

Inline-Geometrieerfassung von Kautschuk: Entwicklung eines Orientierungskonzeptes zwischen Lichtschnittsensoren und einem Stereokamerasystem

Simon ALBERS, Robin ROFALLSKI und Thomas LUHMANN

Zusammenfassung

Die Herstellung von Kautschuk ist ein energetisch, technologisch und personell hochgradig aufwendiger Prozess. Zur Effizienz- und Qualitätssteigerung wird eine dauerhafte Überwachung des Extrudats während des Herstellungsprozesses benötigt. Die Geometrieerfassung erfolgt mit Lichtschnittsensoren, welche durch strukturierte Beleuchtung und hohe Erfassungsgeschwindigkeiten ein geeignetes Messmittel darstellen. Für die Überführung der 2D-Profile aus den Sensoren in eine 3D-Punktwolke werden zusätzliche Bewegungsinformationen benötigt, welche mittels eines Stereokamerasystems erfasst werden.

In diesem Beitrag wird die Entwicklung eines Orientierungsverfahrens vorgestellt, welches die durch das Stereokamerasystem erfassten Bewegungsinformationen nutzt, um die räumliche Geometrie eines Kautschukextrudats zu rekonstruieren. Hierzu muss zunächst die Orientierung zwischen dem Kamerasystem und den Lichtschnittsensoren bestimmt werden. Mittels eines Kalibrierkörpers und den entwickelten Algorithmen können die im Rahmen der Orientierungsmessung erfassten Daten ausgewertet und Parameter zur Beschreibung der Orientierung abgeleitet werden. Diese Parameter werden an den aufbauenden Algorithmus zur Rekonstruktion von Extrudatmessungen übergeben. Der Messaufbau im Kontext der Extrusionslinie, die Entwicklung des Kalibrierkörpers und die Funktionsweise der Algorithmen werden erläutert.

1 Einleitung und Motivation

Die Arbeiten finden im Projekt DIGITRUBBER im Rahmen der Plattform MaterialDigital statt. Ziel der Initiative ist die Erhöhung der Digitalisierung im Kontext von Materialien zur Verbesserung des Wirtschaftsstandortes Deutschland (MATERIALDIGITAL o. J.). Das Projekt DIGITRUBBER konzentriert sich hierbei auf die industrielle Herstellung von Kautschukprodukten mit dem speziellen Fokus auf den Schritt der Extrusion. Diverse Sensoren für die Inlineüberwachung des Extrudats werden genutzt, um u. a. Temperatur und chemische Zusammensetzung zu überwachen. Daneben werden an zwei Stellen der Extrusionslinie mittels Lichtschnittsensoren (LS) zweidimensionale Profile des Extrudats erzeugt. Diese sollen Aussagen über das Quellverhalten ermöglichen. Für eine bessere Vergleichbarkeit und eine vollumfängliche Darstellung werden die einzelnen 2D-Profile zu einem 3D-Modell kombiniert. Damit dies gelingt, muss die Geschwindigkeit des Materialflusses erfasst werden. Zu diesem Zweck wird ein Stereokamerasystem genutzt, welches die Bewegung des Förderbandes misst, über welches das Extrudat während der Abkühlung geführt wird. Um die Bewegungsinformationen richtig auf die Profile übertragen zu können, muss die Orientierung zwischen den LS-Systemen und dem Stereokamerasystem bekannt sein. Hierzu wurde ein spezieller

Kalibrierkörper entwickelt. Die erzeugten Messdaten können dann mithilfe eines Algorithmus ausgewertet werden. Das Ergebnis ist eine Transformationsmatrix, die an einen zweiten Algorithmus übergeben wird. Dieser kombiniert die Einzelprofile einer Extrudatmessung zu einer vollständigen 3D-Punktwolke. Die Inlineüberwachung soll zukünftig den hohen Bedarf an Arbeitskräften und die Entstehung von Abfällen, durch eine Automatisierung und Echtzeitüberwachung reduzieren.

2 Grundlagen

Im Folgenden werden kurz die Grundlagen der Kautschukextrusion und der elementaren Messsysteme in Form von Lichtschnittsensoren und Stereokamerasystemen beschrieben.

Kautschuk beschreibt verschiedene vernetzbare, in der Regel amorphe Polymere und dient als Ausgangsstoff für die Gummiherstellung. Kautschuk kann natürlich gewonnen oder künstlich per Synthese hergestellt werden (SOMMER & HOLZNER 2013). Ein möglicher Teilschritt der Herstellung von Kautschukprodukten ist die Extrusion. Der Extruder wird mit einer Kautschukmischung gefüttert. Die plastische Masse wird durch ein formgebendes Mundstück gedrückt. Das Ergebnis der Extrusion ist ein kontinuierlicher Materialfluss, der über ein anschließendes Förderband abgeführt wird (RÖTHEMEYER 2013). Die Überwachung des Extrudats im Rahmen dieser Arbeit findet direkt nach der Extrusion und zusätzlich nach einer Abkühlungsphase, ohne die Verwendung einer gesonderten Kühleinheit, statt.

Wie in anderen Herstellungsprozessen sind auch in der Kautschukherstellung Lichtschnittsensoren etablierte Mittel zur Qualitätskontrolle. Der Sensor besteht grundsätzlich aus einem Laser und einem Photodetektor (Kamera). Die Orientierung zwischen der Strahlungsquelle und dem Detektor ist bekannt. Der Laser wird von der Oberfläche des Objektes reflektiert und trifft auf den flächenhaften Detektor. Die Position auf dem Detektor ändert sich mit der Entfernung zwischen Objekt und Sensor. Aus diesem Verhältnis kann die Distanz zum Sensor bestimmt werden. Wird der Laserstrahl durch eine Laserebene ersetzt, können nicht nur einzelne Entfernungen, sondern zweidimensionale Profile erfasst werden. Durch die Ebene wird eine Linie auf dem Objekt abgebildet. Für jeden Punkt auf der Linie kann mittels Triangulation eine Entfernung bestimmt werden, welche im Koordinatensystem des Lichtschnittsensors als zweidimensionaler Punkt interpretiert werden kann (MARXER et al. 2021).

Sollen die zweidimensionalen Profile dreidimensional ausgewertet werden, muss die Bewegung des zu messenden Objektes getrackt werden. Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines Stereokamerasystems, welches die Erzeugung von synchron aufgenommenen Bildpaaren ermöglicht. Nachdem die Kameras kalibriert und zueinander orientiert sind, können mittels Vorwärtsschnitt 3D-Koordinaten von Objektpunkten bestimmt werden. Für die Identifizierung von gemeinsamen Punkten zwischen Bildern bzw. Bildpaaren und die verbesserte Automatisierung von Prozessen können künstliche Markierungen genutzt werden. Diese besitzen ein eindeutiges Zentrum und meist zusätzliche individuelle Muster, durch die den Markierungen eindeutige Punktnummern zugeordnet werden können. Die ermittelten 3D-Punkte befinden sich zunächst in einem lokalen Modellkoordinatensystem, können aber ggf. über homologe Punkte in ein anderes Koordinatensystem transformiert werden (LUHMANN 2023).

3 Extrusionslinie

Die Extrusionslinie wurde am Deutschen Institut für Kautschuktechnologie (DIK e. V.) aufgebaut. Nach dem Extruder folgt ein Durchgangssensor. Anschließend wird das Extrudat durch das erste LS-System geführt. Auf diesem ist das Stereokamerasystem befestigt und beobachtet den vorderen Teil des Förderbandes. Während sich das Material über das Förderband hinwegbewegt kühlt es ab. Am Ende des Förderbandes befindet sich das zweite LS-System. (Abb. 1). Die LS-Systeme wurden vom Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover entwickelt und gebaut. Sie bestehen aus mehreren individuellen LS-Sensoren. Alle erfassten Profile befinden sich zunächst in einem lokalen Koordinatensystem auf einer Ebene. Das Förderband ist an den Rändern mit photogrammetrischen Messmarken beklebt. Das Stereokamerasystem besteht aus zwei Machine-Vision-Kameras, deren Aufnahmen mit dem LS-System synchronisiert sind. Ein Bildpaar und sein zugehöriges Profil werden im Folgenden als Epoche bezeichnet.

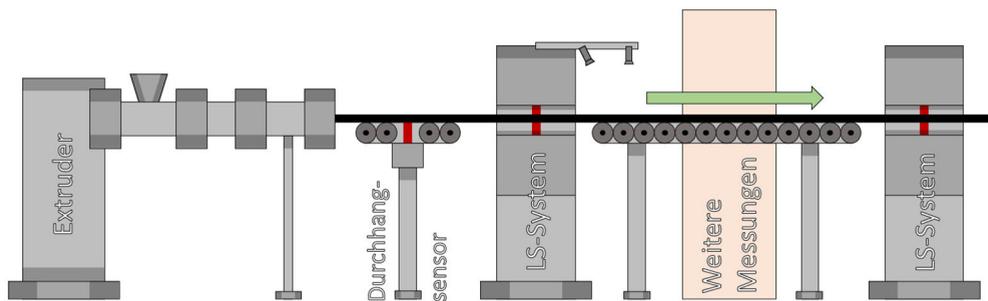


Abb. 1: Schematische Darstellung der Extrusionslinie, das Extrudat bewegt sich von links nach rechts

4 Kalibrierkörper

Der Kalibrierkörper dient zur Bestimmung der Orientierung zwischen dem Stereokamerasystem und den LS-Systemen. Bei der Entwicklung des Kalibrierkörpers sind grundlegend zwei Aspekte zu berücksichtigen. Der erste ist die fehlende Überlappung der Sichtfelder der beiden Systeme, der zweite die unterschiedlichen Daten, die die Systeme erfassen. Das Lösungskonzept besteht aus einer Kombination von photogrammetrischen Messmarken und für die LS-Sensoren erfassbare Geometrien auf einer gemeinsamen Plattform. Auf diese Weise kann der Kalibrierkörper vor der Messung in der Extrusionslinie mittels alternativer Messinstrumente erfasst werden, um eine gemeinschaftliche Referenz für beide Systeme zu bilden. Im Rahmen eines studentischen Projektes wurden erste Prototypen entwickelt und diese für die Verwendung in der Extrusionslinie optimiert. Die finalen Kalibrierkörper bestehen aus Aluminiumprofilen, einer Platte mit photogrammetrischen Messmarken und bis zu acht hochpräzise gefertigten Kunststoffkugeln mit einem Sollradius von 10 mm (Abb. 2 links). Es werden zwei bauähnliche Kalibrierkörper hergestellt, die mittels eines weiteren Aluminiumprofils verbunden werden können, um parallel beide LS-Systeme zu orientieren. Die Messmarken auf den Platten sind codiert und werden von dem Stereokamerasystem getrackt, um die Bewegung des Körpers bestimmen zu können. Die LS-Systeme erfassen die Geometrie der

Kugeln als einzelne Profile. Die Verwendung der Kugeln besitzt die Vorteile, dass man durch das Zusammenfügen mehrerer Profile die Mittelpunkte der Kugeln als eindeutigen Bezugspunkt bestimmen kann und die Abweichung vom Sollradius bzw. die Entfernung der Punkte zur ausgeglichenen Kugeloberfläche ein gut interpretierbares Qualitätsmerkmal darstellt. Für die Erfassung des Kalibrierkörpers werden ein tragbarer 3D-Scanner und photogrammetrische Bildaufnahmen verwendet. Für das weitere Vorgehen werden die Mittelpunkte der Kugeln per Ausgleichung mit festem Radius bestimmt (Abb. 2 rechts).



Abb. 2: Einer der zwei Kalibrierkörper (links) und die berechneten Mittelpunkte nach der Erfassung (rechts)

5 Algorithmen

Der Workflow besteht aus zwei aufeinander aufbauenden Algorithmen. Während der Orientierung wird der beschriebene Kalibrierkörper verwendet. Aus den erfassten Daten wird die Orientierung zwischen dem Stereokamerasystem und den LS-Systemen bestimmt und als Transformationsmatrix beschrieben. Diese wird an den Algorithmus zur Kombination weitergegeben. Beide Algorithmen sind in Python umgesetzt und nutzen – neben den Standardbibliotheken – OpenCV, Open3D und SciPy. Zusätzlich werden institutseigene Algorithmen zur Extraktion und Berechnung von 3D-Punkten aus Bilddaten sowie Implementierungen von WASMEIERS (2023) MatLab-Code für die Bestimmung von Helmerttransformationen verwendet.

Für die Datenerfassung im Rahmen der Orientierung wird der Kalibrierkörper auf dem Förderband platziert und so weit wie möglich in das LS-System hineingefahren. Während der Messung wird der Kalibrierkörper langsam aus dem LS-System herausgefahren. Der erste Schritt der Datenverarbeitung ist die Bestimmung der 3D-Koordinaten der codierten Messmarken in jeder Epoche. Die Punkte liegen zunächst im Kamerakoordinatensystem vor. Werden mindestens drei Punkte in einem Bildpaar gefunden, können die Transformationsparameter in das Kalibrierkoordinatensystem bestimmt werden. Die Bestimmung der homologen Punkte geschieht über die Codierung der Messmarken. Bewegen sich die Messmarken zwischen zwei Epochen, ändern sich auch ihre Koordinaten im Kamerakoordinatensystem und damit die Transformationsparameter. Die Parameter beschreiben folglich indirekt die Bewegung des Kalibrierkörpers bzw. des Förderbandes. Die Übertragung der Profile erfolgt über die bekannten Mittelpunkte der Kugeln im Kalibriersystem. Da sich aus den zweidimensionalen Profilen (Abb. 3a) keine dreidimensionalen Mittelpunkte bestimmen lassen, müssen die Profile zunächst näherungsweise kombiniert werden (Abb. 3b). Dazu wird die Normale der LS-Ebenen an die Richtung des mittleren Bewegungsvektors der Messmarken angepasst.

Anschließend können die Transformationsparameter des Bewegungstrackings auf die Profile angewendet werden. Aus der daraus entstehenden Punktwolke können die Oberflächenpunkte von Kugeln extrahiert werden (Abb. 3c). Dazu wird ein Verfahren nach HONTI et al. (2020) genutzt. Die Kugelpunkte werden für spätere Verarbeitungsschritte zurück in das LS-Koordinatensystem transformiert (Abb. 3d).

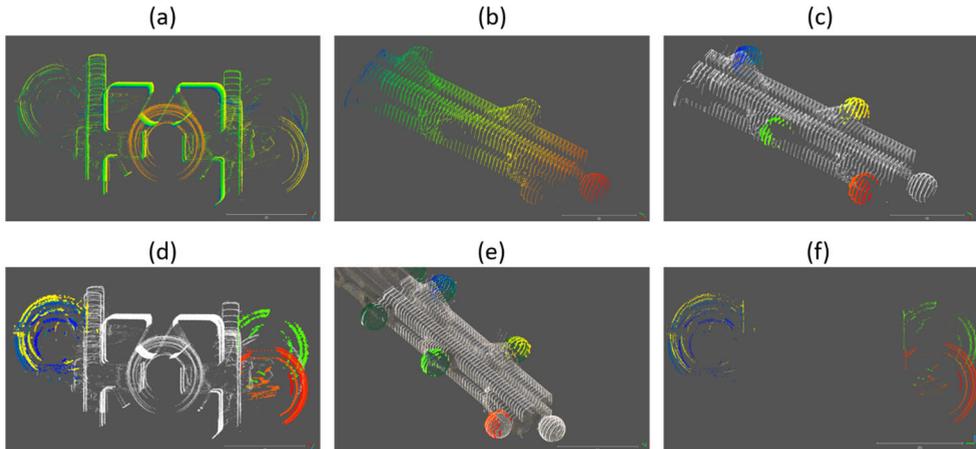


Abb. 3: Punktwolken während verschiedener Schritte der Orientierung: a) alle unbearbeiteten Profile in einem System, b) näherungsweise kombinierte Profile, c) extrahierte Kugelpunkte, d) Kugelpunkte in den Profilen, e) in das Kalibriersystem transformierte Punktwolke, f) in das Kamerasystem transformierte Kugelpunkte

Die gefundenen Kugeln werden den passenden Sollkugeln des Kalibrierkörpers über den Vergleich ihrer Entfernungen untereinander zugeordnet. Über die homologen Kugelmittelpunkte wird die Punktwolke in das Kalibrierkörperkoordinatensystem transformiert (Abb. 3e). Durch die Anwendung der inversen Transformation des Trackings in Abhängigkeit der Epoche werden die Kugelpunkte in das Kamerakoordinatensystem transformiert (Abb. 3f). Nun sind die Kugelpunkte im LS- und im Kamerakoordinatensystem bekannt. Für jedes individuelle Profil wird der Schwerpunkt in beiden Systemen bestimmt. Die Schwerpunkte dienen als homologe Punkte, um eine Gesamttransformation für die Übertragung der Profile vom LS-Koordinatensystem in das Kamerakoordinatensystem zu bestimmen. Die sich ergebende Transformationsmatrix ist die erste Lösung zur Beschreibung der Orientierung. Die Transformation beruht auf Schätzung und muss daher als Näherung betrachtet werden. Die Näherung wird mittels der Methode der differentiellen Evolution optimiert. Diese ist ein globaler Optimierer und lässt sich einfach auf den vorhandenen Sachverhalt anwenden. Im Rahmen der differentiellen Evolution wird ein Parametervektor modifiziert, um eine Kostenfunktion zu minimieren (STORN & PRICE 1997). Der Parametervektor ist der Zuschlag auf die sechs Parameter zur Bestimmung der Transformationsmatrix vom LS- in das Kamerasystem. Die Kostenfunktion ist als die Summe der mittleren Entfernung der berechneten Kugeln zu den Sollkugeln und die mittlere Abweichung der Kugelpunkte von der Kugeloberfläche definiert. In jeder Iteration wird auf Basis der modifizierten Parameter eine Matrix bestimmt, mittels der die Kugelpunkte in das Kamerasystem transformiert werden. In Ab-

hängigkeit der Epoche wird das Tracking angewendet und so die 3D-Punktwolke aus den Profilen erzeugt. Aus den Punkten werden die Kugeln berechnet und für die Bestimmung des Kostenwertes mit der Sollgeometrie verglichen. Die Parameter mit dem geringsten resultierenden Kostenwert werden für die Kombination der Extrudatmessungen genutzt.

Nach der Orientierung können die Profile aus Messungen mit dem Extrudat kombiniert werden. Dafür wird die optimierte Transformationsmatrix an den Algorithmus übergeben. In diesem Fall werden die Marken auf dem Förderband für das Tracking der Bewegung genutzt, welche zuvor eingemessen worden sind. Für die Berücksichtigung der kreisförmigen Bewegung des Förderbandes wird die Anzahl der Durchläufe über die Betrachtung der Punktnummern bestimmt und die Geometrie des Förderbandes virtuell erweitert. Die aus den extrahierten Punkten und der erweiterten Sollgeometrie erhaltenen Trackingparameter können mittels der Transformationsmatrix aus der Orientierung direkt auf die Profile angewendet werden. Das Ergebnis ist eine 3D-Punktwolke aus den kombinierten 2D-Profilen mit Bezug auf die Sollgeometrie des Förderbandes.

6 Ergebnisse, Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Verfahren zur Orientierung eines LS-Systems zu einem Stereokamerasystem im Rahmen der Kautschukextrusion beschrieben. Hierfür wurden ein Kalibrierkörper und zugehörige Algorithmen entwickelt. Zunächst wird eine Startlösung bestimmt und diese dann per differenzieller Evolution optimiert. Während die Startlösung bei wiederholter Auswertung derselben Daten identisch ist, besitzen die Lösungen nach der Optimierung Differenzen im Zehntelmillimeter- bzw. Zehntelgrad-Bereich (Tabelle 1).

Tabelle 1: Allgemeine Startwerte und verschiedene Ergebnisse nach der Optimierung bei gleicher Datengrundlage

Auswertung	Rx	Ry	Rz	Tx	Ty	Tz
Start	-171,524°	26,871°	-77,052°	564,612 mm	-134,539 mm	-363,859 mm
1	-171,520°	27,032°	-77,518°	565,243 mm	-135,522 mm	-364,178 mm
2	-171,609°	27,019°	-77,478°	565,545 mm	-135,532 mm	-364,120 mm
3	-171,596°	27,014°	-77,506°	565,547 mm	-135,520 mm	-364,116 mm

Die Differenzen wirken sich direkt auf die durch die Kombination der Profile erhaltenen Punktwolken aus. Die grundsätzliche Geometrie wird erfasst, doch im Detail sind deutliche Verschiebungen zu erkennen (Abb. 4). Zukünftige Entwicklungen werden diese Abweichungen und mögliche Anpassungen im Hinblick auf eine angepasste Kostenfunktion oder alternative Optimierungsverfahren tiefgreifender betrachten.

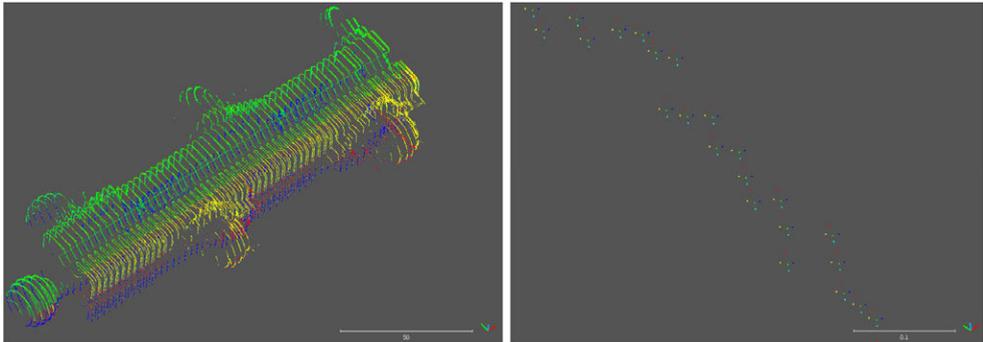


Abb. 4: Unterschiede durch die Abweichungen der Parameter bei der Kombination: Gesamtübersicht (links), Detailansicht (rechts)

In mehreren Messkampagnen wurden Daten im Rahmen von realitätsnahen Extrudatsvorgängen erfasst. Hierbei wurden unterschiedliche Kautschukmischungen und formgebende Mundstücke verwendet. Ein vorläufiges Teilergebnis einer Auswertung lässt sich Abbildung 5 entnehmen. Die grundlegende Geometrie des Extrudats wird korrekt rekonstruiert. Das Ergebnis ist visuell zufriedenstellend. Eine weiterführende Analyse und der Vergleich mit weiteren Auswertungen stehen noch aus.

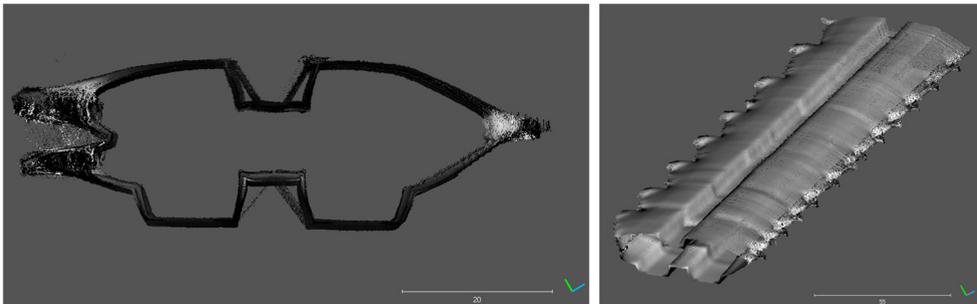


Abb. 5: Ausschnitt von kombinierten Profilen einer Extrudatsmessung als Vordersicht (links) und Schrägansicht (rechts)

Das entwickelte Verfahren ermittelt eine verwertbare Näherungslösung und ist grundsätzlich funktionstüchtig. Nach der Orientierung ist es möglich, Profile einer Extrudatsmessung zu kombinieren, um so ein dreidimensionales Modell zu erhalten, welches die Charakteristik der Geometrie wiedergibt. In diesem Beitrag wurde sich zunächst auf die grundlegende Funktionsweise der Algorithmen und den Aufbau des Kalibrierkörpers fokussiert. In weiterführenden Untersuchungen und Arbeiten soll dann speziell auf die Qualität der erhaltenen Ergebnisse eingegangen werden. Dazu sollen unter anderem die erzeugten 3D-Modelle mit einem alternativen Ansatz verglichen werden. Dieser nutzt keine Referenzgeometrie, sondern bestimmt die vom Förderband zurückgelegte Strecke direkt aus den Bilddaten über die Bewegung der markierten Punkte von Epoche zu Epoche. Auch der Vergleich mit weiteren Optimierungsverfahren neben der differentiellen Evolution ist angedacht. Auf diese Weise

können die Algorithmen weiter verbessert werden. Die Modelle können dann genutzt werden, um die reale mit der geplanten Geometrie zu vergleichen, Rückschlüsse auf das Quellverhalten bei der Verwendung beider LS-Systeme abzuleiten und Parameter zu bestimmen, die die Qualität des fertigen Extrudats beschreiben und so insgesamt die Automatisierung des Prozesses und die Qualitätssteigerung unterstützen.

Danksagung

Die Autoren möchten sich beim gesamten DIGITRUBBER-Team für die produktive Zusammenarbeit bedanken. Des Weiteren gilt der Dank den Mitgliedern des IAPG und den beteiligten Studierenden für die konstruktiven Diskussionen und die Unterstützung bei der algorithmischen Umsetzung. DIGITRUBBER wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Literatur

- Honti, R., Erdél Yi, J. & Kopáčík, A. (2020): *Automated Sphere Segmentation from Point Clouds*. Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences, 15 (3), S. 15-25, doi: 10.1556/606.2020.15.3.2.
- Luhmann, T. (2023): *Nahbereichsphotogrammetrie*. 5. Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.
- Marxer, M., Bach, C. & Keferstein, C. P. (2021): *Fertigungsmesstechnik*. Springer Nature, Wiesbaden.
- MaterialDigital (o. J.): *Plattform MaterialDigital Homepage*. <https://materialdigital.de/> (28.11.2023).
- Röthemeyer, F. (2013): *Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen durch Extrudieren*. In: Röthemeyer & Sommer (Hrsg.): *Kautschuktechnologie*. Hanser, München.
- Sommer, F. & Holzner, A. (2013): *Aufbau, Herstellung und Eigenschaften von Kautschuk und Elastomeren*. In: Röthemeyer & Sommer (Hrsg.): *Kautschuktechnologie*. Hanser, München.
- Storn, R. & Price, K. (1997): *Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces*. Journal of Global Optimization, 11, S. 341-359.
- Wasmeier, P. (2023): *Geodetic Transformations*. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9696-geodetic-transformations>.