

Teil I: Kurzbericht zum Verbundprojekt: Vollautomatisierte Additive Fertigung mit DED-Verfahren für die automobiler Serienproduktion (AdDEDValue) - Teilvorhaben: Integrierte Prozessplanung und adaptive Steuerung - FKZ: 13IK002E

Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Stand

Das Teilprojekt der Siemens AG zielte auf die Optimierung der additiven Fertigung (Direct-Energy-Deposition, DED) durch Digitalisierung und Automatisierung ab. Die zentrale Aufgabe war, die Planbarkeit der Bearbeitungsprozesse zu verbessern und die Effizienz sowie Produktqualität zu steigern. Dazu sollten bestehende Simulationswerkzeuge weiterentwickelt werden, um physikalische Effekte besser abzubilden und die Bearbeitungsqualität durch Online-Korrekturen zu optimieren. Ein weiterer Aspekt war die Analyse der Zusammenhänge zwischen Sensorinformationen und Qualitätseigenschaften der Werkstücke, um die Prozessqualität zu überwachen. Die Implementierung einer Closed-Loop-Regelung auf Basis der SINUMERIK-Steuerung sollte die Stabilität der Prozesse gewährleisten. Darüber hinaus sollte eine Verbindung zwischen der Software NX™ CAM und dem SINUMERIK-Steuergerät genutzt werden, um komplexe Bearbeitungen zu optimieren. Die Zusammenarbeit mit Partnern wurde als Schlüssel zur Generierung synergetischer Effekte und zur Förderung innovativer Ansätze betrachtet.

Vorhabensablauf

In AP 2.1 wurde ein Benchmark zwischen Anlagen- und Steuerungskonzepten durchgeführt. Letztlich konnte nach kleineren Anpassungen das existierende Setup mit 6-Achs-Roboter und Drehkipptisch inkl. Steuerungssystem genutzt werden. In AP 2.2 wurde dann eine Traktor-Sitzhalterung von AGCO Fendt als Beispielbauteil ausgewählt, um eine fertigungs- und prozessgerechte Konstruktion für das DED-Verfahren zu realisieren. Das Bauteil wurde unter Berücksichtigung von Leichtbaugesichtspunkten und Festigkeitskriterien topologieoptimiert und das resultierende Volumenmodell den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Zudem wurde mit der Software Siemens NX eine umfassende CAM-Planung durchgeführt.

In AP 3.2 sollte die Anforderungsdefinition der Sensorik hinsichtlich des Prozesses und der Schnittstellen erarbeitet werden. Es wurden eine umfangreiche Bewertung des Prozesses vorgenommen und Sensoren eingebunden. Im folgenden AP 4.3 sollte eine Kontextualisierung und semantische Anreicherung der Daten auf Basis der Anlagenintegration erfolgen. Dazu wurden die gesammelten Daten um Kontext in Bezug auf den Prozess und die Maschine erweitert.

In AP 4.4.1 sollte die Fusion separater Sensordaten mittels geeigneter Ansätze durchgeführt werden. Hierzu wurden die Datenströme synchronisiert und ggf. das Sampling überarbeitet. Weiterhin wurden spezifische Prozesswerte aus Prozesskennwerten abgeleitet. In AP 4.4.2 sollte dann eine datenbasierte Modellbildung zur Prozessbewertung erfolgen. Hierzu wurde zunächst ein vertieftes Datenverständnis auf Basis des Business-Verständnisses aufgebaut. In AP 4.4.3 wurden auf Basis der Daten aus AP 4.4.1 Machine Learning-Ansätze entwickelt. Nachdem die Daten entsprechend aufbereitet wurden, wurden verschiedene Modelle des Maschinellen Lernens trainiert und evaluiert. In AP 4.4.4 sollte die entwickelte Datenpipeline in die Prozesskettenhierarchie überführt werden. Dazu wurde eine Architektur basierend auf Cloud-, Edge- und Steuerungsebene erstellt.

In AP 5.1.1 sollte die Datenkette mit geeigneten Softwaremodulen aufgestellt werden. Hier wurde die definierte Architektur umgesetzt und sichergestellt, dass die Daten der angebotenen Sensoren über einen Bewertungsschritt auf der Edge in die Cloud und den zugehörigen Data Lake transferiert werden konnten.

In AP 5.1.2/3 lag der Fokus auf der Modellbildung der Prozesse unter Verwendung bestehender Datenmodelle. Hierbei wurden Finite-Elemente-Modelle (FEA) entwickelt, die auf physikalischen Mess- und Materialdaten basierten. Ein kalibriertes FE-Modell in voller Auflösung wurde bei unserem Projektpartner TUM erstellt, während Siemens ein optimiertes FEA-Modell mit verbesserter Rechenzeit präsentierte. Im verbundenen AP 5.1.4 (Modellkalibrierung und -validierung) wurde die Kalibrierung und Validierung der Modelle anhand von Sensordaten vorgenommen, wobei zunächst an Demonstratoren eine erste Kalibrierung durchgeführt und thermische Hotspots identifiziert wurden. In AP 5.1.5 wurde ein validiertes Prozessmodell zur optimalen Auslegung erstellt. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Ansätze verfolgt, die im ausführlichen Bericht beschrieben

sind. Erfolgreich implementiert wurde am Ende ein Modell auf Basis der Finite-Volumen-Methode, welches die Rechenzeit um den Faktor 100 bis 1000 reduzierte. Die Validierung dieses Modells wurde anhand des Vollmodells aus AP 5.1.4 vorgenommen, was die Verlässlichkeit der Ergebnisse weiter erhöhte. Weiter sollte in AP 5.2.1 die Segmentierung des Bauteils anhand prozessrelevanter Geometriefeatures erfolgen. Hier wurde untersucht, wie featurebasierte Algorithmen genutzt werden können. Insbesondere wurde dafür bewertet, welche Geometrien relevant für den WAAM-Prozess sind und welche Gemeinsamkeiten sie aufweisen. In den APs 5.2.2/3 wurde eine simulationsgestützte Bahnplanung durchgeführt, bei der sowohl Voll- als auch Ersatzmodelle zur Detektion von thermischen Hotspots verwendet wurden. Durch die Variation von Bahnplanungsstrategien wie Zig-Zag und Raster konnten Ansätze identifiziert werden, um thermischen Problemen während der Bearbeitung gezielt entgegenzuwirken. Dies umfasste das Einlesen von Pfaddaten, Mapping, Simulation und Ergebnisauswertung anhand des realen Drucks. In AP 6.1.1 stand dann die Aufstellung eines Systemmodells für die Reglerkonzeption im Vordergrund. Hier wurde die prototypenhafte Ermöglichung einer MQTT-Anbindung des Ersatzmodells realisiert, für zeitgerechte Datenübertragung in der Reglerkonzeption. Es wurden zudem ausführliche Tests und Parameterstudien gemacht, um das System und dessen Reaktion auf Änderungen bewerten zu können.

In AP 6.1.2 sollten eine robuste Regelstrategie entwickelt und die Reglerparameter ermittelt werden. Es wurden verschiedene Reglerarchitekturen (P, PD, PID, MPC) untersucht. Anschließend sollte in AP 6.2.1 die Implementierung der Regelstrukturen in die Anlagensteuerung und deren Validierung vorgenommen werden. Dazu wurden entsprechende Schnittstellen und Programme für die NC-Steuerung aufgebaut. In AP 6.2.2 sollte die Verwendung von Digitalen Zwillingen zur robusten Steuerungsauslegung integriert werden. Dafür wurden Methoden zum Aufbau von Digitalen Zwillingen des Bauteils und der Fertigungsanlage untersucht. Im folgenden AP 6.2.3 sollte eine intuitive Bedienbarkeit der Steuerungskonfiguration aufgebaut werden. Dafür wurde die Sinumerik-Benutzeroberfläche genutzt, welche in der Fertigung hohe Verbreitung findet.

In AP 7.1 sollte die Near-Netshape-optimierte Bauteilbearbeitung unter Verwendung des digitalen Zwillings erfolgen. Dazu wurde in Kooperation mit der TUM und Königmetall das Bauteil so aufbereitet, dass dort die Fräsversuche umgesetzt werden konnten, die beim Baustahl des Beispielbauteils am Roboter in den Siemens-Laboren nicht möglich waren. In AP 7.2 sollte die iterative Prozesskettenoptimierung durch Integration des digitalen Zwillings für Dokumentation und Qualitätssicherung erfolgen. Dies wurde insbesondere für die Prozessparameterstudien intensiv genutzt. Dann sollte in AP 8.2 die bestehende Demonstratorzelle um die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse und Sensoren erweitert werden. Die Ergebnisse konnten aufgrund der starken Unterschiede in den Prozessen nicht übertragen werden. In AP 8.3 wurde die Prozess- und Regelungstechnik aus den vorherigen APs in einer Roboterzelle implementiert.

Schließlich wurden In AP 8.4 die Produktivität und Prozessqualität durch Simulationsergebnisse in der aufgebauten Demonstratorzelle erhöht. Dafür kamen digitale Zwillinge zum Einsatz.

Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Die Hauptergebnisse des Teilprojekts waren:

- (1) Optimierte Bauteilgestaltung: Die Traktor-Sitzhalterung von AGCO Fendt wurde erfolgreich für das DED-Verfahren topologieoptimiert und ein praxiserreichtes Volumenmodell bereitgestellt.
- (2) Entwicklung leistungsfähiger Simulations- und Modellierungsansätze: Ein kalibriertes FE-Modell sowie ein hybrid reduziertes Modell auf Basis der Finite-Volumen-Methode wurden entwickelt, was die Rechenzeit signifikant reduzierte.
- (3) Prozessüberwachung inklusive durchgängiger Datenkette: Es wurde ein System zur Datenaufnahme, -auswertung und -bereitstellung aufgebaut, mit welchem Prozessdaten aufbereitet und strukturiert abgelegt werden können.
- (4) Aufbau eines Beispielbauteils: die Traktor-Sitzhalterung von AGCO Fendt wurde erfolgreich in mehreren Versionen basierend auf einer kompletten, digitalen Prozessplanung aufgebaut und an die Partner zur fräsenden Weiterbearbeitung übergeben.

Die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen ergab sich im Bereich der Materialdaten, Austausch kalibrierter Simulationsdaten (TUM), Zusammenarbeit bei der Datenhaltung und Datenauswertung (iSYS, VW) sowie in der Bereitstellung gedruckter Teile für das Postprocessing (TUM, Königmetall).