werden von beiden Testfeldern jeweils zwei fehlerfreie Normalbilder erzeugt, die einen Aufnahmeabstand von 50 mm und eine Basislänge von 20 mm aufweisen. Mithilfe dieser Bilddaten werden anschließend beide Verfahren mit denselben Fenstergrößen und Straftermen angewendet. Die nachfolgende Analyse der ermittelten Disparitäten erfolgt im Objektraum, weshalb die Objektkoordinaten durch Vorwärtsschnitte berechnet werden. Hierfür werden zusätzlich die fehlerfrei vorliegenden Orientierungsparameter des Stereopaars verwendet. Die resultierende Punktwolke, welche somit nur von der Güte des Matchings abhängig ist, wird anhand der fehlerfrei vorliegenden Referenz analysiert und bewertet.

2.2 Untersuchung der Orientierungsverfahren

Die Orientierungsverfahren werden anhand eines synthetischen Testfeldes untersucht, das aus Messmarken unterschiedlicher Höhe besteht. Von dem in Abbildung 3 dargestellten Testfeld werden insgesamt sieben Aufnahmen in Form eines Bildstreifens generiert, die jeweils einen Abstand von 10 mm besitzen. In jedem synthetischen Bild, dessen innere und äußere Orientierung fehlerfrei bekannt ist, liegen mindestens vier fehlerfreie Passpunkte und weitere Verknüpfungspunkte vor, die formatfüllend und nach dem Anwendungsfall (Abbildung 1) angeordnet sind. Diese Bilder werden verwendet, um den Einfluss der inneren Orientierung und der Bildmessgenauigkeit auf die Güte der äußeren Orientierung zu untersuchen. Hierfür wurden vorab für verschiedene Basislängen die zulässigen Abweichungen der äußeren Orientierung ermittelt, bei denen die mittels Vorwärtsschnitt berechneten Koordinaten um maximal 30 µm von den Referenzwerten abweichen.

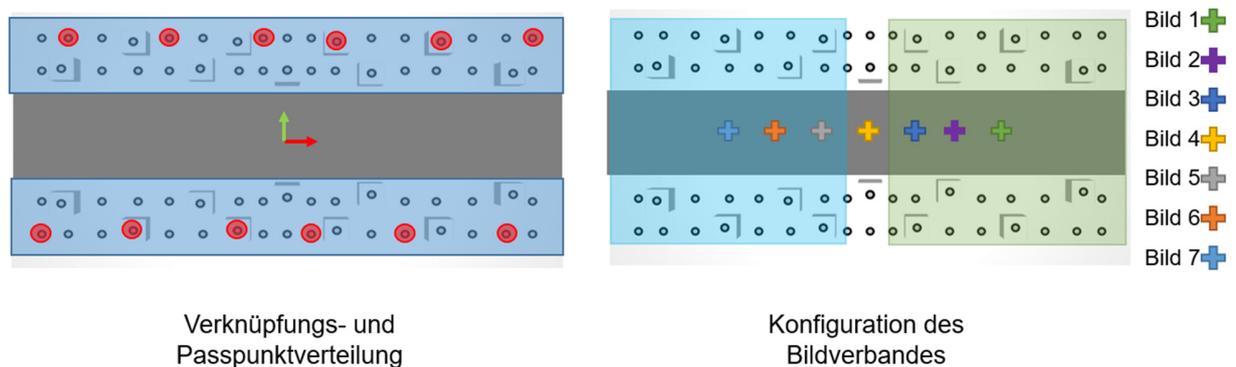


Abb. 3: Testfeld für die Untersuchung der Orientierungsverfahren. Links: Verwendete Passpunkte (rot), Bereich der Verknüpfungspunkte (blau) und der Schweißnaht (grau). Rechts: Abgebildeter Bereich der äußeren Bilder (farbliche Quadrate) und Mittelpunkte der einzelnen Bilder

Im ersten Versuchsblock wird das Genauigkeitsniveau der Orientierungsverfahren *Bündelausgleichung* und *Rückwärtsschnitt* anhand vorgegebener Unsicherheiten der inneren Orientierung und der Bildmessung mithilfe einer Monte-Carlo Simulation (MCS) ermittelt. Diese ist nach HASTEDT (2004) aufgebaut und besteht im Rahmen dieser Arbeit aus 10.000 Simulationsschritten. Die benötigten normalverteilten Unsicherheiten richten sich nach den Ergebnissen einer real durchgeführten Testfeldkalibrierung einer Industriekamera der Firma Basler. Eine solche Kamera ist im realen System verbaut, wodurch die Kalibrierergebnisse als realistische Grundlage für die Untersuchungen dienen.

Um das Genauigkeitsniveau der einzelnen Parameter der inneren Orientierung und der Bildmessung zu ermitteln, werden ebenfalls der simulierte Bildverband und eine MCS verwendet. Hierfür wird bei der Simulation der Orientierungsverfahren jeweils nur ein Parameter modifiziert. Die modifizierte Standardabweichung wird iterativ solange angepasst, bis die vorab ermittelten zulässigen Variationen der resultierenden Abweichungen entsprechen. Die so bestimmten Standardabweichungen spiegeln somit das erforderliche Genauigkeitsniveau der Einflussfaktoren wider.

2.3 Anwendung des Messkonzeptes

Die Untersuchungen werden durch die Anwendung des Auswertekonzeptes abgeschlossen. Hierfür werden beide Orientierungs- und Matchingverfahren miteinander kombiniert und an einer Schweißnaht erprobt, die als CAD-Modell vorliegt. Um die Qualität des Systems realistisch zu quantifizieren, wurde die fehlerfreie innere Orientierung der Kamera im Rahmen der vorgegebenen Standardabweichungen verrauscht. Jedoch kann aufgrund des Leistungsspektrums der zugrundeliegenden Schweißnahtoberfläche erwartet werden, dass die Zuordnungsqualität gering ausfällt, weshalb neben einer realitätsnahen zusätzlich eine optimierte Textur verwendet wird, die in Abbildung 4 zu sehen ist. Diese beruht auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen von den Texturmerkmalen, sodass aufgrund des Leistungsspektrums eine hohe Zuordnungsqualität erwartet werden kann. Die resultierenden Punktwolken werden anschließend mit dem vorliegenden CAD-Modell verglichen und bewertet.

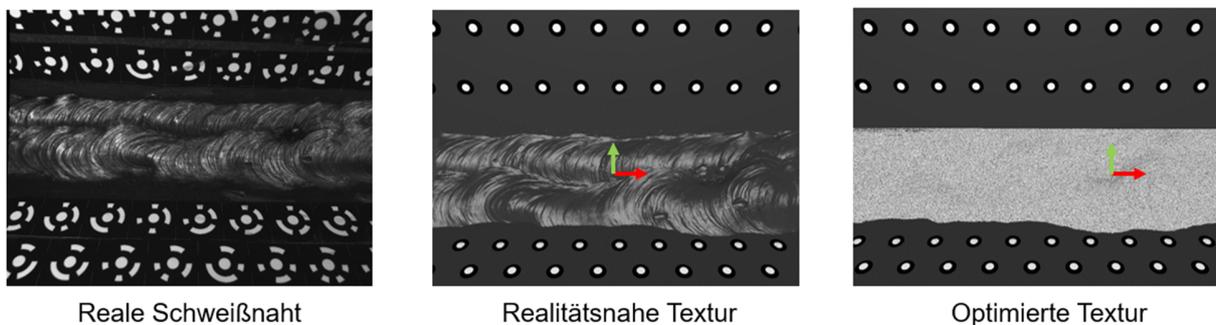


Abb. 4: Texturen einer realen und der synthetischen Schweißnaht

3 Ergebnisse

3.1 Matchingverfahren

Die Untersuchung der Matchingverfahren zeigt, dass mit beiden Methoden ein hohes Rekonstruktionsniveau der Testfelder erreicht werden kann, das allerdings von den Parametereinstellungen abhängig ist. So können horizontale und vertikale Strukturen von bis zu 80 μm mit der geforderten Genauigkeit rekonstruiert werden.

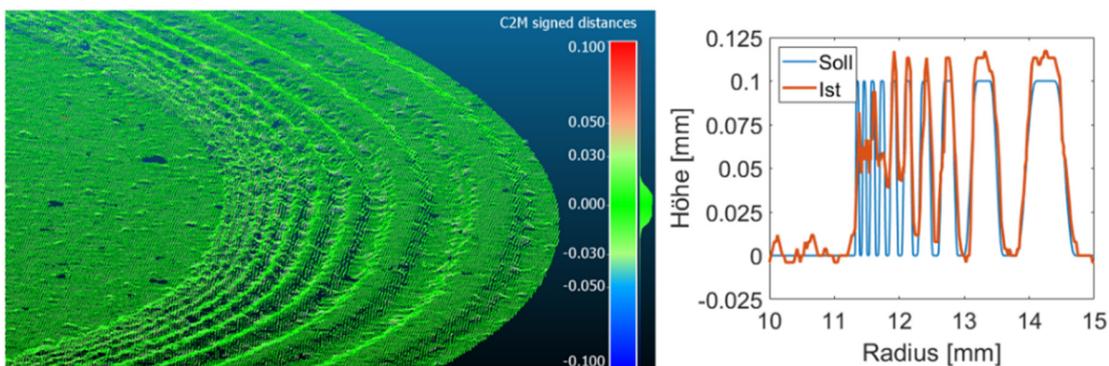


Abb. 5: Rekonstruktionsergebnis des Testfeldes mit horizontaler Variation mittels SGM und einer Fenstergröße von 3x3 Pixel. Links: Rekonstruiertes Testfeld. Rechts: Dazugehöriger Querschnitt des Testfeldradius

Zudem kann beobachtet werden, dass das Rauschen beim LSM vergleichsweise höher ausfällt als beim SGM. Dies ist auf die fehlende Berücksichtigung der Nachbarschaftsbeziehungen zurückzuführen. In Abbildung 5 ist die Rekonstruktion des Testfeldes zu erkennen, wenn eine Fenstergröße von 3×3 Pixel verwendet wird und die Strafterme P_1 und P_2 jeweils dem sechsfachen der quadrierten Fenstergröße entsprechen. Es kann beobachtet werden, dass die Rekonstruktion der äußeren Ringe eine hohe Qualität aufweisen. Jedoch ist anhand des abgebildeten Querschnittes zu erkennen, dass ebene Flächen durch das Messrauschen gestört und feine Strukturen geglättet werden. In Abbildung 6 wird dagegen eine Fenstergröße von 15×15 Pixel verwendet, wobei die Strafterme ebenfalls dem sechsfachen der quadrierten Fenstergröße entsprechen. Auch bei dieser Rekonstruktion weisen die äußeren Ringe eine hohe Qualität auf, wobei die Flanken der Ringe durch unterschiedliche Plateaus repräsentiert werden. Zudem kann beobachtet werden, dass deutlich mehr Ringe nicht korrekt rekonstruiert werden. Dieses ist auf den Glättungseffekt der Fenstergröße zurückzuführen, der gleichzeitig das Zuordnungsrauschen dämpft. Besonders anhand der Querschnitte ist die Glättung feiner Strukturen zu erkennen. Dieser Effekt wird beim SGM zusätzlich verstärkt, wenn der Strafterm P_1 deutlich größer als die angesetzte quadrierte Fenstergröße ist. Stattdessen hat der Strafterm P_2 kaum Einfluss. Jedoch führen Fenstergrößen größer als 15×15 Pixel in Kombination mit Straftermen, die Werte größer als das zehnfache der quadrierten Fenstergröße aufweisen, dazu, dass die Wahrscheinlichkeit von Fehlzunordnungen zunimmt.

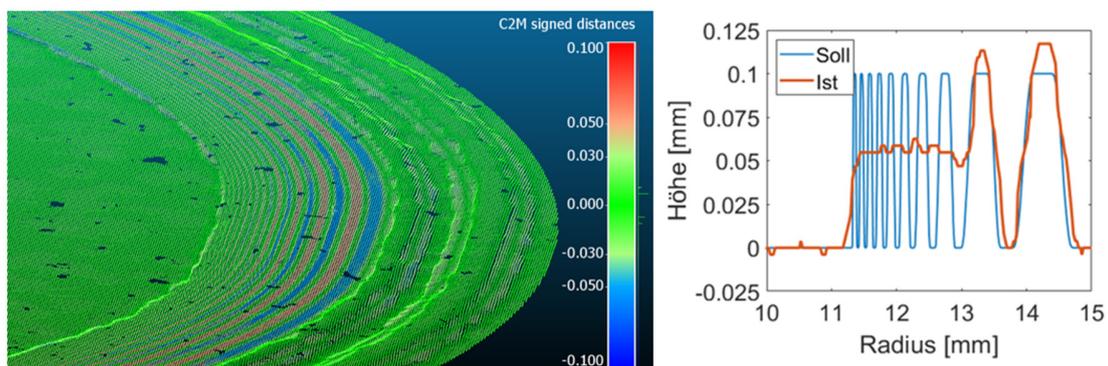


Abb. 6: Rekonstruktionsergebnis des Testfeldes mit horizontaler Variation mittels SGM und einer Fenstergröße von 15×15 Pixel. Links: Rekonstruiertes Testfeld. Rechts: Dazugehöriger Querschnitt des Testfeldradius

3.2 Orientierungsverfahren

Bei den Untersuchungen der Orientierungsverfahren zeigt sich, dass mit beiden Verfahren das angestrebte Genauigkeitsniveau mit kurzen Basislängen nicht erreicht wird. Besonders die hohen Genauigkeitsanforderungen der Translation in X-Richtung (Basislänge) und der Rotation um die Y-Achse (Konvergenzwinkel) führen dazu, dass Basislängen ab 20 mm für die weiteren Berechnungsschritte verwendet werden sollten. Ein Vergleich der zulässigen Standardabweichungen der inneren Orientierung zum realen Kalibrierdatensatz hat ergeben, dass vermutlich die Standardabweichung der radial-symmetrischen Verzeichnung zu den kritischen Abweichungen führt.

In Abbildung 7 ist exemplarisch das Genauigkeitsniveau des Konvergenzwinkels von den Bildern des Bildverbandes dargestellt, wenn die Orientierung anhand der beiden Methoden berechnet wird. Hierbei kann bei beiden Verfahren beobachtet werden, dass nur die mittleren Bilder des Bildstreifens die erforderliche Orientierungsgenauigkeit erreichen. Diese auftretende Systematik ist vermutlich auf die Passpunktverteilung zurückzuführen, da die Messmarken bei den Randbildern nicht auf den gesamten Aufnahmebereich homogen verteilt sind. Da eine homogene Passpunktverteilung in der realen Anwendung nur bedingt umsetzbar ist, sollten weitere Möglichkeiten wie der Einsatz eines Linearschlittens oder von ICP-Verfahren näher analysiert werden.

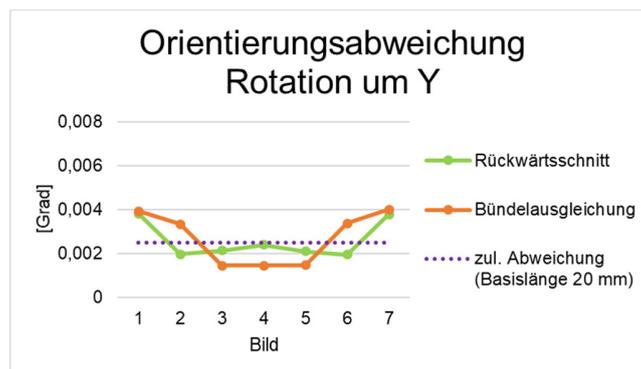


Abb. 7: Resultierende Orientierungsabweichungen und die zulässige Variation der Rotation um Y aus der MCS.

3.3 Anwendung an der Schweißnaht

Bei der Anwendung der untersuchten Orientierungs- und Matchingverfahren an einer synthetischen Schweißnaht konnten kaum Unterschiede zwischen den resultierenden Punktwolken festgestellt werden. Jedoch hat die verwendete Textur einen Einfluss auf das Rekonstruktionsergebnis. So ist in Abbildung 8 (links) zum einen die resultierende Punktwolke der Schweißnaht zu erkennen, wenn die realitätsnahe Textur verwendet wird. Des Weiteren ist in Abbildung 8 (rechts) die rekonstruierte Schweißnaht dargestellt, wenn die optimierte Textur verwendet wird. Während aus der optimierten Textur eine dichte homogene Punktwolke resultiert, sind bei der realitätsnahen Textur nur einzelne zusammenhängende Bereiche zu erkennen. Zudem weist sie größere Abweichungen zu der Referenz auf. Bei der optimierten Textur liegen die Abweichungen weitestgehend unterhalb von 30 μm und erreichen somit das geforderte Genauigkeitsniveau. Jedoch ist das Aufbringen einer optimierten Textur aufgrund von speziellen Umweltbedingungen und den hohen Genauigkeits- und Auflösungsanforderungen schwierig, weshalb die reale Oberflächentextur verwendet werden sollte. Um dennoch eine korrekte und vollständige Punktwolke zu erreichen, sollte die Ähnlichkeit zwischen den Bildern des Stereopaars erhöht werden, was vermutlich nur durch eine verkürzte Basis zu realisieren ist. Damit steigt jedoch die Empfindlichkeit des Messsystems gegenüber Orientierungsunsicherheiten. Durch die Ergebnisse dieser Arbeit kann somit weiterhin zu einer strukturierten Beleuchtung geraten werden, die eine künstliche Textur erzeugt. Diese minimiert den Einfluss der unterschiedlichen Perspektive, wodurch eine große Basis und eine hohe Zuordnung der künstlichen Textur, dem strukturierten Licht, vermutlich ermöglicht wird.

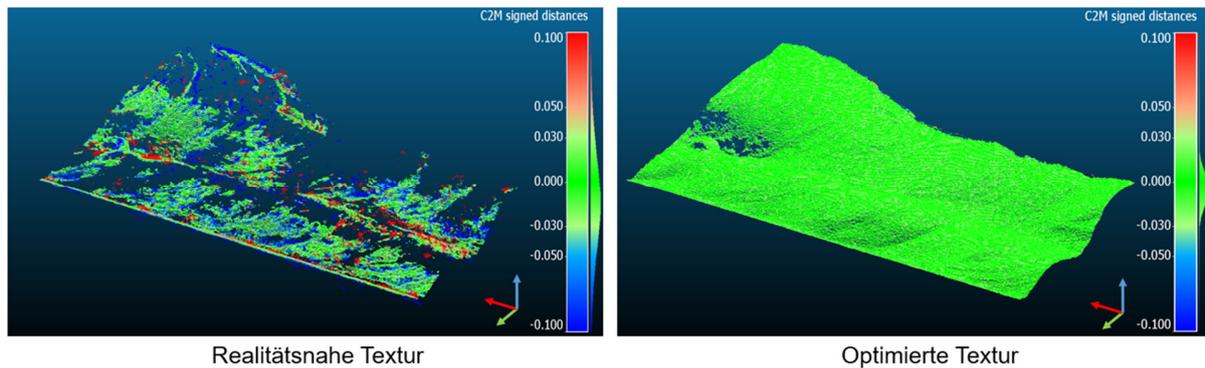


Abb. 8: Resultierende Punktwolken mittels SGM und Bündelausgleichung. Alle Angaben in Millimeter

4 Fazit & Ausblick

Bei der in diesem Beitrag diskutierten Masterarbeit wurden zwei Matching- und Orientierungsverfahren im Hinblick auf die hochgenaue Erfassung von Schweißnahtoberflächen untersucht. Hierfür wurden aufgrund des hohen Kosten- und Zeitaufwandes zur Erzeugung realer Daten, vor allem aber aufgrund der individuellen Evaluationsmöglichkeit einzelner Systemparameter, ausschließlich synthetische Bilddaten verwendet. Durch das Konzept der Evaluierung wird somit die Trennung des Einflusses einzelner Parameter ermöglicht. So zeigte sich, dass die Konfiguration des Bildverbandes sowie die Kalibrierung der inneren Orientierung optimiert werden sollten, damit die gesamte Schweißnaht hochgenau rekonstruiert wird. Eine Möglichkeit wäre das Aufnehmen von weiteren überlappenden Bildstreifen, wodurch vermutlich die Stabilität des gesamten Bildverbandes steigt und weitere Bilder für die hochgenaue Rekonstruktion verwendet werden können. Die Matchingverfahren SGM und LSM können prinzipiell für die hochgenaue Rekonstruktion von feinen Strukturen verwendet werden. Der Einfluss der Textur ist offensichtlich, jedoch auf Basis der Untersuchungen nur schwer zu quantifizieren, weshalb weitere Analysen notwendig sind. Bestätigen sich die Ergebnisse dieses Beitrages, können weitere Matchingverfahren wie das objektbasierte Semi-Global Matching (OSGM) nach BETHMANN & LUHMANN (2015) oder Multi-View Stereoverfahren (MVS) untersucht werden. Zudem können für reale Situationen weitere Parameter angebracht werden, um beispielsweise die Abschattung von Störobjekten oder radiometrische Besonderheiten zu simulieren. Des Weiteren sollten strukturierte Beleuchtungen in Betracht gezogen werden, um den Kompromiss aus Basislänge und Zuordnungsfähigkeit messtechnisch optimiert zu gestalten. Zusätzlich erlaubt der Aufbau der synthetischen Testfelder eine objektive, reproduzierbare und umfassende Evaluation ganzer Messsysteme für hochgenaue Anwendungen.

5 Literaturverzeichnis

- BETHMANN, F. & LUHMANN, T., 2015. Semi-Global Matching in Object Space. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **40**(3/W2), 23-30.
- EKKEL, T., SCHMIK, J., LUHMANN, T. & HASTEDT, H., 2015: Precise laser-based optical 3D Measurement of welding seams under water. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **40**(5/W5), 117-122.
- GRÜN, A., 1985: Adaptive kleinste Quadrate Korrelation und geometrische Zusatzinformationen. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, **9**, 309-312.
- HASTEDT, H., 2004: Monte-Carlo Simulation in Close Range Photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **34**, 18-23.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, **2**, 437-444.
- NEILL, A. M., 2016: The application of 3D reconstruction by stereo vision for the purpose of assessing weld quality. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Colorado School of Mines.
- POHLE, R., 2004. Computerunterstützte Bildanalyse zur Auswertung medizinischer Bilddaten. Habilitationsschrift, Fakultät für Informatik der Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg.
- SCHARSTEIN, D., HIRSCHMÜLLER, H., KITAJIMA, Y., KRATHWOHL, G., NESIC, N., WANG, X. & WESTLING, P., 2014: High-Resolution Stereo Datasets with Subpixel-Accurate Ground Truth. German Conference on Pattern Recognition, 31-42.
- SCHARSTEIN, D. & SZELISKI, R., 2002: A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. International Journal of Computer Vision, **47**(1/2/3), 7-42.
- SCHARSTEIN, D. & SZELISKI, R., 2004: High-accuracy stereo depth maps using structured light. IEEE Comouter Society Confernce on Computer Vision and Pattern Recognition, **1**, 195-202.
- SCHNEIDER, C.-T., 1991. Objektgestützte Mehrbildzuordnung. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Nr. 506.