

Titel

Entwicklung der Systemtechnik zur Fertigung hybrider LBM-Bauteile (HyFAS)

IGF-Nr.: 22075 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
Fraunhofer Einrichtung für Additive
Produktionstechnologien, Hamburg (IAPT)



Ansprechpartner beim Institut:

Bohdan Vykhtar
+49 40 484010786
bohdan.vykhtar@iapt.fraunhofer.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 22075 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Die laseradditive Pulverbettfertigung (LBM) ist das derzeit verbreitetste additive Verfahren für Metalle, da es hohe Bauteilqualitäten erreicht und maximale Designfreiheiten beinhaltet. Vorteile sind die Integration neuer oder zusätzlicher Funktionen (z.B. konturnahe Kühlstrukturen), Vereinfachen von Baugruppen in ein Einzelbauteil oder die Möglichkeit Leichtbau zu betreiben. Werkzeuge mit diesen Eigenschaften können höhere Stand- und Taktzeiten erreichen, was eine erhöhte Wirtschaftlichkeit und Ressourcenschonung ermöglicht. Die Anwendung des LBM-Prozesses alleine ist derzeit durch die lange Fertigungszeit (Baurate 15-100 cm³/h) von Bauteilen kostenintensiv. Die Kombination von konventionell gefertigten Halbzeugen zur Substitution von einfachen oder großvolumigen Bauteilbereichen und additiver Fertigung besitzt daher großes Potential für Kosteneinsparungen. Eine wirtschaftliche Fertigung von additiven Strukturen wird damit in vielen Bereichen erst möglich. Nach gegenwärtigem Stand der Technik wird zur Produktion von LBM-Bauteilen konventionell auf standardisierte, ebene Bauplattformen aufgebaut. Ein „Druck“ auf anderen Körpern oder Halbzeugen ist, wenn überhaupt, nur mit hohem manuellem und zeitlichem Aufwand möglich. Dieser hybride Ansatz hat für den Werkzeugbau, bspw. für Werkzeuge aus 1.2344, sowie anderer Branchen großes Potential und wurde bereits von einigen Industriefirmen erprobt. Hierbei konnte jedoch bisher aufgrund des geringen Automatisierungsgrads und fehlender Verfahren nicht die erforderliche Qualität bzw. kein Business-Case erreicht werden. Es gilt zahlreiche Herausforderungen zu überwinden. Die mangelnde Robustheit der hybriden Fertigung kann auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden. Ein zentrales Problem besteht in der präzisen Positionierung der Grundkomponente auf der Substratplatte der LBM-Maschine. Eine ungenaue Platzierung kann zu erheblichen Qualitätsproblemen führen, die Nacharbeit erfordern und somit die Kosten und Komplexität erhöhen. Das Fehlen einer Lösung zur Bestimmung der genauen Position und Orientierung der Halbzeugkomponente für die hybride additive Fertigung innerhalb der Maschine erschwert die präzise Ausrichtung der additiven Strukturen auf dem konventionell gefertigten Halbzeug. Es ist dabei nicht nur die Pose und Orientierung entscheidend, sondern auch die Ausrichtung der Halbzeugoberfläche zur Bearbeitungsebene.

Forschungsziel

Das Ziel des Vorhabens war es, eine Einmesstechnik für die hybride Fertigung zu entwickeln, welche es ermöglicht die Position und Orientierung des konventionell gefertigten Halbzeugs im Raum zu bestimmen und bei der Nivellierung und dem Ankratzen zu assistieren.

Es waren im Wesentlichen zwei Teilziele zu erreichen. Das erste Teilziel war die Untersuchung der materialtechnischen Eignung des Werkstoffs 1.2344 bei hybrider Fertigung. Hierzu wurden Prozessparameter ermittelt und verschiedene Probekörper gefertigt und analysiert. Die Untersuchung umfasste die Bewertung der Härte, HAFS2 – IGF 22075 N

Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften, um die Eignung des Werkstoffs für die hybride Fertigung zu validieren. Dieser Schritt war entscheidend, um die Grundlage für die weitere Entwicklung und Optimierung der Fertigungsprozesse zu schaffen.

Das zweite Teilziel umfasste die Entwicklung einer automatisierten Einmesstechnik. Dieses Ziel beinhaltete mehrere Anforderungen, welche gemeinsam mit dem PA festgelegt worden sind. Die erste Anforderung ist die Platzierung der additiven Strukturen auf das konventionell gefertigte Halbzeug mit einer Präzision von 200 μm . Dafür wurde im Projekt eine Einmesstechnik entwickelt und implementiert, die es ermöglicht das Halbzeug zu detektieren und eine Verschiebung der Position bzw. eine Verdrehung der Orientierung dem Benutzer zu berechnen. Zusätzlich sollen diese Informationen genutzt werden können, um eine Nivellierung in einem hybriden LBM-Prozess zu vereinfachen. Eine weitere festgelegte Anforderung war es, die Einmesstechnik in einer beliebigen LBM-Industrieanlage einsetzen zu können, ohne die Integrität der Maschine zu beschädigen bzw. zu modifizieren und die Einmesstechnik unter realen Einsatzbedingungen testen zu können.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Für das erste Teilziel wurde ein teilfaktorieller Versuchsplan entwickelt, um die Prozessierbarkeit des Warmarbeitsstahls 1.2343 mittels der selektiven Laserschmelzanlage M290 von EOS zu untersuchen. Die Anlage hat ein Bauvolumen von 250 x 250 x 325 mm^3 und ist mit einem 400 W Single-Mode-Laser ausgestattet. Im ersten Schritt wurden verschiedene Parameterkombinationen bei einer Schichtstärke von 40 μm getestet. Ziel war es, den Energieeintrag zu minimieren, um Eigenspannungen und Verzug zu reduzieren. Die Proben wurden manuell von der Bauplattform gelöst und mikroskopisch analysiert. In Abbildung 1, ist ein direkter Vergleich der Prüfkörper aufgezeigt, welche ohne, bzw. mit einer Bauplattformheizung von 200°C hergestellt worden sind. Es wurde festgestellt, dass Proben, die ohne Vorheizen der Bauplattform hergestellt wurden, große Risse aufgrund hoher Eigenspannungen aufwiesen.

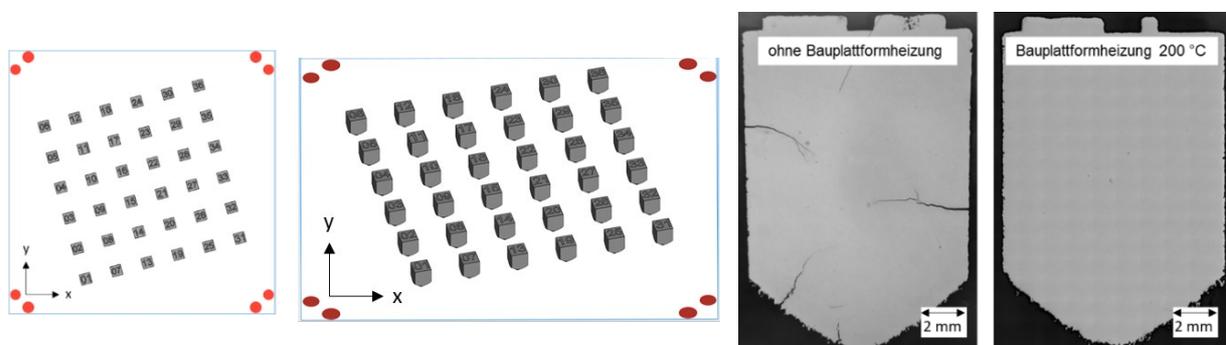


Abbildung 1: Übersicht über die Anordnung der Prüfkörper je Versuchsreihe (links) und Querschliffe zweier Prüfkörper bei deaktivierter Bauplattformheizung sowie bei 200 °C (rechts).

Weitere Probekörper wurden mit 200 °C vorgeheizter Bauplattform generiert, was die Eigenspannungen verringerte. Die finalen Prozessparameter wurden bestimmt und führten zu hoher Bauteildichte und guter Oberflächenqualität der Probekörper. Flachzugproben der Form E 2 x 6 x 20 gemäß DIN 50125 (vgl. Abbildung 2) wurden mit den finalen Parametern hergestellt und auf mechanische Eigenschaften getestet, wobei keine signifikanten Einflüsse der Oberflächenqualität auf die Zugfestigkeit festgestellt werden konnten.

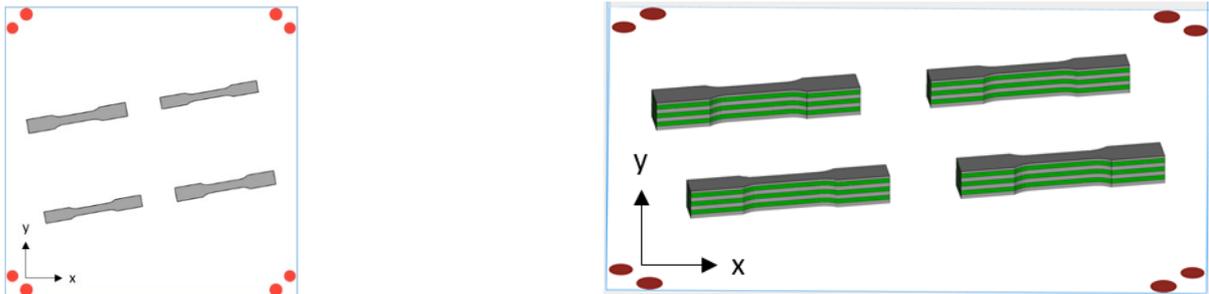


Abbildung 2: Herstellung der Zugprüfkörper der Form E 2 x 6 x 20 gemäß DIN 50125

Die Zugversuche gemäß DIN EN 10002-1 zeigten, dass sich die Ergebnisse innerhalb der Kategorien (mit/ohne Wärmebehandlung sowie as-built/nachbearbeitet) ähneln. Das Vorheizen der Bauplattform auf 200 °C reduzierte die Eigenspannungen signifikant, was durch das Fehlen großer Risse in den unter diesen Bedingungen hergestellten Proben belegt wurde. Die mit den optimierten Parametern hergestellten Proben wiesen eine hohe Bauteildichte auf, was auf eine effektive Materialkonsolidierung hinweist.

Der zweite Schwerpunkt dieser Studie liegt auf der Entwicklung einer automatisierten Messtechnologie. Im HyFAS-Forschungsprojekt wurde ein **Stereo-Kamerasystem** entwickelt, um die zuvor besprochenen Herausforderungen im Einmessen des Halbzeugs zu bewältigen. Der Aufbau dieses Systems umfasst zwei Kameras mit einer Auflösung von je 24,4 MP. Der zu realisierende Demonstrator mithilfe der entwickelten Stereo-Technik wurde vom einem PA-Mitglied zur Verfügung gestellt und ist in Abbildung 3 abgebildet. Die Anforderungen für das Demonstratorbauteil wurden im ersten PA-Treffen definiert. Der Demonstrator ist ein Hydrodehnspannfutter, das für zerspannende Prozesse verwendet wird. Im Hydrodehnspannfutter wird hydraulischer Druck erzeugt, wodurch sich das dünnwandige Material ausdehnt und ein Werkzeug koaxial im Spannfutter fixiert. Zur Optimierung der Spanabfuhr wurde das Werkzeug bereits vor dem Projekt für die additive Fertigung modifiziert. Die optimierte Variante durch additive Fertigung kann Kosten sparen und die Effizienz erhöhen, ist jedoch mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Die Koaxialität oder der Versatz in der XY-Ebene der additiv aufgebauten Strukturen zum geschmiedeten Rohling darf 200 µm nicht überschreiten, da sonst bei der Nachbearbeitung zu viel Material vom dünnwandigen Profil abgetragen wird, was die Wand einseitig instabil macht. Der Z-Versatz kann durch Nivellieren korrigiert werden. Die Verdrehung des Werkstücks um die Z-Achse erfordert zusätzliche hydraulische Kanäle zur Aufrechterhaltung der Funktionalität.



Abbildung 3: Hydrodehnspannfutter konventionell gefertigt (links), und hybrid gefertigt (rechts)

Um die Sensorik zu entwickeln, wurde im Laufe des Projekts ein Teststand konzipiert und umgesetzt, welcher die Prozesskammer der EOS M290 nachahmt. Der Teststand soll im Laufe der Entwicklung und Validierung der Algorithmen als Ersatz für die reale Maschine dienen. Hier sollen verschiedene Lichtverhältnisse, Einbaumaßnahmen, sowie Konfigurationen erprobt werden. Der umgesetzte Aufbau des Prüfstands und der daran befestigten Halterung sind in Abbildung 4 (links) dargestellt. Zum genauen Positionieren der Halbzeuge in der Prozesskammer wurde Spanntechnik vom PA-Mitglied zur Verfügung gestellt, wie in Abbildung 4 (rechts) dargestellt. Die Spanntechnik ist an die Kontur der EOS M290 Bauplattform angepasst und für die Halbzeuge konzipiert worden. Mit dem Nullpunktspannsystem (ZCS) ist es möglich die Halbzeuge mit einer hohen Wiederholgenauigkeit zu platzieren.

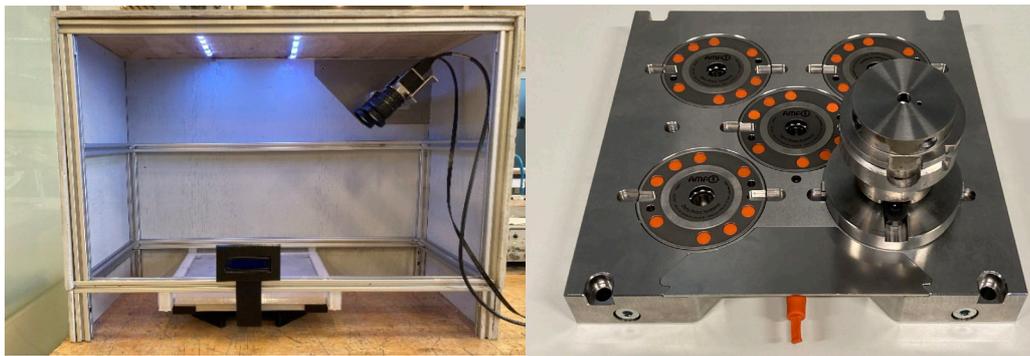


Abbildung 4: Finaler Teststand für das Stereokamerasystem (links), und Modifiziertes Nullpunktspannsystem inkl. des Grundkörpers (rechts)

Ausgehend von den Anforderungen wurde ein Konzept für die Position- und Orientierungsbestimmung des Halbzeugs entworfen, dessen Workflow im Folgenden beschrieben wird. Die Kamera-, Stereo-Kalibrierung und Stereo-Rektifikation werden nach bekannten Methoden aus der Literatur [1, 2] durchgeführt. Für die Kalibrierung des Stereo-Systems im Bezug auf die Geometrie einer bekannten LBM Substratplatte wird die Perspective-n-Point Methode angewendet [3]. Diese Methode beinhaltet die Bestimmung der Projektionsmatrix, die die Orientierung und Position einer kalibrierten Kamera relativ zu einem festgelegten Weltkoordinatensystem (WCF), in dem Fall zur Substratplatte, erfasst. Dies wird durch die Verwendung bekannter Zuordnungen zwischen 3D-Weltpunkten und ihren entsprechenden 2D-Bildprojektionen mit einer bekannten Kameramatrix erreicht. Dafür wurde ein Gittermuster mit definierten Merkmalen auf die Substratplatte eingraviert. Die Merkmale dieses Gittermarkers werden mit im Projekt entwickelten Algorithmen im Bildkoordinatensystem identifiziert und berechnet. Zur Validierung der Berechnung wurde die gravierten Merkmale von einer Koordinatenmessmaschine (CMM) vermessen. Die Koordinaten dieser Merkmale, sowohl aus dem Bild als auch aus dem WCF, werden in den PnP-Algorithmus übertragen, welcher die Transformationsmatrix zwischen dem Stereo-System und dem

Weltkoordinatensystem der Substratplatte berechnet. Abbildung 5 zeigt die erkannten Merkmale im Bild, aus denen das Koordinatensystem gebildet wird.

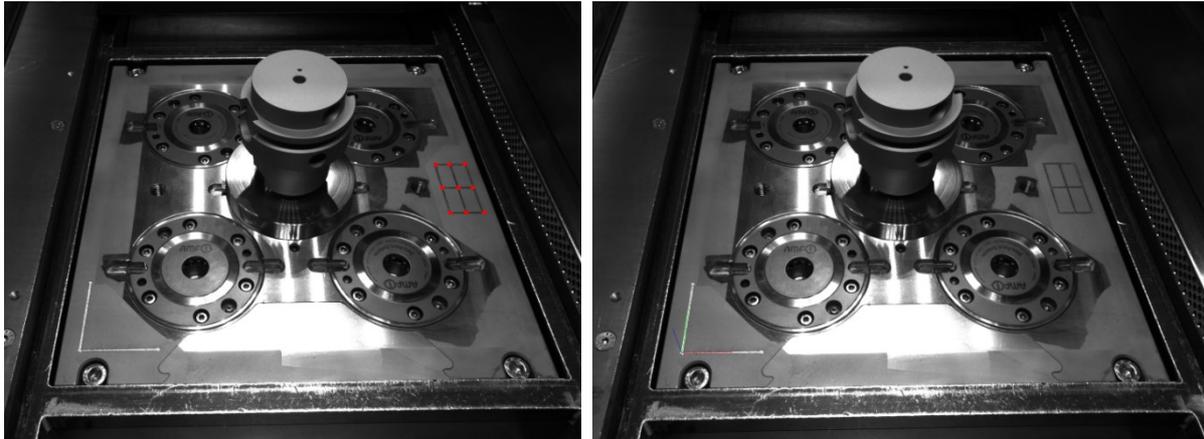


Abbildung 5: Erkennung der Merkmalpunkte aus dem Gittermuster (links) und definiertes Weltkoordinatensystem mit x-Achse (rot), y-Achse (grün) und z-Achse (blau) auf dem gravierten Rahmen (rechts)

Um die Pose des Halbzeugs im Raum bestimmen zu können, muss im ersten Schritt ein Bildpaar vom Stereo-System aufgenommen werden. Anschließend wurde ein Template-Matching implementiert, um die Oberfläche des Halbzeugs effektiv zu detektieren und den Bereich des Bildes auf das Wesentliche zu reduzieren. Diese Bilder werden dann unter Verwendung der gespeicherten Parameter aus der Kalibrierungsphase rektifiziert. Darauf wurde der Canny- Kantendetektionsalgorithmus [4] angewendet, um die äußeren Kanten des Halbzeugs, sowie weitere relevante Merkmale zu extrahieren. Die Koordinaten der erkannten Kanten werden aus beiden Bildern extrahiert. Diese entsprechenden Koordinaten werden dann unter Verwendung eines Stereo-Korrespondenzalgorithmus abgeglichen. Zur Bewältigung von Beleuchtungsvariationen und Intensitätsänderungen wird dafür der Zero-Mean Normalized Cross-Correlation Algorithmus [5] eingesetzt. Die identifizierten, korrespondierenden Punkte aus dem Bildpaar werden für die Stereo-Triangulation verwendet, um die 3D-Punkte zu berechnen, was in einer Punktwolke resultiert. Diese Koordinaten werden dann unter Verwendung der während der Stereo-Substratplattenkalibrierung erhaltenen Projektionsmatrix in das WCF auf der Substratplatte transformiert. Zusätzlich wird die Punktwolke des CAD-Modells importiert und auf dasselbe WCF ausgerichtet. Der letzte Schritt ist die Registrierung der triangulierten Punktwolke und der CAD-Punktwolke, wodurch die 6D-Pose bestimmt wird, die für die Korrektur der Positionierung der additiven Strukturen auf dem Halbzeug genutzt werden kann.

Der entwickelte Workflow bietet die Möglichkeit weitere Funktionen in den hybriden LBM-Prozess einzubeziehen, z.B. der Nivellierungsvorgang und das Ankratzen, welche im HyFAS-Projekt demonstriert wurden. Der Nivellierungsvorgang richtet die Oberfläche des Halbzeugs auf die Bearbeitungsebene der Maschine aus und ermöglicht es im Falle der hybriden Fertigung einen Knick in der Werkzeugachse des Halbzeugs zu vermeiden. Es wurden mehrere Konzepte während des Projekts untersucht, welche mit dem Einsatz der Stereo-Kamera beim Nivellieren unterstützen könnten. Das erfolgreichste Konzept benötigt eine dünne Kalibrationsplatte, welche passgenau zwischen der Bauplattform und dem Maschinenrahmen integriert wird. Auf der Kalibrationsplatte befinden sich definierte und leicht detektierbare Marker, aus denen nach der PnP-Methode ein Koordinatensystem definiert wird. Die Marker sind durch eine Vermessung in der

Koordinatenmessmaschine eindeutig definiert und ermöglichen eine präzise Koordinatenbestimmung. Durch die gemessene Dicke der Platte kann das Koordinatensystem auf der Z-Achse am Rahmen gesetzt werden, was eine feste Referenz für den Nivelliervorgang bildet. Die integrierte Platte in der Maschine ist in Abbildung 6 dargestellt.

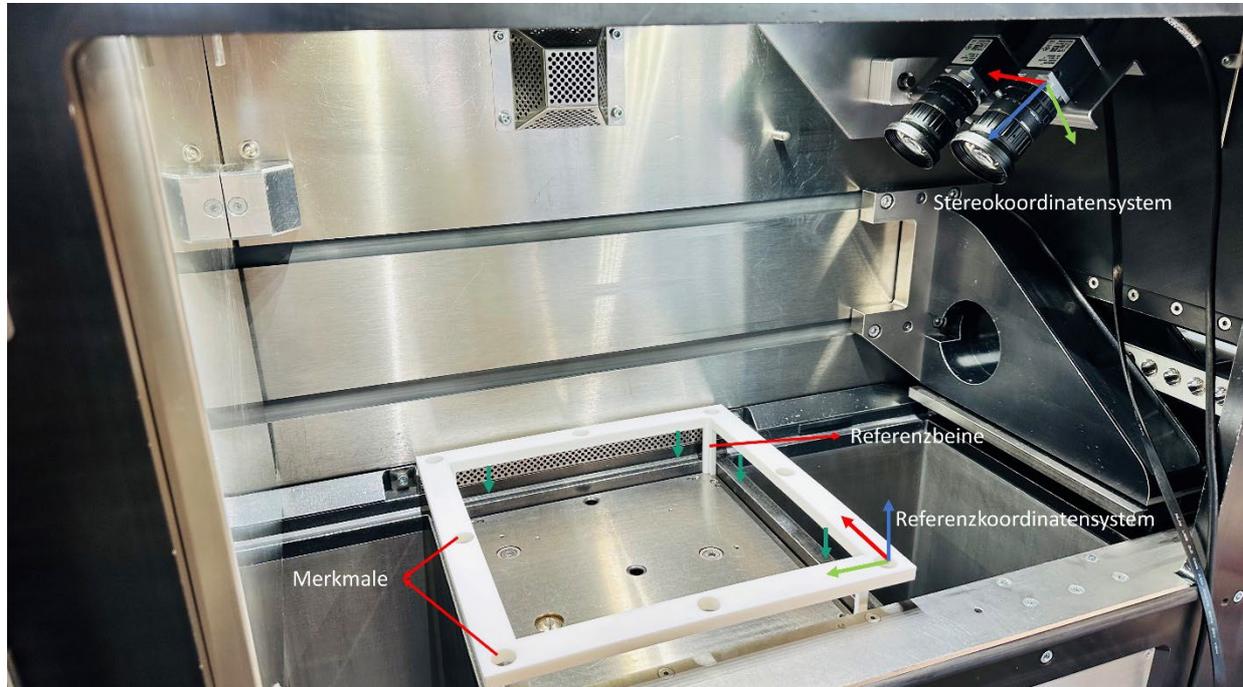


Abbildung 6 : Nivellierungshilfe für EOS M290

Aus der Berechnung der Differenz zwischen der Ausrichtung der Oberfläche des Halbzeugs und des Rahmens, wird dem Nutzer eine Anweisung ausgegeben, wie viel Nivellierung notwendig ist. Damit wurde die Oberfläche zur Bearbeitungsebene ausgerichtet.

Bevor additive Strukturen auf dem Halbzeug platziert werden können, wurde eine Methode entwickelt, die das Ankratzen vereinfacht. Einerseits wird der Abstand zwischen der Halbzeugoberfläche und dem Rahmen ausgegeben. Damit kann die Bauplattform direkt um diese Differenz verfahren werden. Im nächsten Schritt wird die Baukammer mit Pulver gefüllt und mit dem Beschichter glattgezogen. Das Stereo-System wird nun genutzt, um die Kontur des Halbzeugs zu detektieren. Es wird so lange Pulver abgetragen, bis die Kontur sichtbar ist, womit das Ankratzen vom Benutzer nur noch Feinjustiert werden muss.

Sowohl für den Nivellierungsvorgang, als auch für das Ankratzen und das Herausgeben der notwendigen Posekorrektur wurde im Projekt eine simple Benutzeroberfläche entwickelt.

Die Verifizierung beschriebenen Workflows und der entwickelten Algorithmen erfolgte am konstruierten Teststand. Dafür wurden Objekte mit bekannten Maßen gefertigt und in einer Koordinatenmessmaschine präzise vermessen. Nach der Verifikation wurde im nächsten Schritt die Messensorik in die EOS M290 integriert. Abbildung 7 veranschaulicht die Integration des Sensorsystems mit dem Demonstrator auf der dem Nullpunktspannsystem innerhalb der EOS M290 Prozesskammer.

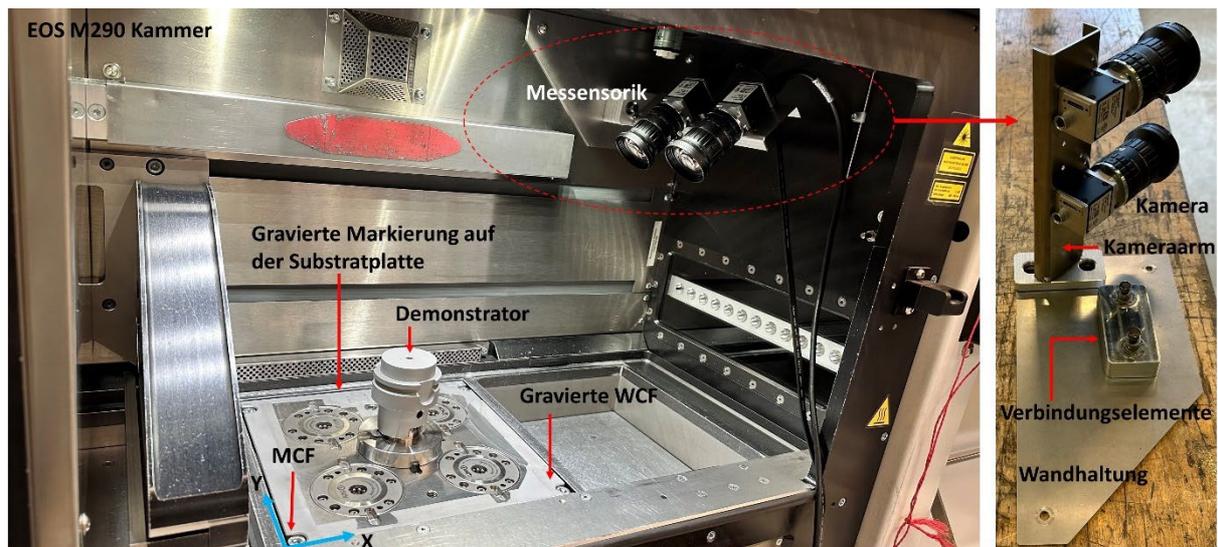


Abbildung 7: Integrierte Messensorik in der EOS M290 Prozesskammer

Mit der Installation des entwickelten Stereo-Systems in der EOS M290-Kammer wurden erste Tests durchgeführt, indem eine Schicht auf das Halbzeug aufgetragen wurde. Drei Validierungstests wurden durchgeführt. Über den Vergleich der Mittelpunkte mittels eines Mikroskops zwischen der aufgetragenen Schicht und der originalen Halbzeugoberfläche wurde die Verschiebung in den X-, Y, sowie die Drehung um Z bestimmt. Die beobachteten Fehler waren kumulativ und stammten sowohl vom Stereo-System als auch von der unbekannt exakten Position des vom Laser verwendeten Maschinenkoordinatensystems. Es wurde angenommen, dass sich das wahre Maschinenkoordinatensystem an der Ecke des Zero Clamping Systems (ZCS) befindet. Daher muss dieser Versatz zwischen dem wahren und dem angenommenen Maschinenkoordinatensystem in den Ergebnissen des Stereo-Systems kompensiert werden, um den Gesamtfehler zu minimieren. Nach der Kompensation wurde das Experiment wiederholt und die Abweichungen erneut vermessen. Die Ergebnisse sind aus Abbildung 8 zu entnehmen.

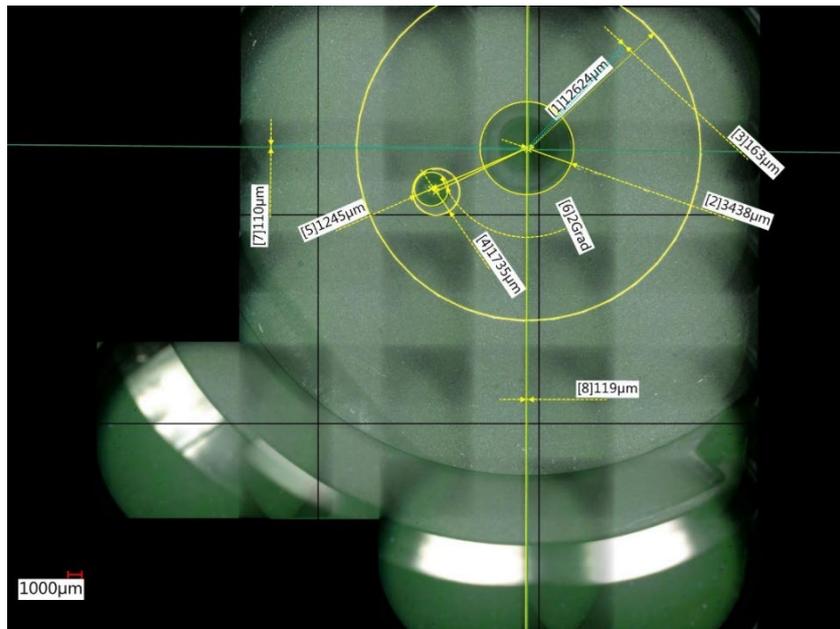


Abbildung 8: Vermessung des Probekörpers

Abbildung 8 zeigt, dass die Verschiebung der ersten additiven Schicht unter $200\ \mu\text{m}$ liegt, wie es im Forschungsziel festgelegt wurde. Basierend auf diesen Ergebnissen aus den Materialtests und der entwickelten Stereo-Sensorik wurde der entwickelte Workflow zum Drucken des bereitgestellten Werkzeugdemonstrator durchgeführt. Abbildung 9 zeigt den erfolgreichen Druckauftrag der AM Strukturen auf der Basis-Komponente.

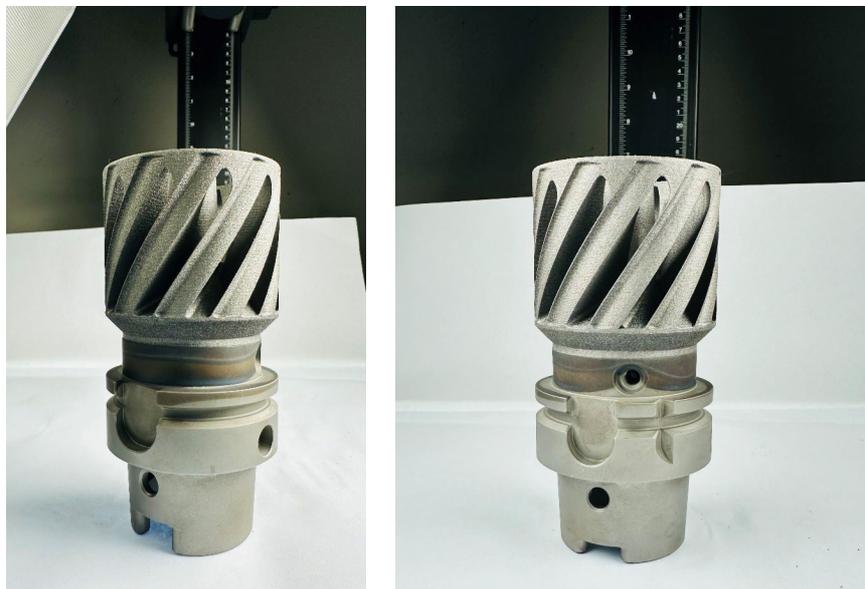


Abbildung 9: Vollständiger, hybrid gefertigter Demonstrator

Damit wurden die gesetzten Teilziele des Projekts erreicht.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde der Prozess der additiven Fertigung auf konventionell gefertigten Bauteilen untersucht. Diese hybride Fertigungsweise bietet ein

großes Potenzial für Kosteneinsparungen und ermöglicht eine wirtschaftliche Fertigung von additiven Strukturen in vielen Bereichen. Ziel des Projekts war es, eine automatisierte Einmesstechnik für die hybride Fertigung zu demonstrieren, um die Position und Orientierung des konventionell gefertigten Halbzeugs im Raum zu bestimmen und bei der Nivellierung und dem Ankratzen zu assistieren.

Im ersten Teilziel wurde die materialtechnische Eignung des Werkstoffs 1.2344 bei hybrider Fertigung untersucht. Verschiedene Prozessparameter wurden ermittelt und Probekörper analysiert, wobei festgestellt wurde, dass das Vorheizen der Bauplattform auf 200°C die Eigenspannungen signifikant reduzierte. Die optimierten Parameter führten zu einer hohen Bauteildichte und guten Oberflächenqualität. Im zweiten Teilziel wurde eine automatisierte Einmesstechnik demonstriert, die additive Strukturen auf konventionell gefertigte Halbzeuge mit einer Präzision von unter 200 µm platzieren kann.

Zusammenfassend konnte das Projekt erfolgreich eine automatisierte Einmesstechnik für die hybride Fertigung demonstrieren und validieren. Diese Technik gewährleistet eine hohe Präzision beim Drucken auf vorgefertigte Teile und kann in LBM-Industrieanlagen integriert werden, was im Zusammenspiel mit dem Untersuchten Material 1.2344 für die additive Fertigung einen konkreten Anwendungsfall im Werkzeugbau liefert. Die Ergebnisse legen den Grundstein für effizientere und kostengünstigere hybride Fertigungsprozesse.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Bohdan Vykhitar unter +49 40 484010786.

Literatur:

- [1] K. Lu, X. Wang, Z. Wang, and L. Wang, "Binocular stereo vision based on OpenCV," in *IET International Conference on Smart and Sustainable City (ICSSC 2011)*, Shanghai, China, 2011, p. 9.
- [2] A. Kaehler and G. R. Bradski, *Learning OpenCV 3: Computer vision in C with the OpenCV library*. Beijing, Boston, Farnham, Sebastopol, Tokyo: O'Reilly, 2017.
- [3] M. L. George Terzakis, Ed., *A Consistently Fast and Globally Optimal Solution to the Perspective-n-Point Problem*: Springer, Cham, Nov. 2020.
- [4] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, PAMI-8, no. 6, pp. 679–698, 1986, doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [5] Y. Raghavender Rao, "APPLICATION OF NORMALIZED CROSS CORRELATION TO IMAGE REGISTRATION," *IJRET*, vol. 03, no. 17, pp. 12–16, 2014, doi: 10.15623/ijret.2014.0317003.