

Öffentlicher Ergebnisbericht

KMU-innovativ

„EddyPrint3D“

(23.10.2023)

Vorhaben-Name:

Evolution der Hochfrequenzwirbelstromprüfung für die Regelung innovativer
Fertigungsprozesse am Beispiel 3D-Funktionsdruck

Laufzeit:

01.03.2021 – 28.02.2023

SURAGUS GmbH Maria-Reiche-Straße 1 01109 Dresden Telefon +49 (0) 351 – 32 111 500 Email info@surgus.com	Fraunhofer IWU Nöthnitzer Str. 44, 01187 Dresden Telefon +49 351 4772-2200 Email
---	--

Ergebnisbericht

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	2
1	Schlagworte	3
2	Kurzfassung.....	4
3	Ziel des Vorhabens	5
4	Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde	6
5	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens	7
6	Ergebnisse (öffentliche)	10

Ergebnisbericht

1 Schlagworte

Printed Electronics, Wirbelstromprüftechnik, Prozessreglung, Jet-Dispensing, functional printing

2 Kurzfassung

Das Hauptziel dieses Projekts ist die Weiterentwicklung des Hochfrequenz-Wirbelstromprüfverfahrens für 3D-Anwendungen am Beispiel des Funktionsdrucks (Jet-Dispensen). Im Projekt wurde ein neuartiges Wirbelstromprüfsystem entwickelt, welches genaue Qualitätskontrolle der gedruckten Strukturen an kontinuierlichen Leiterbahnen oder der Gesamtstruktur erlaubt. Mittels den entwickelten Wirbelstromsensoren wurde eine Druckregelung sowie eine Sinterprozessregelung (für IR-Spot) für Druck auf 3D-Formen realisiert, was die Qualität des Produkts deutlich erhöht und die Technologie von Funktionsdruck wettbewerbsfähig macht.

Es wurden zahlreiche Algorithmen für die Lösung und Kompensation von Effekten entwickelt, in ein Messsystem integriert und als ganzheitliche Lösung evaluiert. Die Wirksamkeit und Möglichkeiten der weiterentwickelten Wirbelstromtechnologie wurde in einem roboterbasierten Demonstrator für die Produktionstechnologie des Funktionsdrucks, bestehend aus einem 3D-Druckroboter, einer selektiven Sintertechnologie und einem neuen HF Wirbelstrom-Qualitätskontrollsysteem samt neuen Sensoren und Algorithmen zur Störeffektkompensation erfolgreich realisiert und evaluiert. Die neuen Lösungen und Fähigkeiten erlauben nun die Charakterierungen von zahlreichen 3D Druckprozessen von leitfähigen Werkstoffen sowie deren Anwendung für die Charakterisierung und Reglung von Druck-, Trocknungs- und Sinterprozessen.

3 Ziel des Vorhabens

Das Hauptziel des Projekts lag in der Weiterentwicklung des Hochfrequenz-Wirbelstromverfahrens für 3D-Anwendungen am Beispiel des Funktionsdrucks. Dabei sollte ein neuartiges inline Mess- und Regelungssystem für die Qualitätskontrolle von 3D-Druckstrukturen auf Basis der Wirbelstromprüftechnik geschaffen und eine gezielte selektive thermische Nachbehandlung realisiert werden. Das Projektziel war die Entwicklung eines Demonstrators für die Produktionstechnologie des Funktionsdrucks, der aus einem 3D-Druckroboter, einer speziellen selektiven neuen Sintertechnologie und neuen HF Wirbelstrom-Qualitätskontrollsysteem besteht. Die folgende Abb. stellt die Prozessreglung, die eingesetzte Sensorik und deren Steuerungskonzept dar.

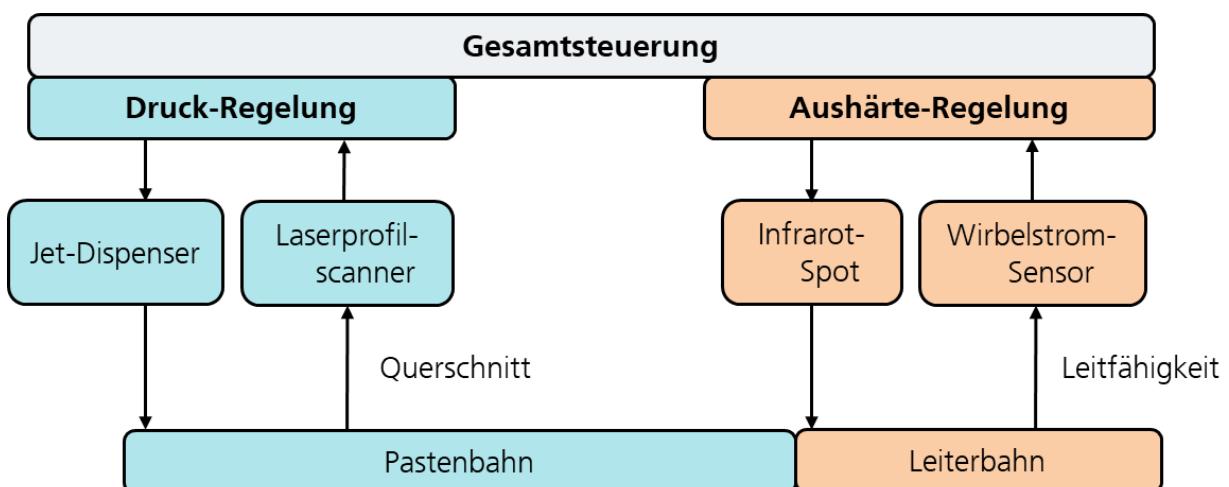


Abbildung 1- Übersicht Druck- und Aushärteregelung

Die Wirksamkeit der weiterentwickelten Wirbelstromtechnologie soll in Form eines Demonstrators gezeigt werden, der dazu beitragen kann, die Häufigkeit von Defekten während Druck- und Nachbehandlungsprozessen automatisch im Prozess zu ermitteln. Ziel war es, die Fehlerrate und Umrüstzeiten zu minimieren, indem der Druckprozess direkt kontrolliert und gesteuert wird. Damit wurde das WS-Verfahren befähigt, die Qualität gedruckter Funktionselemente auf komplexen 3D-Oberflächen zu charakterisieren. Die damit ermöglichte Lösung bietet erstmals die Möglichkeit industriell serientaugliche Ausbeuten in einer einzigen Anlage ohne Transfer in Heizöfen zu realisieren. Das Konzept und die Lösung haben das Potenzial in der Fertigungsindustrie, insbesondere in Branchen wie Smart Textiles und Automotive, aber

Ergebnisbericht

auch Energiespeicher und Display, einen wichtigen Lösungsbeitrag zu leisten, um Kampagnenwechsel und Rezeptänderungen unter hohen Kostendrücken zu bewältigen und Downtime der Anlagen zu minimieren.

Die Aufgabenstellung für SURAGUS bestand in der Adressierung vieler kleiner und großer Herausforderungen im Bereich Sensorik, Algorithmik und Automatisierung. In Zusammenarbeit mit dem IWU galt es, sukzessiv Lösungen zu entwickeln und zu validieren und zu zeigen, dass das in Abb.1 angestrebte Konzept realisierbar ist. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

4 Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde

Die SURAGUS GmbH ist ein Dresdner KMU, welches inline- und offline-Sensoren sowie Prüfsysteme auf Basis der Hochfrequenz-Wirbelstrom-Technologie entwickelt, fertigt und vertreibt. Das interdisziplinäre Team mit einer hohen akademischen Quote verfügt über Kompetenzen in der Entwicklung von Elektronik, Firmware, Software und Anwendungen. Das Team ist auch im Projektzeitraum deutlich gewachsen. Schwierig war teilweise die Verfügbarkeit von elektronischen Komponenten, welche aber gelöst werden konnte.

Das Projekt fügt sich in die Unternehmensstrategie ein. Ziel ist es weniger Laborsysteme und mehr inline Systeme in größeren Stückzahlen in wachsende und auch neue Märkte bzw. Anwendungen zu verkaufen. Dafür sollen wichtige technologische Weiterentwicklung und neue Möglichkeiten aktueller Mikrochips bzw. Rechenleistung und Signalverarbeitungsmöglichkeiten genutzt werden und eine neue Generation von inline Messtechnik entstehen. Entsprechende Entwicklungen und Strategien wurden schon vor dem Projekt entwickelt. Notwenige Vorkenntnisse waren vorhanden und das vorliegende Vorhaben fügt sich in diese Strategie ein. Begleitet wurde das Vorhaben von Corona, dann von Lieferengpässen und nun einem sehr schwierigen Markt gute Mitarbeiter zu finden und zu wachsen.

Das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) verfügt über ausgewiesene Expertise in der Entwicklung von Sensoren für Produktionssysteme und der Integration dieser Sensor technologien zur automatischen kontinuierlichen

Ergebnisbericht

Produktionsprozessregelung. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Integration von Sensoren in Produktionssysteme und der Entwicklung von Prozesssteuerungsalgorithmen.

Die Voraussetzungen waren aufgrund der Expertise der Wissenschaftler und Entwicklerteams beim IWU und bei SURAGUS sehr gut. Auch war die räumliche Nähe vorteilhaft, wodurch immer wieder auch kurzfristige gegenseitige Unterstützung vor Ort möglich war. So konnten die wissenschaftlichen Methodenkenntnisse des IWU zur Integration von Sensoren in Produktionssysteme und zur Entwicklung von Prozesssteuerungsalgorithmen genutzt werden. SURAGUS konnte die umfangreichen Kenntnisse in Bezug zur Wirbelstrom-Messtechnik einbringen. Zusammen könnte so der weltweit erste Demonstrator für einen auf die elektrische Funktionsfähig geregelte funktionsdruck entstehen.

5 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens

Drucken

Zu Beginn den Vorhabens, war der Druckprozess mit den Haupteinflussgrößen verstanden. Erste Prozessmodelle waren ebenfalls schon erstellt. Die Versuchsdurchführung bestand zum Großteil im manuellen Einstellen von Parametersätzen und in der ebenfalls manuellen Vermessen der gedruckten Strukturen. Als Hauptanwendungsfeld war dabei das planare 2D-Bedrucken von Substraten zu nennen.

Während des Projektes wurde die Versuchsdurchführung komplett automatisiert, sodass nun Parametersätze automatisiert gedruckt werden können. Dadurch ist es möglich, sehr zeiteffizient gute Prozessfenster für die Pasten-Substrat-Kombination zu ermitteln. Die Vermessung läuft dabei ebenfalls automatisiert über den integrierten Laserprofilscanner und wird den Parametersätzen zugeordnet. Dadurch kann im Nachgang mit Auswertescripten, sehr zeit- und resourceneffiziente Versuche durchgeführt werden.

Dies war die Grundlage um die Prozessmodelle für den Roboter im 3D-Anwendungsfall zu validieren. Dabei konnten keine geometrischen Abweichungen bis 30° festgestellt werden.

Ergebnisbericht

Thermische Nachbehandlung

Zu Beginn des Vorhabens war die Standardnachbehandlungsmethode am Fraunhofer IWU und auch im industriellen Umfeld das Ofentrocknen der noch feuchten Pasten. Die Verweildauer ist abhängig vom Funktionsfluid, der Temperaturstabilität des Substrats und der anwendbaren Temperatur zum Herstellen einer Leitfähigkeit. Typische Werte sind dabei 10-20min bei 100 bis 200°C. Werden größere Bauteileabmessungen angestrebt, muss dabei nicht nur das Produktionssystem für den Druck größer werden, sondern auch der Ofen. Deswegen war es Ziel im Vorhaben, eine selektive, thermische Nachbehandlung zu etablieren.

Im Laufe des Projektes, ist ein Infrarot-Spot von ATN benutzt wurden, um die noch feuchten Pastenbahnen lokal und selektiv auszuhärten. Dadurch wird nicht nur das umgebende Substratmaterial vor einer unzulässig hohen thermischen Einwirkung geschützt, sondern auch deutlich mehr Energie eingespart da nur noch die Pastenbahn erwärmt wird und nicht mehr das gesamte Bauteil. Dies ist also nicht nur ein großer Produktionstechnischer Fortschritt, sondern auch ein wichtiger Beitrag für die resourcenschonende Fertigung.

Durch die erstellten Prozessmodelle ist dieser selektive Aushärteprozess nicht nur qualitativ verstanden, sondern auch quantitativ spezifiziert wurden. Prozess- und Einstellgrenzen wurden dabei ermittelt und sind ein wichtiges Mittel zur Prozessplanung.

Das Ziel „Die Entwicklung von Prozessmodellen mit einer Modellgüte von 95% und einer Standardabweichung des Widerstands von weniger als 3%“ wurde erreicht.

Produktionssystem

Zu Beginn des Vorhabens waren die genannten Prozesse für den Funktionsdruck auf konventionellen CNC-Anlagen am Fraunhofer IWU als auch von Seiten der Industrie etabliert. Diese bieten neben dem kostengünstigen Aufbau auch eine sehr gute Positionier- und Wiederholgenauigkeit. Problematisch ist dabei der große Bauraum. Alle Verfahrwege der Achsen müssen mindestens so groß gewählt werden, damit später die zu bearbeitenden Bauteilgeometrien abgedeckt sind. Ebenso ist die 3D-Fähigkeit der Anlagen begrenzt durch den meist starren und kartesischen Aufbau.

Ergebnisbericht

Während des Projektes, konnte alle Werkzeuge und Verfahren auf ein roboterbasiertes Produktionssystem übertragen werden. Roboterarme haben ihren festen Platz in industriellen Fertigungsstraßen. Sie können die Probleme wie das Bauraum-Verfahrweg-Verhältnis und die 3D-Fähigkeit der CNC-Anlagen beheben und dabei flexibel eingesetzt werden. Durch die Nutzung und Überführung der Prozesse des Funktionsdruckes ist ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung des industriellen Einsatzes des Funktionsdruckes gemacht wurden. Ebenfalls können nun erstmal sehr große Bauteile funktionalisiert werden. Das Ziel "Die Entwicklung einer Regelung für den gesamten Druckprozess (Drucken & Sintern) an einem roboterbasierten, flexiblen Produktionssystem" wurde erreicht.

Messsystem

SURAGUS war zu Beginn des Vorhabens ein etwa 10 Jahres junges Unternehmen, welche auf Wirbelstromsensoren spezialisiert war und ist. Die Entwicklung neuer Messtechnik ist sehr umfangreich, da eine Vielzahl von unterschiedlichen Entwicklern bzw. Wissenschaftlern mit diversen Kompetenzen benötigt werden. Es wurden eine Vielzahl von Komponenten zunächst virtuell entworfen, dann physisch hergestellt und dann programmiert. Der Einsatz von sogenannten FPGAs, welche eine enorm schnelle Datenverarbeitung zulassen ohne, dass kleine Unternehmen sich auf ihre Anforderung zugeschnittene Microchips designen lassen müssen, erlaubt zwar auch kleinen Unternehmen, das Erreichen von hoch performanten Lösungen, aber ist der Entwickleraufwand und das Systemdesign sehr komplex. Das hier entwickelte Gesamtsystem besteht aus einer Vielzahl von Funktionsgruppen, welche je aus einer oder mehreren Elektroniken bestehen, welche wiederum aus mehreren programmierbaren Logik- und Signalverarbeitungsbauelementen z.B. ICs und oder einem FPGA bestehen und je programmiert und die Signal- und Steuerkette vernetzt werden muss. Zudem müssen wesentliche Parameter und Signale an eine Benutzeroberfläche geführt und zusätzlich für Industrieschnittstellen, welche selbst auch sehr komplex sein können und eigene Hardwaremodule erfordern, bereitstellen. Ziel des Vorhabens, war es dann, das Konzept für einen bestimmten Bereich, hier den Bereich des Funktionsdruckes nutzbar zu machen und zu optimieren und die technologischen Grenzen weiter zu verschieben. Dafür wurden Elektroniken entwickelt und programmiert und in die Architektur eingebunden. Auch wurden Sensoren und Algorithmen entwickelt, zusätzlich

Ergebnisbericht

Entwicklungsumgebungen und Testumgebungen geschaffen und anwendungsspezifische Lösungen entwickelt.

6 Ergebnisse (öffentliche)

Messsystem

Wesentliches Ziel war es die Sensorsensitivität erhöhen, Störeinflüsse zu minimieren, die Messstabilität erhöhen und Strukturvielfalt von gedruckten Elektroniken bewältigen und so Sensoren für die Reglung von Druckprozessen anzubieten zu können. Dafür wurde ein aktives Temperierungselement für thermische Signalstabilisierung des Sensors entwickelt. Auch wurden Sensoren speziell für die Prüfung von kleinen Bahnstrukturen mit Feldfokussierung und kleinsten Spulendurchmessern entwickelt und neue Methode für die Signalaufbereitung, Messwertermittlung, Abstandskompensation, Driftkompensation und Strukturbewertung konzipiert. Die Signalverarbeitung erfolgt im Ergebnis in einer ultraschnellen FPGA und IC basierten Systemarchitektur, welche auch sehr komplexe Algorithmen in Echtzeit verarbeiten kann. Zudem wurden Benutzer- und Industrieschnittstellen geschaffen und auch Kalibrier- und Prüfstrukturen für den roboterbasierten Funktionsdruck und auch den industriell weit verbreiteten Siebdruck erstellt. Die wesentlichen Ergebnisse im Vorhaben lassen sich in die Segmente: Elektronik, Sensorik, Prüfstrukturen, Messergebnisse und Prüfstand einteilen.

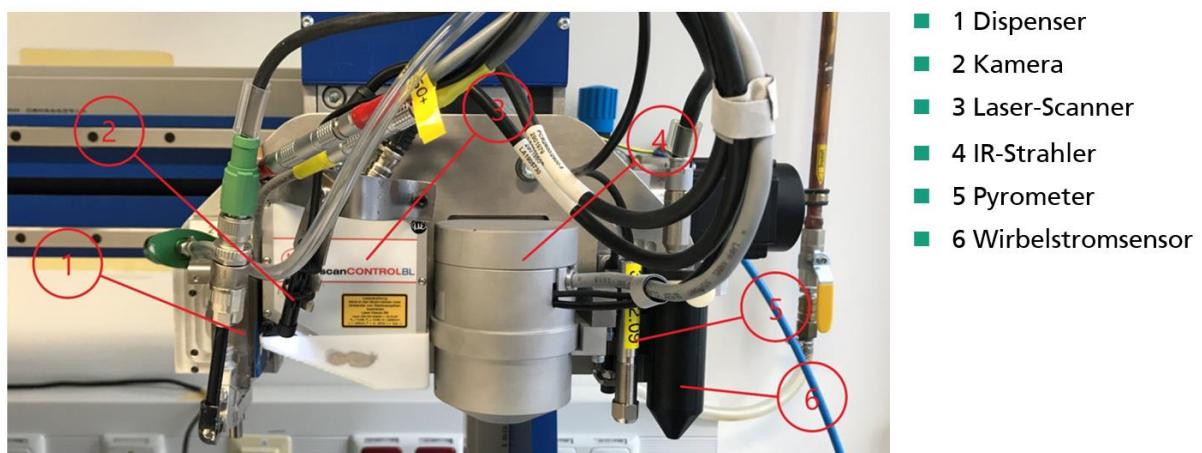


Abbildung 2 - Systemaufbau

Ergebnisbericht

Druckprozess

Für die Erstellung des Prozessmodells zur Herstellung von Leiterbahnen auf Leiterplatten wurden statistische Versuchsplanungsmethoden angewendet. Dabei wurde der Einfluss von verschiedenen Druckparametern wie der Öffnungszeit, der Fallzeit, der Schussdichte und der Verzögerungszeit auf die geometrische Form der Pastenbahn untersucht. Die Auswertung ergab, dass nur die Schussdichte einen signifikanten Einfluss auf den Leiterbahnquerschnitt hat.

Um das Prozessmodell zu erstellen, wurden systematisch Druckversuche mit verschiedenen Schussdichten und Winkeln durchgeführt. Die geometrischen Parameter der Pastenbahn, wie Querschnitt, Breite und Höhe, wurden als Ausgangsgrößen definiert und mit einem Laserprofil-Scanner gemessen. Das Prozessmodell wurde als quadratische Polynomgleichung formuliert, die den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen beschreibt. Das angepasste Bestimmtheitsmaß wurde zur Bewertung und Verifikation des Modells berechnet.

Die Schussdichte ist dabei definiert als die Anzahl der Jet-Schüsse, die pro Weglänge (Millimeter) abgegeben werden (vgl. Abbildung 3). Je höher die Schussdichte, desto größer der Leiterbahnquerschnitt. Diese Variable ist für verschiedene Modelle an Jet-Dispensern universell einsetzbar und ermöglicht die Übertragbarkeit des Prozessmodells auf weitere Geräte. Schussdichten zwischen 3 und 20mm⁻¹ wurden untersucht.

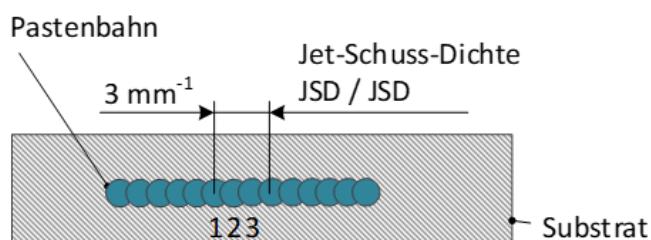


Abbildung 3 - Konzeptdarstellung Schussdichte

Konstante Parameter für das Prozessmodell sind der Düsendurchmesser (70 µm), der Kartuschendruck (2 bar), der Druckabstand (3 mm) und die Drucktemperatur (40°C).

Aus den Druckversuchen konnte ein Prozessfenster ermittelt werden, in dem die Breite und der Querschnitt der Pastenbahn variiert werden können. Das Prozessfenster wird durch die Umrandungslinien in Abbildung visualisiert. Dies ermöglicht die Planung des Druckprozesses

Ergebnisbericht

durch Festlegung des Pastenbahnquerschnitts und des möglichen Stellbereichs der Pastenbahnbreite. Ein ähnlicher Zusammenhang konnte auch für die Pastenbahnhöhe gefunden

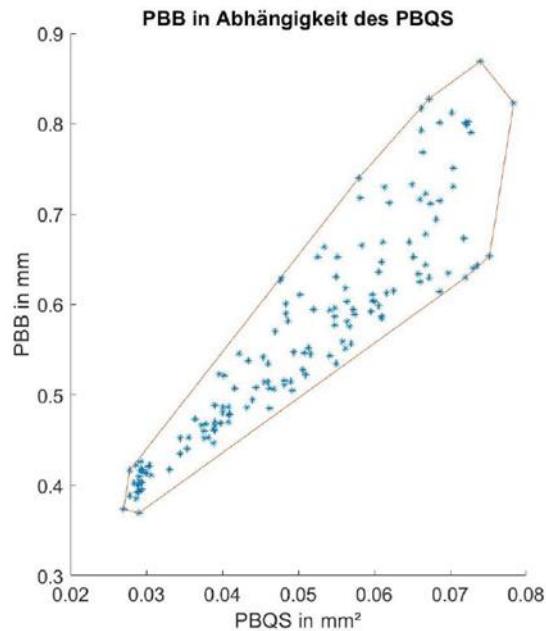


Abbildung 4 - Pastenbahnbreite (PBB) in Abhängigkeit zur Pastenbahnquerschnitt (PBQS) werden.

Das Prozessmodell und das ermittelte Prozessfenster sind hilfreiche Werkzeuge für die Erstellung von Drucklayouts mit passenden Druckparametern.

Ergebnisbericht

Teststrukturen

Es wurden in Zusammenarbeit mit dem IWU diverse gedruckte Strukturen in einem rollierenden Prozess der Sensorentwicklung vermessen. Dabei ging es vor allem darum Defekte, Schwankungen des Linien- oder Flächenwiderstandes und Kurzschlüsse zu detektieren (Abbildung 5, 6). Einige Ergebnisse sind nachfolgend darstellt:

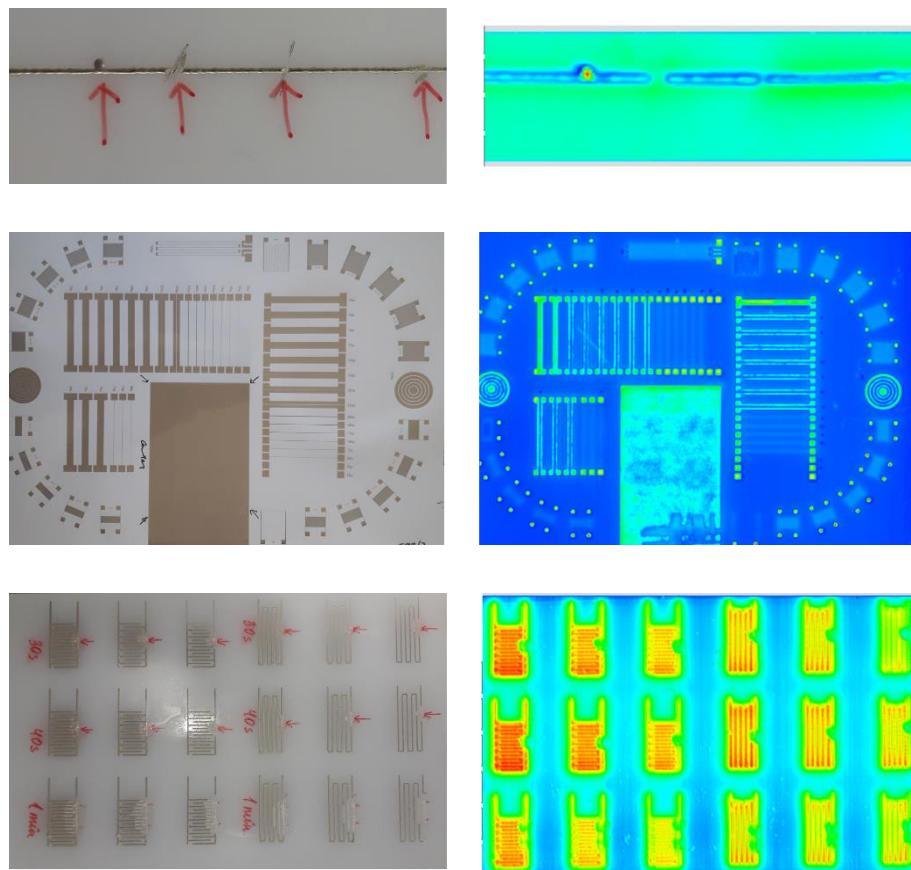


Abbildung 5 - Beispielergebnisse Vermessung diverser Teststrukturen, links Foto, rechts Wirbelstromscan



Abbildung 6 - Konzept von Prüfstrukturen

Ergebnisbericht

Prüfstrukturen für schnelle Prozessbewertung in 3D-Druckautomaten

Die adressierte Beispielanwendung im Vorhaben beruht auf einem Druck- und Trocken- bzw. Sinter-Prozess, welcher eine sehr große Flexibilität ermöglicht. Es können kleine Stückzahlen schnell hergestellt oder oft wechselnde Drucklayouts verwendet werden. Da potentielle Verwender des Systems eher keine Programmierer ständig verfügbar haben, welche sich dann um die Bahnplanung für den Wirbelstromsensor und die Bestimmung von akzeptablen Schwellwerten vornehmen können, wird eine in der Halbleiterwelt gängigen Strategie angewandt, nämlich dem Arbeiten mit Prüffeldern, welche möglichst den gesamten Prozess charakterisieren. Ziel war es also Prüfstrukturen zu entwickeln, welche Pastenvariationen, Druck und Sintervariationen aufzeigen würden und gleichzeitig wenig Fläche, Druckzeit und Materialkosten (Silber) verursachen würden.

Die Entwicklung beruhte auf einer Anforderungsanalyse. Hier wurden zunächst Fehlerquellen ausgehend vom Pastenmaterial, von der Pastenvorbereitung bzw. Mischung über den Drückprozess für verschiedene Funktionsgruppen und den Sinterprozess analysiert. Darauf basieren wurden Prüfstrukturen entwickelt, welche möglichst nah diese Fehler nachstellen können. Es wurde auf verschiedene Weisen Tests der Druckstrukturen durchgeführt. Diese wurden gedruckt, aus leitfähigen Folien ausgeschnitten oder mittels Leitplattentechnologie umgesetzt. Beispiellayouts sind nachfolgend darstellt.



Abbildung 7 - Beispiellayout von Teststrukturen auf Leiterplattenbasis

Ergebnisbericht



Abbildung 8 - Beispiellayout von Teststrukturen bereitgestellt vom IWU

Wesentliches Ziel war die Charakterisierung mit nur einem oder sehr wenigen Messpunkten innerhalb der Teststruktur. Die Struktur sollte repräsentativ für relevante Fehler beim Drucken und Sintern sein. Zudem sollte sie wenig Platz und wenig Paste benötigen. Eine quantitative Bestimmung des Widerstands wurde ebenfalls angestrebt. Die Entwicklungsarbeiten wurden mit unterschiedlichen Sensoren und Testlayouts validiert. Im Ergebnis wurde sich auf Ringstrukturen konzentriert, da diese mit nur einem Messpunkt in der Mitte einen Stromfluss in der Ringstruktur erkennen können und so sehr zeiteffektiv eine ganze Struktur testen kann. Es wurde gezeigt, dass der Durchmesser und Dicke des inneren Rings dominant sind und der Ringwiderstand das Messsignal stark beeinflusst, was für eine quantitative Messung wichtig ist. Es wurde ein optimales Design gewählt.

Weitere Wesentliche Ergebnisse

Die Ergebnisse im Bereich Elektronik, Sensor und Algorithmik werden in einem separaten internen Bericht zusammengefasst.

Demonstrator

Am Fh IWU wurde eine Roboterzelle bestehend aus einem UR10e für das roboterbasierte Produktionssystem als Technologie-Demonstrator während des Vorhabens aufgebaut. Für die Ansteuerung der Werkzeuge (Jet-Dispener + IR-Spot) und Auslesen der Messdaten (Laserprofilscanner + Wirbelstromsensor) wird ein Industrie-PC 6015 von Beckhoff mit Erweiterungskarten in einem separaten Schaltschrank konfiguriert (vgl. Abbildung).

Ergebnisbericht



Abbildung 9 - Roboterzelle (links) und Schaltschrank mit Industrie-PC 6015 Beckhoff (rechts)

Es sind verschiedene Druckversuche durchgeführt wurden. Unter anderem wurden Referenzprobenen mit gerade Linien gedruckt mit Schussdichten von 2 bis 12mm-1 im Intervall von 0,5mm-1 (vgl. Abbildung 10). Diese sind nach Herstellervorgaben (12min @ 125°C) ausgehärtet wurden, aber auch nur 6 und 9min lang. Durch diese kürzeren Aushärtezeiten sind geringere Leitfähigkeiten simuliert wurden. Diese Proben wurden wiederum im Abstand von 0 bis 3mm im Intervall von 0.5mm vom Fh IWU erfasst und von Suragus ausgewertet. Diese Geometrie lies eine Auswertung zu und es konnte eine Abstandskompensation erstellt werden.

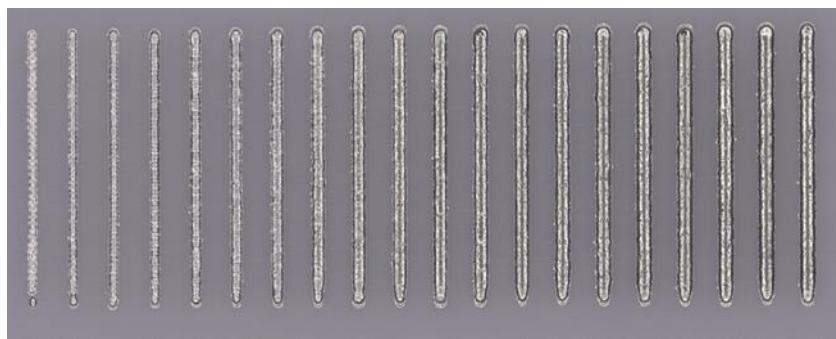


Abbildung 10 - gerade Linien in Schussdichte 2 (links) bis 12 (rechts) im Intervall von 0,5mm

Zur Überprüfung der 3D-Fähigkeit der Prozesse (Drucken, Aushärten und Messen) ist ein Beispielkörper entwickelt wurden (vgl. Abbildung 11). Dieser zeigt verschiedene Oberflächentopologien (gerade und schräge Ebene sowie Viertelkreis) auf um die Fertigungsprozesse daran zu erproben. Die virtuelle Bahnplanung wurde so ausgeführt, dass der Roboterarm die Werkzeuge und Messmittel immer orthogonal zur Oberfläche hält.

Ergebnisbericht

Für den Ablauf des Fertigungsprozesses werden also nacheinander die Werkzeugmodule (Jet-Dispenser, Laserprofilscanner, IR-Spot und Wirbelstromsensor) aufgesetzt und die Linien entlang des 3D-Körpers gedruckt, vermessen und ausgehärtet. Pro Beispielkörper können bis zu 8 Linien nebeneinander gedruckt werden.

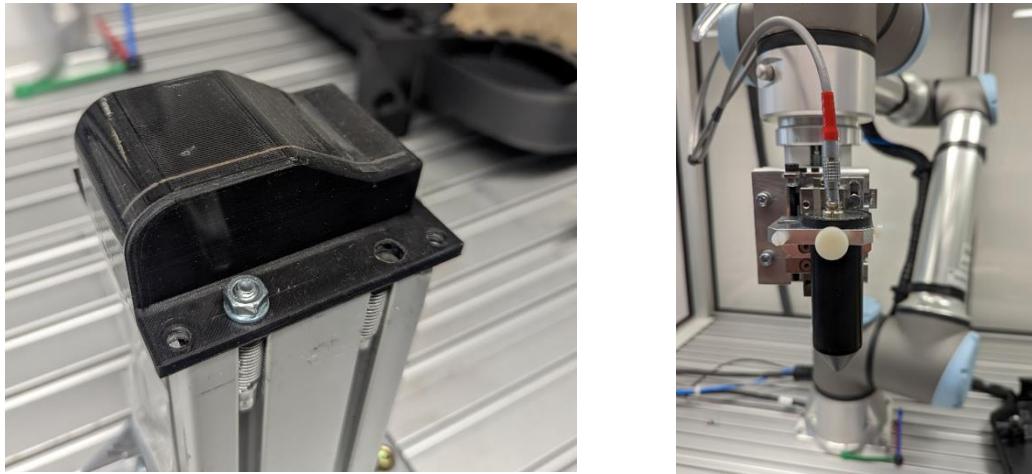


Abbildung 11 - 3D-Beispielkörper mit gedruckter Leiterbahn (links) und WS Sensor auf dem Roboter (rechts)

Prozessregelung für Druck und Aushärtung

Entwicklung eines Regelkreises auf Basis der Wirbelstromsignaldaten und der Prozessmodelle zur Einstellung bestimmter Leiterbahnpараметer (Querschnitt, Trocknungszustand)

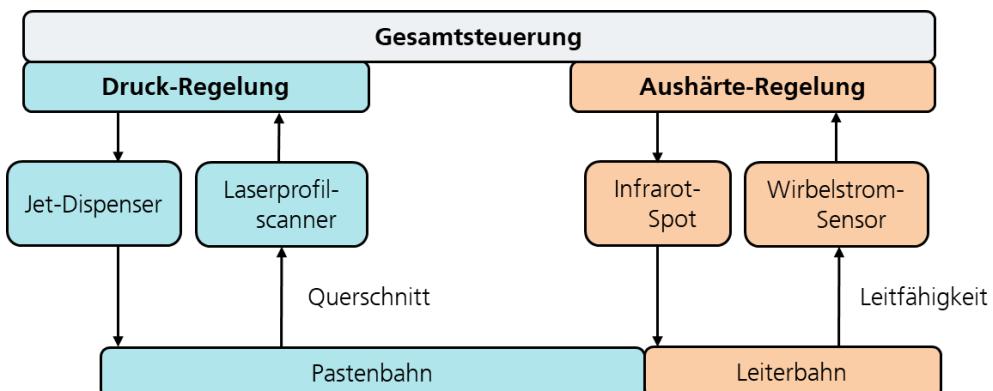


Abbildung 12 - Übersicht Druck- und Aushärteregelung

Für das Projekt wurde zwei adaptiver Regelkreise mit variabler Verstärkung ausgesucht. Da diese die Möglichkeit besitzen langsame Prozesstrends effektiv zu verhindern. Über eine Verstärkungsanpassung kann das inverse Prozessmodell auf den Regler wirken und damit eine

Ergebnisbericht

proportional richtige Steuergröße berechnen. Ein Regelkreis ist für den Druckprozess und der zweite für den Aushärteprozess zuständig. In Abbildung 2 ist die Gesamtdarstellung der Regelkreise dargestellt. Beide werden von der Gesamtsteuerung (IPC 6015 von Beckhoff) angesteuert. Die Druckregelung im Detail ist in Abbildung 23 und die Aushärteregelung in Abbildung 34 dargestellt.

Das Ziel der Druckregelung ist es, eine möglichst homogene und konstante Pastenbahn zu erzeugen, welche dann im zweiten Schritt ausgehärtet werden kann. Dafür wurde als Messglied ein Laserprofilscanner gewählt, welcher die geometrischen Daten wie Breite, Höhe und vor allem den Querschnitt der Pastenbahn erfassen kann.

Das Ziel der Aushärteregelung ist es, diese Pastenbahn mit einem gleichbleibenden Flächenwiderstand (R_{sq}) auszuhärten. Dafür ist als Messglied ideal der Wirbelstromsensor von Suragus geeignet, da dieser kontaktlos die Leifähigkeit bestimmen kann. Ebenfalls kann durch die Messelektronik von Suragus der Messwert in Echtzeit in die Gesamtsteuerung übertragen werden, damit dieser Wert für die Aushärteregelung zur Verfügung steht.

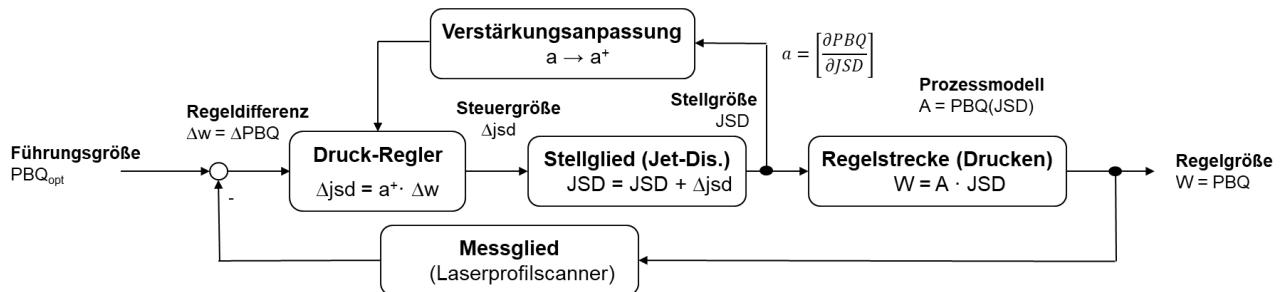


Abbildung 23 - Adaptive Druckregelung mit Jetdispenser und Laserprofilscanner

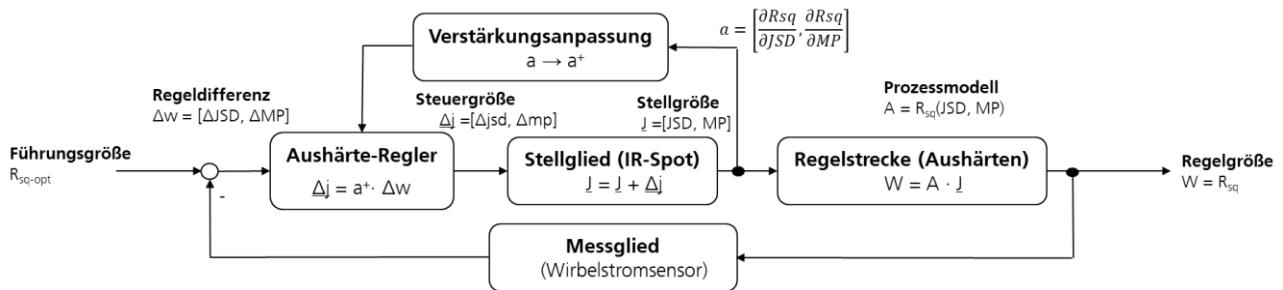


Abbildung 34 - adaptive Aushärteregelung mit IR-Spot und Wirbelstromsensor

Die Prozessmodelle welche für die Regelkreise notwendig sind wurden bereits im Arbeitspaket 3 erstellt und im ersten Zwischenbericht dokumentiert. In der Prozessmodell des Druckes, wurde

Ergebnisbericht

die Einflussgröße des Kontaktwinkels zwischen Jet-Dispenser und Substrat entfernt. Es hatte sich gezeigt, dass dieser Kontaktwinkel im Intervall von 0-30° keinen Einfluss auf das Druckergebnis hat. Durch diese Reduzierung wird das Prozessmodell vereinfacht und robuster.

Am Fh IWU wurde eine Roboterzelle bestehend aus einem UR10e für das roboterbasierte Produktionssystem benutzt. Für die Ansteuerung der Werkzeuge (Jet-Dispenser + IR-Spot) und Auslesen der Messdaten (Laserprofilscanner + Wirbelstromsensor) wird ein Industrie-PC 6015 von Beckhoff mit Erweiterungskarten in einem separaten Schaltschrank konfiguriert (vgl. Abbildung 8).

Die Prozessregelungen sind im „Strukturierten Text“ programmiert und sind damit flexibel auch auf anderen SPS-Plattformen benutzbar. In einer webbasierten Benutzerschnittstelle können alle Eingaben für die Produktionsprozesse getätigt werden. Der Roboter selbst hat eine eigene Steuerung mit Bedienpanel, über welches man den Roboterarm einlernen, Programme auswählen, konfigurieren und starten kann.

Die Robotersteuerung gibt mit nur zwei 24V-Schaltsignalen (Drucken, Aushärten) die Befehle an den Industrie-PC welcher dann sich um die komplexeren Ansteuerungen der Werkzeuge kümmert. Die Konfiguration der Druckparameter für den Jet-Dispenser und der Aushärteparameter für den IR-Spot erfolgt dabei via RS232. Das eigentliche starten des Druckens und Aushärtens ist wiederum über ein 24V-Schaltignal vorgesehen. Der Laserprofilscanner und Wirbelstromssensor senden via UDP-Pakete über einen Ethernet-Anschluss ihre Messsignale an den Industrie-PC.

Um eine möglichst große 3D-Fähigkeit zu erreichen, wurde sich im Projektverlauf gegen einen großen Werkzeugkopf entschieden, welcher alle Werkzeuge und Messgeräte beinhaltet. Stattdessen ist ein Wechsel-Werkzeugkopf-System entwickelt worden, bei dem ein Grundkörper immer am Roboterarm verbleibt. An diesem können dann Module mit dem Jet-Dispenser, IR-Spot, Laserprofilscanner sowie Wirbelstromssensor aufgesteckt werden. Dadurch ist eine möglichst kollisionsfreie Bewegung im 3D gewährleistet. Für die industrielle Fertigung wäre ein Werkzeugrevolver vorteilhaft, welcher automatisiert die einzelnen Werkzeuge weiter schaltet.