

Kurzbericht des KIT als Partner im BMBF Verbundprojekt ReFlexBat

Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Verbundprojekt ReFlexBat wurde eine selbstregelnde Beschichtungseinheit für die Herstellung von Batterieelektroden entwickelt. Die Stellgrößen Spaltabstand und Anstellwinkel werden im laufenden Prozess überwacht und autonom durch geeignete Aktuatorik so eingestellt, dass die Qualität des Nassfilms mit den Anforderungen übereinstimmt. Wichtige Qualitätskriterien sind die Nassfilmhöhe, die Beschichtungsbreite und die Randgeometrie sowie die Defektfreiheit der Beschichtung. Mit dieser Herangehensweise ist sowohl eine signifikante Beschleunigung des Anfahrprozesses, im Vergleich zur manuellen Methode, als auch eine inline-Kompensation von Schwankungen im Prozess möglich. Bei einem Chargen- oder Materialwechsel ist kein manuelles Einstellen wegen veränderten Elektrodeneigenschaften mehr erforderlich. Damit ist direkt eine Senkung des Ausschusses bzw. eine Steigerung der Produktivität verbunden, Ressourcen werden effizienter eingesetzt und Produktionskosten können gesenkt werden.

Als Basis für das Reglerkonzept dienen physikalische und datengetriebene Modelle. In den physikalischen Modellen wird das Betriebsfenster für eine stabile Beschichtung hinsichtlich der Stellgrößen unter Berücksichtigung der Prozessparameter und Materialeigenschaften theoretisch vorhergesagt. Die datengetriebenen Modelle schränken die Auswahl der Prozesspunkte weiter ein, indem die Auswirkungen auf die gemessenen Qualitätskriterien miteinbezogen werden.

Die Arbeiten des KIT im Verbundprojekt teilen sich in die Aufgabenfelder des wbk-MAP, wbk-PRO und der Arbeitsgruppe Thin Film Technology (TFT) auf. Das zur selbstständigen Einstellung des Prozesses benötigte Stellglied, welches im Rahmen des Projektes für eine agile Positionierung und Orientierung der Schlitzdüse entwickelt wurde, gehört zur Kernkompetenz der Arbeitsgruppe **wbk-MAP**. Das Messglied besteht aus In-Line Sensorik und fällt in das Kompetenzgebiet der Arbeitsgruppe **wbk-PRO** und sorgt somit für die Qualitätssicherung durch Einsatz geeigneter Sensoren und Fusion gewonnener Messdaten. Die Arbeiten der **TFT** sind der Regelstrecke zuzuordnen und zielten darauf ab, einerseits die physikalischen Modelle in verwertbarer Form bereitzustellen und andererseits eine umfangreiche experimentelle Datengrundlage zu schaffen. In der Datenbank sind die Eigenschaften enthalten, die in die Qualitätsbewertung mit einfließen. Die physikalischen Modelle und die Datenbank werden im Verbundprojekt vom Projektpartner Fraunhofer IOSB in den Regler integriert. Darüber hinaus wurde ein Schlitzdüsenmodul konstruiert, das eine offline-Anpassung der Auslassbreite ermöglicht.

Ablauf des Vorhabens

In der Anfangsphase des Projekts wurden die technischen Spezifikationen in AP1 für die projektrelevanten Inhalte gemeinsam mit allen Verbundpartnern zusammengetragen. Anschließend wurden seitens des KIT die Grundlagen für das Prozessverständnis gelegt und das Konzept für die Aktuatorik und Messtechnik ausgewählt und umgesetzt.

In der Arbeitsgruppe TFT wurde dazu eine systematische Parametervariation für reale Batterieanoden durchgeführt. Für verschiedene Spaltabstände und Anstellwinkel wurde das Beschichtungsfenster in kleinem Raster durchlaufen, um die Zielgrößen zu messen. Es wurde außerdem geprüft, inwiefern sich die Toleranz der Stellgrößen auf die Zielgrößen auswirkt, um die Validität der gesetzten Genauigkeitsanforderungen zu gewährleisten. Zudem war eine Erweiterung der bestehenden Berechnungsmodelle für die Betriebsfenster von scherverdünnenden Fluiden erforderlich, sodass der Einfluss des Anstellwinkels mit abgedeckt ist.

Zur Befähigung der Bestandsanlage wurde Aktuatorik für die identifizierten Stellgrößen sowie Messtechnik für die relevanten Qualitätskennwerte integriert. Das Vorgehen kann dabei jeweils in die Schritte - Konzepterarbeitung, Auswahl von Komponenten sowie abschließend die Inbetriebnahme und Optimierung – unterteilt werden.

An der Abstimmung der Einzelkomponenten im Gesamtsystem waren alle Projektpartner beteiligt. Über den Projektverlauf hinweg wurden die Komponenten zusammengefügt. Im letzten Teil des Projekts konnte das Reglerverhalten am Demonstrator getestet werden. Durch die modulare Bauweise war es zusätzlich möglich, einen traversierenden Punktsensor mit hochpräziser Linearachse zu integrieren, um eine alternative Messmethode als Vergleich zur Methode des Triangulationslasers heranzuziehen.

Wesentliche Ergebnisse

Die Projektergebnisse haben gezeigt, dass das Konzept der Regelung des Spaltabstands und Anstellwinkels zu einer signifikanten Optimierung der Filmgeometrie führt. Insbesondere konnte die Abweichung von der Idealgeometrie im Randbereich der Beschichtung vermindert werden, auch unter Einhaltung der in der Industrie gängigen Toleranzen für die Höhe und Breite des Nassfilms.

Spezifisch für das KIT konnte gezeigt werden:

- Die Geometrie des Nassfilms ist reproduzierbar durch Variation des Anstellwinkels und Spaltabstands einstellbar. In den experimentellen Daten lassen sich übergreifende Trends ableiten:
 - o Eine Erhöhung des Anstellwinkels führt zu einer Verbreiterung der Beschichtung, niedrigerer Nassfilmhöhe und niedrigerer Randüberhöhung.
 - o Eine Erhöhung des Spaltabstands führt zu einer Verschmälerung der Beschichtung, höherer Nassfilmhöhe und höherer Randüberhöhung.
 - o Eine Überlagerung der Einflüsse ist möglich, um ein optimiertes Höhenprofil zu erzeugen.
- Die Modelle zur Vorhersage der Beschichtungsstabilität aus der Literatur und aus dem Haus der TFT konnten um die numerischen Komponenten erweitert werden, um die Einflüsse des Anstellwinkels abzudecken. Die Vorhersagen für obere und untere Prozessgrenzen und deren Verlauf stimmen mit den Experimenten überein.
- Eine offline-justierbare Auslassbreite des Schlitzdüsenmoduls ist technisch möglich, die Eignung für eine Prozessumgebung ist jedoch nur bei hoher Frequenz von Materialwechseln und/oder Beschichtungsformaten gegeben.
- Eine einseitige traversierende Punktmessung ist im Bereich der Genauigkeitsanforderungen in der Batterieproduktion möglich und sinnvoll, wenn eine tiefergehende 3D-Referenzierung vorgenommen wird. Damit ist das vollständige Nassfilmhöhenprofil zugänglich. Eine Kombination mit Triangulationslasern ist dennoch vorteilhaft, um eine lückenlose Zeitreihe für die Breite und Randgeometrie der Beschichtung zu erhalten.
- Eine optische Breitenmessung und Defekterkennung ist mit der verwendeten Zeilenkamera hardwareseitig bis $> 80 \text{ m min}^{-1}$ möglich.
- Durch den inkrementellen Charakter des Regelungsansatzes ist vorrangig die Schrittweite der Aktuatorik relevant. Hier wurde eine Schrittweite von $1 \text{ }\mu\text{m}$ für den Spaltabstand und 0.2° für den Anstellwinkel als zielführend identifiziert.

Abschlussbericht im BMBF Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ – Kompetenzcluster InZePro

Vorhabensbezeichnung: Regelbare Beschichtungseinheit für die flexible Beschichtung von Batterieelektroden - ReFlexBat	
Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Förderkennzeichen 03XP0341A
Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer	Berichtszeitraum 01.03.2021 – 31.08.2024
	Bewilligungszeitraum 01.03.2021 – 31.08.2024

I. Eingehende Darstellung

I.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen (Ergebnisdarstellung) mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Projekt ReFlexBat verfolgte das Arbeitsziel, eine flexible, selbstregelnde Beschichtungseinheit zu entwickeln, die in der Lage ist, eigenständig einen optimierten Betriebspunkt anzufahren und auf Schwankungen im Prozess zu reagieren. Die Regeleinheit greift dabei auf physikalische und datengetriebene (Machine-Learning-) Modelle zurück, um die Stellgrößen (Spaltabstand zwischen Schlitzdüse und Substrat, Anstellwinkel der Schlitzdüse zum Substrat) so zu variieren, dass sich die Zielgrößen (Nassfilmhöhe, Nassfilmbreite und Kennzahlen der Randgeometrie) im industriellen Toleranzbereich bewegen.

Das Projekt bestand aus insgesamt 6 Arbeitspaketen. **AP 1** diente zur Formalisierung der technischen Spezifikationen, die der Demonstrator erfüllen soll. AP 2-5 verteilten sich über das Konsortium entsprechend der Kompetenzen entlang des Regelkreises (**AP2 Stellglied:** wbk-MAP; **AP3 Regelstrecke:** TFT; **AP4 Messglied:** wbk-PRO; **AP5 Regelglied:** IOSB). Die Integration der Einzelkomponenten in den Demonstrator (**AP 6**) wurde von allen Konsortialpartnern bearbeitet. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitspaketen dargestellt.

AP 1: Technische Spezifikation der Anforderung und Koordination (alle)

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die Anforderungen an den Demonstrator zur Beschichtung der Elektroden und seine Komponenten sowie deren Einstellgrößen (Prozessparameter) möglichst vollständig zu beschreiben, und zwar für die Schlitzdüse, die Auftragsrolle und die Nassfilmhöhenmessung und daraus resultierende Qualitätsmesswerte. Somit wurde in diesem AP die Grundlage für den weiteren Projektverlauf erarbeitet und es waren alle Projektpartner an der Diskussion, Definition und Formalisierung beteiligt.

Zu Beginn konnten das bestehende Prozesswissen der TFT, anlagenspezifische Erfahrungswerte sowie Rechercheergebnisse zusammengetragen werden. Diese wurden formalisiert in einem Lastenheft festgehalten. Neben den definierten Zielen, welche eine einheitliche Ausrichtung der einzelnen AP und

Projektpartner sicherstellen, wurden vorrangig Kenndaten des Beschichtungsprozesses gesammelt und mit einem für das Projekt ReFlexBat relevanten zu betrachtenden Bereich spezifiziert. Die Bereiche dienen als Rahmenbedingungen für die Ausarbeitung und sollten durch diese eingehalten werden. Ebenso wurde gemeinsam definiert, welche Größen messtechnisch erfasst und geregelt werden sollen. Das ist weiter essenziell für den Aufbau der Regelung sowie die korrekte Auswahl aller Komponenten. Wie in Tabelle 1 beispielhaft dargestellt, wurden diese Informationen tabellarisch festgehalten.

Tabelle 1: Prozessparameter mit geplanter (x) oder optionaler (o) Verwendung.

	Wertebereich	Messung geplant	Regelung geplant	Gütekriterium
Vorgegebene Beschichtungsbreite	56 - 200 mm	x	o	x
Austrittsbreite (offline)	56 - 200 mm	x	o	
Volumenstrom	0,7-8000 ml/min	x	x	
Raumtemperatur	20-25 °C	x	o	
Randüberhöhung	0-50 µm	x		x
Flächengewicht	60-120 g/m ²	x		x
Defekte (Wellen, Luft, Start/ Stopp)	> 200 µm	x		x
Substratdicke (simuliert)	10-20 µm	x		
Viskosität	0,1-50 Pa s	o		
Oberflächenspannung	40-65 mN/m	o		
Bahngeschwindigkeit	0,25-80 m/min	x	o	
Spaltabstand	100-600 µm	x	x	
Anstellwinkel	0-5°	x	x	
Nassfilmhöhe	50-500 µm	x		x

Zusätzlich wurden die Teilfunktionen des Zielsystems weiter ausformuliert und in sogenannten Steckbriefen dokumentiert. Die definierten Teilfunktionen umfassen hierbei Spaltabstand, Anstellwinkel, Austrittsbreite, ML-Modell und Regelung.

Weiter wurden die Schnittstellen zwischen den Teilfunktionen festgelegt. Da die entwickelte Anlage auf dem derzeitigen Versuchstand (Development Coater) basiert, gelten die bestehenden Randbedingungen. So soll für die Befestigung der Schlitzdüse auch in Zukunft der TFT-Standard verwendet werden, um einen Transfer von bisherigen Erfahrungen und Equipment sicherzustellen. Für die Materialzufuhr über einen Schlauch wurde ein Swagelok Swagelok-Anschluss definiert mit einem Schlauchdurchmesser zwischen 6-8 mm (je nach Volumenstrom) definiert. Für die Datenübertragung zwischen den Komponenten soll wurde eine Analogverbindung (Stro-Einheitssignal 4 mA – 20 mA) gewählt werden, für die Schnittstelle der Kamera mit Defekterkennung wurde eine Ethernetverbindung definiert. Die offline-Parameter Volumenstrom und Bahngeschwindigkeit werden im bestehenden Aufbau einmalig eingestellt und in die neue Regelung eingegeben. Da hier aufgrund der Produktivitätsmaximierung keine Änderungen vorgenommen werden, wird keine automatische Aktualisierung benötigt.

Hiermit wurde das AP1 erfolgreich abgeschlossen und es liegt eine dokumentierte Basis mit quantitativen Parameterbereichen sowie einer Schnittstellendefinition zwischen den einzelnen Teilkomponenten vor.

AP 2: Stellglied - Entwicklung eines innovativen Schlitzdüsenmoduls (wbk-MAP)

Ziel des Arbeitspaketes 2 war die Entwicklung sowie die Inbetriebnahme und Validierung eines innovativen Schlitzdüsenmoduls, welches im Kontext des Gesamtvorhabens als Stellglied des Regelkreises fungieren sollte.

UAP 2.1: Mechanische, elektrische und steuerungstechnische Entwicklung

In AP 2 wurde das Konzept für die technische Umsetzung erarbeitet. Ausgangsbasis dafür war der vorliegende Aufbau des Development Coaters beim Projektpartner TFT, wie in Abbildung 1 gezeigt, welcher für das Projekt modifiziert wurde. Um auch weiterhin den bestehenden manuellen Prozess als Referenz verwenden zu können, wurde festgelegt, neben der im Projekt umzusetzenden automatisierten Regelung auch in Zukunft eine manuelle Einstellmöglichkeit analog zum derzeitigen Stand beizubehalten. So kann auch die bereits bestehende Datengrundlage aus vorherigen Projekten an der Anlage berücksichtigt werden. Das erarbeitete Konzept sieht vor, auf bestehende Achsen zurückzugreifen und diese durch eine Kombination von sensorischer Überwachung und elektrischen Antrieben zu erweitern. Für die Einstellung des Spaltabstandes kann der gesamte Aufbau über einen vorliegenden Kugelgewindetrieb bewegt werden, welcher eine Steigung von 2 mm pro Umdrehung aufweist. Die in AP 1 gesetzte Genauigkeit des Spaltabstandes von 15 μm entspricht somit einer Drehung von 2,7°. Da durch die marktüblich erreichbare Auflösung von 0,9° für Elektromotoren eine Positioniergenauigkeit von 5 μm erreicht werden kann, wurde die bestehende Achse als geeignet identifiziert.

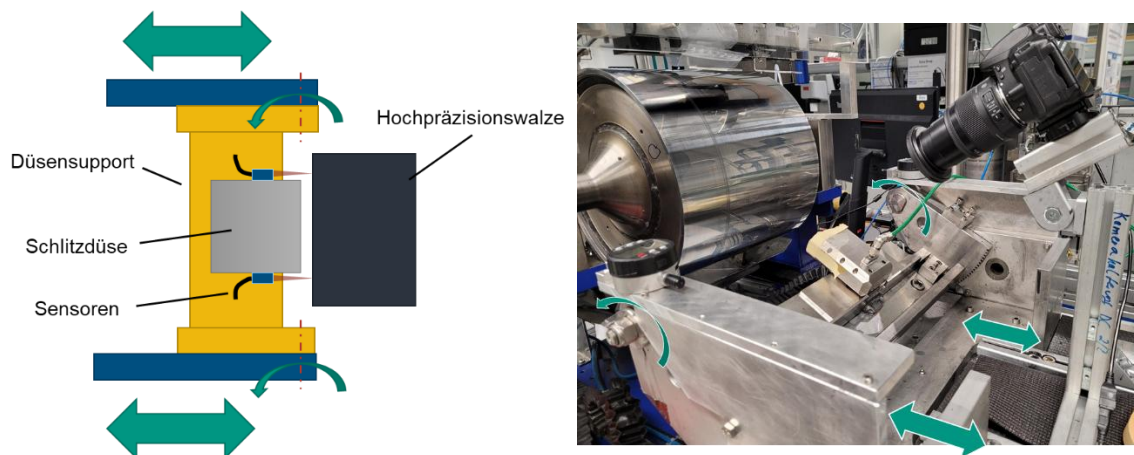


Abbildung 1: Aufbau des Development Coaters im TFT-Labor schematisch (links) und real (rechts)

Für die Einstellung des Anstellwinkels wurde die in Abbildung 1 gezeigte Rotationsachse genutzt. Die Umsetzung wurde dabei so gewählt, dass die Einstellung von Spaltabstand und Anstellwinkel unabhängig voneinander vorgenommen werden kann. Für die Möglichkeit der entkoppelten Einstellung von Spaltabstand und Anstellwinkel, wurde die Schlitzdüse an der Rotationsachse für den Anstellwinkel entsprechend Abbildung 1 positioniert. Dies musste im weiteren Projektverlauf zusammen mit AP 3 bei der konstruktiven Umsetzung des Düsenstützes berücksichtigt werden.

Ebenfalls Teil des AP 2 war die Auswahl geeigneter Sensoren für die Messung des Spaltabstandes zwischen Schlitzdüse und Walze. Durch die Messung des tatsächlich vorliegenden Spaltabstandes kann dieser durch einen geschlossenen Regelkreis überwacht werden. Wichtige Anforderungen sind die Auflösung von 1 μm und ein Präzisions-Messbereich von 500 μm , welcher dem in AP 1 definierten

abzudeckenden Bereich der Nassfilmhöhe entspricht. Durch die Variation des Anstellwinkels ist auch unter Einfallwinkeln von $\pm 10^\circ$ auf die Walze eine zuverlässige Messung erforderlich. Bedingt durch den Aufbau ist zusätzlich ein Messabstand von 30 – 50 mm notwendig und durch die zu detektierende Chromschicht der Walze die Erfassung von nicht elektrisch leitfähigen, spiegelnden Oberflächen essenziell. Um die Tauglichkeit und Akzeptanz in der Industrie sicherzustellen, haben Gespräche mit Industriepartnern zudem ergeben, dass für die Vermeidung von Crashes eine frühzeitige Detektion der Annäherung möglich sein muss.

Es wurden optische Sensoren, genauer konfokale Punktsensoren, als geeignet identifiziert. Durch die genaue Oberfläche der Walze wurde auf Sensoren mit fokussiertem Lichtpunkt zurückgegriffen, da die Mittelung über einen größeren Messbereich, wie für raue Oberflächen üblich, nicht notwendig ist. Die Auswahl wurde durch erfolgreichen Test der CL-P030 von Keyence im Januar 2022 abgeschlossen.

Für den Aufbau der Steuerung wurde die Logik des Gesamtaufbaus entworfen und grafisch in Abbildung 3 dargestellt. Auf dieser Basis und mit Hilfe der in AP 1 definierten Schnittstellen kann eine Auswahl der Steuerung inklusive der benötigten Ein- und Ausgänge getroffen werden. Die Vorauswahl zum Ende des Berichtszeitraums fiel dabei auf eine Siemens SIMATIC S7-1500 mit Profinet Anschlüssen.

UAP 2.2: Aufbau, Inbetriebnahme und Validierung

Auf Basis von AP 1 sowie UAP 2.1 wurde die technische Lösung finalisiert. Dabei wurde auf bestehende Achsen zur Einstellung der Parameter Spaltabstand und Anstellwinkel zurückgegriffen. Die Einstellung des Spaltabstandes ist hier über einen Kugelgewindetrieb umgesetzt, der Spaltabstand wurde durch eine schwenkbare Lagerung des Düsenstands möglich, welche nun über ein Zahnrad angetrieben wird.

Ausgewählt wurden Schrittmotoren mit integriertem Controller der Firma Nanotec (PD4-C) in Verbindung mit einem Präzisionsplanetenge triebe der Untersetzung 1:40 (siehe Abbildung 3). Die Auflösung von $0,045^\circ$ im Vollschrittbetrieb sowie die Closed-Loop Fähigkeit der Motoren erlauben eine äußerst präzise Ansteuerung. Mit den verwendeten Achsen wird so eine theoretische Schrittweite von $0,25 \mu\text{m}$ für den Spaltabstand sowie $0,001^\circ$ für den Anstellwinkel erreicht. Durch eine Vorspannung der Achsen wird weiter ein Wechselspiel verhindert. Dies wird für die Spalteinstellung über Pneumatikzylinder erreicht, welche den Aufbau hin zur Beschichtungswalze drücken. Bei der Einstellung des Anstellwinkels geschieht dies durch das Eigengewicht des Aufbaus. Die Ansteuerung ist dabei sowohl über analoge als auch digitale Signale durch die SPS möglich. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Anbindung mittels USB, worüber die erste Inbetriebnahme sowie Parametrisierung erfolgten.

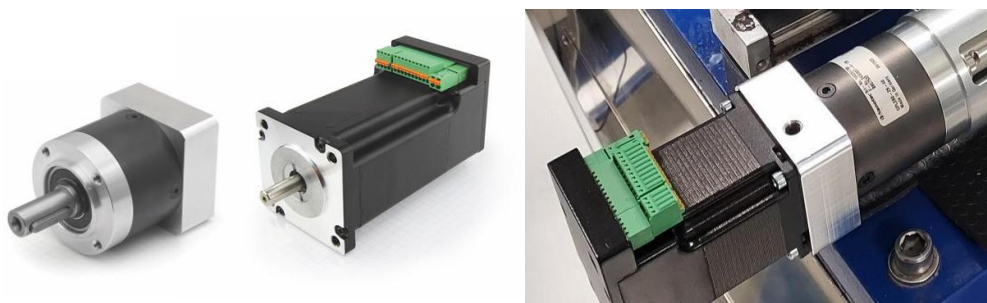


Abbildung 2: Beschaffter Antrieb mit Präzisionsplanetengetriebe

Die Eignung von bereits ausgewählten konfokalen Punktsensoren für die Messung des Spaltabstands zwischen Düse und Walze wurde durch Tests am Versuchsaufbau bestätigt. Zu überprüfen war dabei vor allem die präzise Auflösung auf den unterschiedlichen Oberflächen der verchromten Beschichtungswalze. Die Eignung wurde bestätigt und die Beschaffung wurde ebenfalls abgeschlossen. Bei den Tests wurde weiter die Rundlaufgenauigkeit der Beschichtungswalze mit 2 µm bestimmt.

In dem Konzept wird besonderen Wert auf die Modularität der Erweiterung für die Beschichtungseinheit gelegt, sodass diese zukünftig übertragen und weiterentwickelt werden kann. So finden alle Steuereinheiten des Projektes ReFlexBat in einem Schaltschrank Platz. Die Kommunikation erfolgt über einen Profinet-Switch mit 1000 Mbit/s, was aufgrund der hohen Abtastraten von Linienlaser und Zeilenkamera (AP 4) notwendig wird. Weiter ist Platz und Leistung für zwei zusätzliche Linienlaser und zwei weitere Motoren vorgehalten. So ist das Modul einfach erweiterbar für weitere Anlagen oder Beschichtungsformen, wie beispielsweise zum simultan-beidseitigen Beschichten.

Für eine frühzeitige unabhängige Inbetriebnahme der Antriebe für die Stellgrößen Spaltabstand und Anstellwinkel wurden Motoren mit integriertem Controller verwendet, welche neben der Ansteuerung über Analog- und Digitalsignale über die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) auch über eine USB-Schnittstelle verfügen. So konnten diese vorab ohne die Steuerung in Betrieb genommen und das Verhalten im Versuchsaufbau erprobt werden. Mit einer Auflösung im Vollschrittbetrieb der Schrittmotoren von 0,25 µm übertrifft die gemessene Positioniergenauigkeit die gesetzten Minimalanforderungen von 1,5 µm deutlich. Somit soll der Nutzen von höheren Genauigkeiten, welche auch mit einem höheren Anlageninvest einhergeht, validiert werden können. Die absolute Wiederholgenauigkeit der Achse bei wiederholtem Verfahren über weite Strecken wurde mit teilweise 50 µm Abweichungen als ungeeignet bewertet. Ein rein gesteuerter Betrieb kommt somit für den vorliegenden Anwendungsfall nicht in Frage. Die im Konzept eingeplanten Sensoren für die Messung des Abstands werden somit als zwingend erforderlich bestätigt.

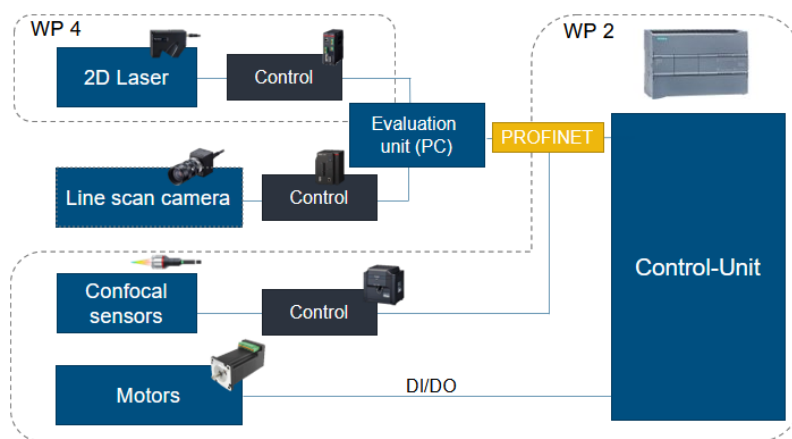


Abbildung 3: Kommunikationskonzept und Schnittstellen.

Das Programm der Steuerung wurde vorab vollständig am Rechner erstellt und simulativ in der TIA-Umgebung getestet. Die finale Erprobung sowie die Integration aller Komponenten und Schnittstellen erfolgten am Demonstrator. Die Architektur für die Kommunikation wurde entworfen sowie vorbereitet und gestaltet sich dabei wie in Abbildung 3 dargestellt. Die Motoren werden direkt über analoge und digitale Ausgänge der Steuerung angesprochen. Die beschafften konfokalen Punktsensoren, welche die Abstandsinformation für einen geschlossenen Regelkreis des Spaltabstands liefern, werden über eine Profinet-Schnittstelle mit der SPS verbunden. Die Kommunikation der

Sensoren mit hoher Datenrate läuft über eine separate Auswerteeinheit, welche die Datenverarbeitung übernimmt. Dies betrifft die Liniensensoren sowie die Zeilenkamera. Zu diesem Zweck wurde ein PC mit geeigneter Rechenleistung beschafft und um eine Profinet-Netzwerkkarte ergänzt, welche eine echtzeitfähige Kommunikation mit der SPS erlaubt. So können die verarbeiteten Daten im geeigneten Format der Steuerung zur Verfügung gestellt werden.

Zusammenfassend konnten alle Komponenten beschafft und in Betrieb genommen werden. Auch konnte die geforderte hohe Präzision nachgewiesen werden sowie die Steuerungs- und Kommunikationsarchitektur aufgebaut werden.

Abschließend wurden die Ansteuerung und die Präzision der Stellgrößen im Betrieb des Gesamtaufbaus überprüft. Die Anforderungen des Lastenhefts wurden dabei erfüllt. Zudem wurde ein Modell für den nichtlinearen Verlauf der Vorschubsachsen erstellt und die prüfstandspezifische Wechselwirkung zwischen der Einbaulage der Düse, dem Anstellwinkel sowie dem Spaltabstand abgebildet. Durch eine korrigierte Einbaulage der Düse konnte die gegenseitige Beeinflussung der Stellgrößen minimiert werden. Das war bei der bisherigen, manuell durchgeführten Einstellung und Korrektur der Düsenposition nicht notwendig. Die Unabhängigkeit der Stellgrößen zueinander sowie deren Wiederholbarkeit sind für einen automatisierten Betrieb mit In-Line Korrektur jedoch unbedingt notwendig.

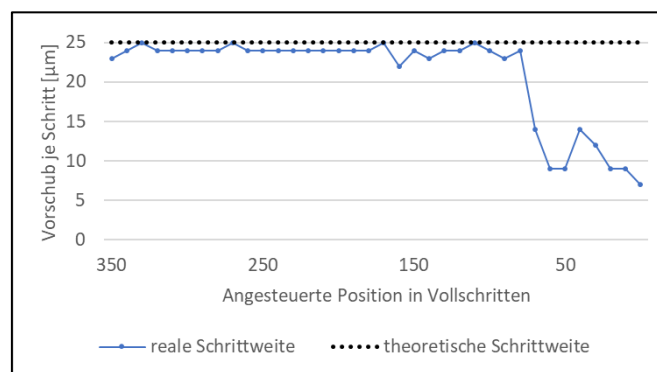


Abbildung 4: Realer Vorschub der Spalteinstellung in Abhängigkeit von der Ist-Position

AP 3: Regelstrecke - Beschichtungsprozess (TFT)

UAP 3.1: Identifikation der Toleranzen und Einfluss der Stellgrößen auf den Prozess

Das Arbeitspaket 3.1 umfasst die Untersuchung der Stellgrößen Spaltabstand und Anstellwinkel hinsichtlich ihrer Toleranzen und der Einflüsse auf den Prozess, genauer auf die Nassfilmgeometrie und Beschichtungsstabilität. Die aktuell vorliegenden Toleranzen bei der Einstellung des Spaltabstands mit Hilfe von Abstandsfolien (engl. Shims) ließen sich aus Abstandsmessungen mit konfokalen Weißlichtsensoren auf ca. 20-25 µm eingrenzen. Diese Größenordnung liegt in Übereinstimmung mit der Erfahrung aus vergangenen Arbeiten an der Versuchsanlage. Das hier zu entwickelnde Schlitzdüsenmodul soll die Genauigkeit durch geeignete Sensorik und Aktuatorik auf 15 µm verbessern, wie aus dem Lastenheft aus Arbeitspaket 1 und aus der Realisierung im Arbeitspaket 2 hervorgeht. Die zweite zentrale Stellgröße ist der Anstellwinkel der Schlitzdüse. Für die systematische Parametervariation war zuerst eine Konstruktion und Implementierung einer mechanischen Einheit zur manuellen, stufenlosen Einstellung des Anstellwinkels im Bereich von $-1,5^\circ$ bis $+1,5^\circ$ erforderlich. Der absolute Wert des Anstellwinkels wurde erneut mit Abstandsmessungen an geeigneten Stellen im Versuchsaufbau bestimmt. Eine Zielgröße für die experimentellen Untersuchungen ist die

Nassfilmgeometrie, welche das Nassfilmhöhenprofil, die Beschichtungsbreite und die Randgeometrie umfasst. Im Idealfall ist das Nassfilmprofil homogen und die gemessene Geometrie entspricht der vorgegebenen Nassfilmhöhe und -breite. In der Realität treten jedoch Abweichungen von der geforderten Geometrie auf und es bilden sich inhomogene Bereiche, beispielsweise die Überhöhungen im Randbereich. Zum anderen wird die Prozessstabilität quantifiziert, indem das Prozessfenster (Beschichtungsfenster) bestimmt wird, in dem eine defektfreie, stabile Beschichtung möglich ist.

Zunächst werden die ermittelten Einflüsse durch Änderung des Spaltabstands im Toleranzbereich auf den Prozess aufgeführt. Aufgrund der relativ hohen Unsicherheit von 20-25 μm im Vergleich zum zu untersuchenden Toleranzbereich von 15 μm wurde die relative Änderung des Spaltabstands um 15 μm durch Messuhren realisiert. Als ausgewähltes Beispiel wurde im Folgenden die Nassfilmhöhe von 156 μm betrachtet, welche einer Flächenkapazität von ca. 2 bis 2,2 mAh cm^{-2} entspricht und damit den Stand der Technik darstellt. Als erste Zielgröße wird die industriell relevante untere Prozessgrenze betrachtet, an der die Defekte Air Entrainment und/oder Low Flow Limit auftreten können. In Abbildung 5 ist die experimentell und simulativ bestimmte untere Prozessgrenze in Form der minimalen Nassfilmhöhe in Abhängigkeit der Beschichtungsgeschwindigkeit für die Spaltabstände 180 μm und 195 μm gegenübergestellt.

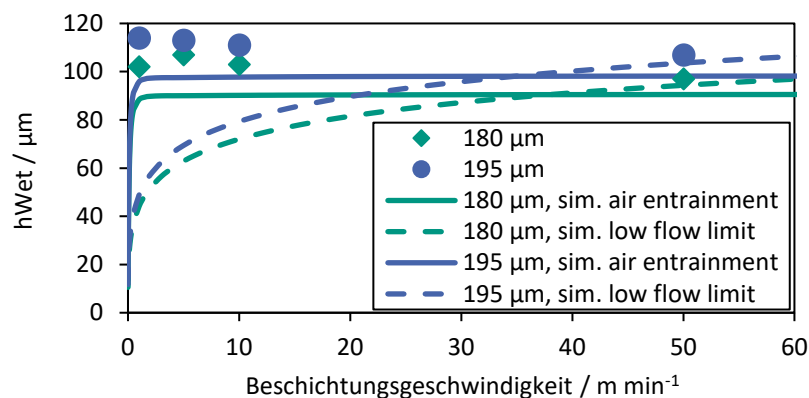


Abbildung 5: Vergleich der experimentell und simulativ ermittelten minimalen Nassfilmhöhe (untere Prozessgrenze) für Spaltweiten von 180 μm und 195 μm in Abhängigkeit der Beschichtungsgeschwindigkeit.

Für eine Abnahme des Spaltabstands ist eine Abnahme der minimalen Nassfilmhöhe zu beobachten, welche sich in der gewählten Darstellung auf ca. 9 μm beläuft. Im Vergleich dazu zeigt die Berechnung der gekoppelten Druckbilanzen über den Beschichtungsspalt ebenfalls eine relative Reduktion der unteren Prozessgrenze um ca. 9 μm , wobei der absolute Wert der Simulation die experimentellen Ergebnisse um ca. 10-15 μm unterschreitet. Diese Abweichung ist hauptsächlich auf die oben genannte Unsicherheit bei der Spalteinstellung zurückzuführen. Der beobachtete Trend entspricht dennoch der Erwartung, da die Verringerung des Spaltabstands zu einer Erhöhung der Druckverluste der Kanalströmung im Spalt und der Grenzflächenspannung führen. Dies wiederum verursacht die Verschiebung der unteren Prozessgrenze hin zu niedrigeren Nassfilmhöhen. Darüber hinaus ist der Einfluss abhängig vom Zahlenwert des Spaltabstands. Für kleine Spaltabstände ist der relative Einfluss auf die minimale Nassfilmhöhe durch die Toleranz des Spaltabstands größer (8 μm oder 10 % Verschiebung bei 80 μm Spaltabstand) als bei größeren Spaltabständen (9 μm oder 5 % Verschiebung bei 180 μm Spaltabstand). Es lässt sich schließlich festhalten, dass die gewählte Toleranz von 15 μm ausreichend klein gewählt ist, sodass sich die üblichen toleranzbehafteten Betriebspunkte in einem ausreichend großen Abstand zu den Prozessgrenzen befinden. Eine instabile Beschichtung, ausgelöst

durch Abweichungen in der Spalteinstellung, ist demnach nicht zu erwarten. Die verfügbaren Berechnungsmethoden liefern außerdem eine gute Übereinstimmung in der relativen Verschiebung der Prozessgrenzen.

Die weiteren Zielgrößen beziehen sich auf das Nassfilmprofil. In Abbildung 6 sind die Beschichtungsbreite (links) und der Randbereich zweier Nassfilmprofile (rechts) dargestellt, jeweils für die Spaltabstände 180 μm und 195 μm .

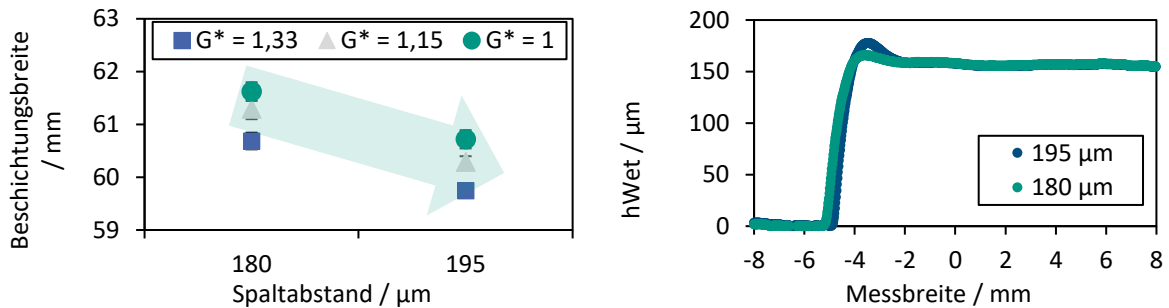


Abbildung 6: Beschichtungsbreite für verschiedene Betriebspunkte für 180 μm und 195 μm Spaltweite (links) und Nassfilmprofil bei vorgegebener Nassfilmhöhe von 156 μm für Spaltweiten von 180 μm und 195 μm (rechts), beide bei einer Beschichtungsgeschwindigkeit von 5 m min^{-1} .

Die Beschichtungsbreite ist in der Abbildung links für Betriebspunkte dargestellt, die sich sowohl am Rand ($G^* = 1,33$ und $G^* = 1$) als auch in der Mitte des Beschichtungsfensters befinden ($G^* = 1,15$). Über den gesamten untersuchten Bereich wurde bei konstantem Volumenstrom für kleinere Spaltabstände eine breitere Beschichtung beobachtet als für größere Spaltabstände. Dies entspricht der Erwartung, da der Druckverlust und damit auch das Druckniveau im Spalt steigen, was eine laterale Verbreiterung durch die Erhöhung der seitwärts gerichteten Strömung zur Folge hat. Die Toleranz von $\pm 500 \mu\text{m}$ aus AP 1 konnte auch an dieser Stelle eingehalten werden. Für das Nassfilmhöhenprofil ist einerseits die mittlere Nassfilmhöhe relevant. Die Verringerung des Spaltabstands um 15 μm führt zu einer geringfügigen Abnahme der mittleren Nassfilmhöhe, welche im untersuchten Bereich stets unter der festgelegten Toleranz von 1,5 % verblieb. Hier stimmen die Beobachtungen ebenfalls mit den Erwartungen überein, die schon zur Erklärung der Zunahme der Beschichtungsbreite angeführt wurden. Aufgrund der Massenerhaltung geht diese auch mit einer Abnahme der mittleren Nassfilmhöhe einher. Als zweite relevante Größe ist die Randgeometrie zu nennen, welche üblicherweise in entdimensionierter Schreibweise als Verhältnis H^* der Randhöhe zur mittleren Nassfilmhöhe angegeben wird. Anhand der vorliegenden Ergebnisse wird deutlich, dass selbst geringfügige Änderungen des Spaltabstands von 195 μm zu 180 μm im betrachteten Betriebspunkt zu einer Abnahme von H^* um 5 % bzw. zu einer absoluten Abnahme der Randhöhe um 12 μm führt. Der physikalische Mechanismus für die Ausbildung der Überhöhung am Rand ist ein multifaktorielles Zusammenspiel aus den Stoffeigenschaften (Viskosität, Oberflächenspannung) und Strömungseffekten im Spalt sowie am Düsenauslass. Eine Einflussnahme ist durch eine Veränderung des Spaltabstands bei gleichbleibendem Volumenstrom möglich. Damit besteht die Möglichkeit zur Ausweitung der Optimierung des Nassfilmprofils durch das entwickelte Schlitzdüsenmodul auf die Homogenität des Nassfilmprofils im Randbereich für ein gefordertes Auftragsgewicht.

Zur Untersuchung des Einflusses des Anstellwinkels auf die Zielgrößen wird dieser zunächst anhand von Abbildung 7 definiert.

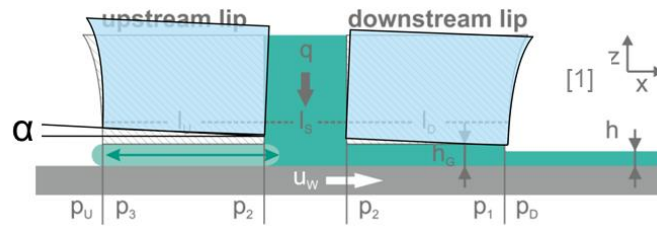


Abbildung 7: Definition des Anstellwinkels α .

In der hier dargestellten Konfiguration liegt auf der Downstream-Seite ein kleinerer Spaltabstand vor als auf der Upstream-Seite, was als konvergenter Spalt bezeichnet wird. Im Folgenden wird diese Konfiguration als positiv festgelegt, d.h. negative Winkel deuten umgekehrt auf einen divergenten Spalt hin. In den Experimenten wurde eine Parametervariation in $0,5^\circ$ -Schritten im Bereich von $-1,5^\circ$ bis $+1,5^\circ$ durchgeführt. Erneut wurde die Prozessstabilität anhand der Lage der Prozessgrenzen bewertet (Beschichtungsfenster) und die Nassfilmgeometrie hinsichtlich der Beschichtungsbreite, der Nassfilmhöhe und der Randgeometrie analysiert. In Abbildung 8 sind die oberen und unteren Prozessgrenzen in Abhängigkeit des Anstellwinkels aufgetragen.

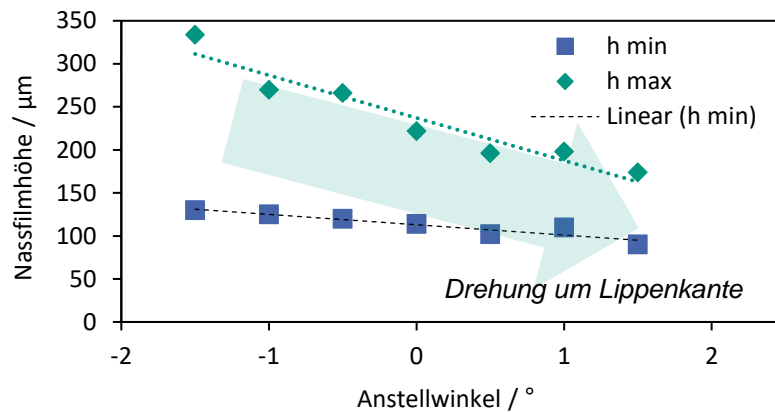


Abbildung 8: Experimentell ermittelte Prozessfenster in Abhängigkeit des Anstellwinkels bei einer Beschichtungsgeschwindigkeit von 5 m min^{-1} .

Aus den experimentellen Daten geht hervor, dass sich für steigende Anstellwinkel sowohl die obere, als auch die untere Prozessgrenze hin zu niedrigeren Nassfilmhöhen verschiebt. Außerdem ist eine Verschmälerung des Beschichtungsfensters für steigende Anstellwinkel erkennbar. Als Ursache sind auch hier die Druckverhältnisse im Spalt wahrscheinlich. Durch den lokal veränderlichen Abstand zwischen Düse und Substrat über den Spalt hinweg verändert sich das Verhältnis der Druckverluste der Kanalströmungen unterhalb der Düsenlippen zueinander und zum Krümmungsdruck, der an den Menisken wirkt. Die Erhöhung des Anstellwinkels führt zu einer Steigerung des Druckverlusts am Düsenauslass und stabilisiert somit Betriebspunkte mit niedrigeren Nassfilmhöhen. Die Herabsetzung der oberen Prozessgrenze lässt sich ebenfalls auf die Druckverteilung zurückführen, da der relativ betrachtet kleinere Druckverlust auf der Upstream-Seite zu einem früheren Einsetzen der Quellung aus dem Spalt führt.

Zur Veranschaulichung der Einflüsse des Anstellwinkels auf die Nassfilmgeometrie sind in Abbildung 9 die mittlere Nassfilmhöhe (links) und die Beschichtungsbreite (rechts) in Abhängigkeit des Anstellwinkels abgebildet. Für die Spalthöhe von $180 \mu\text{m}$ sind jeweils zwei Betriebspunkte mit den vorgegebenen Nassfilmhöhen von 174 und $156 \mu\text{m}$ gegenübergestellt.

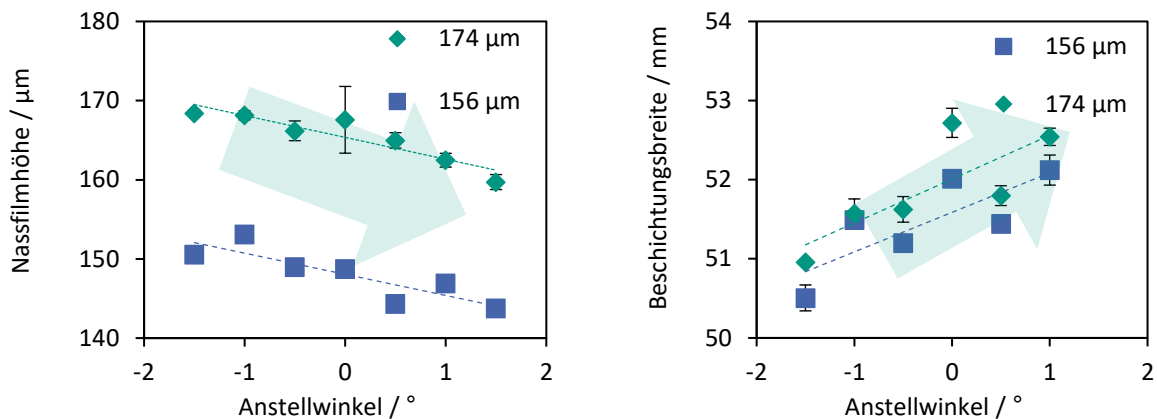


Abbildung 9: Experimentell ermittelte Nassfilmhöhe (links) und Beschichtungsbreite (rechts) in Abhängigkeit des Anstellwinkels für die Betriebspunkte 156 μm und 174 μm bei der Beschichtungsgeschwindigkeit 5 m min^{-1} und der Spaltweite 180 μm .

In den experimentellen Daten ist für steigende Anstellwinkel eine Abnahme der mittleren Nassfilmhöhe bei gleichzeitiger Zunahme der Beschichtungsbreite erkennbar. Dieser Trend ist ebenfalls auf die Druckverteilung im Spalt bzw. am Düsenauslass zurückzuführen. Eine Steigerung des Anstellwinkels führt aufgrund der lokalen Verringerung des Spaltabstands auf der Downstream-Seite zu einer Zunahme des Strömungsdrucks. Daraus resultiert wiederum die Verbreiterung des Films, mit der die Abnahme der Nassfilmhöhe einhergeht. Die Daten sind mit den Erwartungen und den Beobachtungen aus den oben aufgeführten Untersuchungen für den Einfluss des Spaltabstands konsistent.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in AP 1 gewählte Genauigkeit von 15 μm für die Einstellung des Spaltabstands ausreichend ist. Es konnte sichergestellt werden, dass die Zielgrößen durch die damit verbundenen Einflüsse den vorgegebenen Toleranzbereich nicht verlassen. Zudem wurde der Einfluss des Anstellwinkels untersucht und quantifiziert, woraus ein signifikanter Einfluss auf die Beschichtungsfenster (Prozessstabilität) und die Nassfilmgeometrie (Höhe, Breite und Randgeometrie) hervorgeht. In Kombination mit dem Spaltabstand ergeben sich so zwei Größen, mit denen die Zielgrößen beeinflusst werden können. Die Ergebnisse aus den Parametervariationen dienen im Folgenden als Grundlage für die KI-basierte Regelung.

UAP 3.2: Etablierung und Umsetzung des Schlitzdüsenkonzepts auf die Beschichtung

In UAP 3.2 galt es, die Anforderungen an das flexible Schlitzdüsenmodul in ein konkretes Designkonzept zu übertragen, eine Konstruktion zu erstellen und das Modul in die Versuchsanlage zu integrieren.

An erster Stelle steht die Festlegung der Anforderungen. Dazu gehört eine variable Düsenaustrittsbreite im Bereich zwischen 58 und 200 mm. Die Einstellung der Austrittsbreite soll dabei manuell und nur offline möglich sein. Zudem ist die Strömungsführung in der Schlitzdüse zu beachten, welche durch eine geeignete Schlitzinnengeometrie beeinflusst wird. Diese ist von zentraler Bedeutung, um eine ausreichend homogene Querverteilung der Paste im Inneren der Schlitzdüse sicherzustellen, welche in direktem Zusammenhang mit der Homogenität der Nassfilmhöhe und damit auch des Flächengewichts steht. Des Weiteren ist zu beachten, dass sich das Schlitzdüsenmodul einfach handhaben lässt, kompakt gebaut ist, eine einfache und schnelle Reinigung zulässt und eine feste Einbauposition ohne Abweichung durch Verschiebung der Seitenbacken gewährleistet.

Aus den genannten Anforderungen leitet sich das Designkonzept ab. Auf Abbildung 10 ist das konzipierte Design in einer Gesamtansicht von vorne dargestellt.

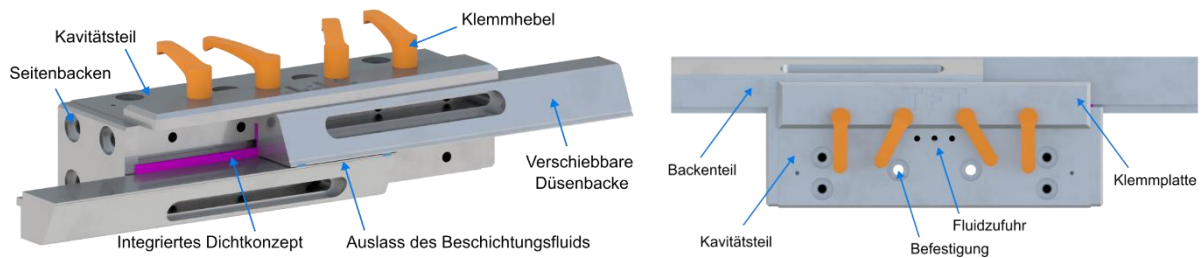


Abbildung 10: links: Das Schlitzdüsenmodul in der Vorderansicht. rechts: Das Schlitzdüsenmodul in der Draufsicht.

Im Prinzip ist das Modul räumlich und funktional in zwei Bereiche eingeteilt, den Kavitätsteil und den Backenteil. Im Kavitätsteil wird die Fluidströmung eingeleitet und über die Breite verteilt. Dabei wird, unabhängig von der eingestellten Auslassbreite, die volle Düsenbreite genutzt. Der Druckverlust der seitwärts gerichteten Strömung wurde durch die Geometrie so angepasst, dass die relevanten Formulierungen der eingesetzten Anodenpasten eine ausreichend homogene Querverteilung erhalten. Zusätzlich soll die Wandschubspannung einen Mindestwert übersteigen, um Ablagerungen o.ä. zu vermeiden. An den Seiten wird der Kavitätsteil durch die Seitenbacken fixiert, die das System zusätzlich zur Seite hin abdichten.

Im Backenteil erfolgt die Feststellung in mehrere Richtungen. Einerseits werden pro Backe mindestens zwei Schrauben in Fließrichtung genutzt, die im von vorne ersichtlichen, gestuften Langloch mit der Düsenbackenoberfläche abschließen. In vertikaler Richtung wird die Düse fixiert. Dazu wird die Feststellplatte mit Hilfe der Klemmhebel mit dem verschraubten Kavitätsteil auf den Untergrund gepresst. Der seitliche Freiheitsgrad wird durch die Reibung abgefangen. Zur Abdichtung zum Kavitätsteil sind an der Backenrückseite Kunststoffflaschen angebracht, die in Längsrichtung ebenfalls fixiert werden und damit den Schlitz abdichten.

Bei einer Änderung der Auslassbreite werden Klemmhebel sowie Schrauben gelöst und die Düsenbacken gegeneinander verschoben, wobei die an den Backen befindlichen Federn in einer am Kavitätsteil befindlichen Nut gleiten. Die beiden Endzustände resultieren in Auslassbreiten von 58 mm und 200 mm.

AP 4: Messglied - Qualitätssicherung und In-Line Messtechnik (wbk-PRO)

Das Ziel des Arbeitspakets 4 war die prozesssynchrone Bereitstellung von relevanten Qualitätskenngrößen des Beschichtungsprozesses. Hierzu werden in AP 4.1 zunächst kritische Kenngrößen identifiziert und zu deren Erfassung geeignete in-process-fähige Messtechnik ausgewählt. Anschließend wird die Messtechnik in AP 4.2 sowohl hardware- als auch softwareseitig in die Versuchsanlage integriert. Auf dieser Basis erfolgten in AP 4.3 die Fusion und Analyse der Messdaten, um eine Prozessregelung (entwickelt in AP 5) zu ermöglichen

UAP 4.1: Identifikation kritischer Prozessparameter und Auswahl der Messtechnik

Die Wahl und Spezifikation der Qualitätskenngrößen erfolgte in enger Abstimmung mit AP 1 (vgl. Lastenheft in AP 1). Für das vorliegende AP wurden die Nassfilmhöhe (Messbereich (MB) 50 μm - 500 μm , Toleranzbreite +/- 1,5 %) sowie die Überhöhung des Randbereichs (zulässig von 0 μm - 50 μm , Aussage über Form und Höhe) als Messgrößen mit zugehöriger Prüf-, bzw. Messaufgabe identifiziert.

In einem dreistufigen Verfahren werden zuerst Ausschlusskriterien festgelegt. Anschließend werden Anforderungen vom Messverfahren an das Messobjekt und die Messumgebung bewertet, deren Erfüllung über den späteren Integrationsaufwand entscheidet. Abschließend wird die Prozesseignung der Messverfahren abgeschätzt. Anhand der notwendigen Anforderungen hinsichtlich in-process-Fähigkeit und berührungslosen Messen, sowie unter Berücksichtigung der Kriterien Auflösung, Messfrequenz, Kosten und Bauraum konnte als geeigneter Kompromiss das 2D-Lichtschnittverfahren (Lasertriangulation), und das chromatisch-konfokale Messverfahren identifiziert werden. Mit diesen Verfahren wurden mögliche Integrationsoptionen erarbeitet, die unterschiedlichen Realisierungen der Sensorik entsprechen. Die Optionen unterscheiden sich in Anzahl, Anordnung, Integration und Ausführung der Sensoren.

Für die jeweiligen Sensoren wurde zudem ein Eintrag in einem Messtechnikcatalog erstellt. Auf dieser Basis wurden die Integrationsoptionen mit zugeordneter Messtechnik in einer Nutzwertanalyse analysiert. Die Kriterien, dargestellt in Tabelle 2, wurden mit Faktoren von 1 bis 3 gewichtet und anhand ihres Erfüllungsgrades (E) von 0 (ungenügend) bis 4 (sehr gut) bewertet. Der Faktor aus Gewichtung und Erfüllungsgrad ergibt den gewichteten Erfüllungsgrad G, dessen Summe den Endwert der jeweiligen Messoption darstellt (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Nutzwertanalyse der Integrationsoptionen

Kriterium	Gewichtung	Option 1		Option 2		Option 3		Option 4		Option 5		Option 6		Option 7		Option 8		Option 9		Option 10	
		E	G	E	G	E	G	E	G	E	G	E	G	E	G	E	G	E	G	E	G
Geschwindigkeit	3	1	3	1	3	1	3	4	12	4	12	1	3	1	3	4	12	4	12	1	3
Auflösung	3	4	12	4	12	4	12	2	6	2	6	3	9	3	9	3	9	0	0	3	9
Messbereich	2	1	2	1	2	2	4	2	4	3	6	3	6	3	6	3	6	1	2	3	6
Integrationsaufwand	1	1	1	1	1	1	1	4	4	3	3	1	1	1	1	3	3	4	4	1	1
Fehleranfälligkeit	2	1	2	1	2	2	4	2	4	4	8	3	6	3	6	2	4	3	6	2	4
Referenz	2	1	2	2	4	1	2	3	6	4	8	2	4	3	6	2	4	4	8	2	4
Erfahrung	2	0	0	0	0	0	0	4	8	3	6	0	0	0	0	2	4	3	6	0	0
Anschaffungsaufwand	1	2	2	2	2	1	1	4	4	3	3	0	0	0	0	3	3	4	4	2	2
Reifegrad	2	1	2	1	2	1	2	4	8	3	6	1	2	1	2	2	4	3	6	0	0
Σ			26		28		29		56		58		31		33		49		48		29

Am besten schnitten Verfahren mit zwei stationären Lichtschnittsensoren über den Beschichtungsrändern, beziehungsweise über einem Rand und der Beschichtungsmitte, ab. Nachfolgend wurden für diese Integrationsoptionen die vier geeignetsten Sensoren aus dem Messmittelcatalog ausgewählt, und unter Laborbedingungen und anschließend an der Versuchsanlage getestet. Um die Beschichtungshöhe sowie Randüberhöhungen bei der maximalen Beschichtungshöhe von 500 μm erfassen zu können, ist entsprechend der Voruntersuchung ein Messbereich von mindestens 30 mm Richtung der Rotationsachse der Walze nötig.

Die Messungen unter Laborbedingungen erfolgten mit getrockneten und kalandrierten Anodensheets mit einer Dicke von 151 μm . Getestet wurden die Sensoren MLWL 131 der Firma Wenglor (MB 30,0 mm - 52,0 mm), ScanCONTROL 3060-50 (MB 43,3 mm - 56,5 mm) und 3060-25 (MB 23,0 mm - 26,8 mm) des Herstellers Micro-Epsilon, sowie der Sensorkopf LJ-X8080 (MB 30,0 mm – 39,0 mm) der Firma Keyence. Von diesen konnte das System der Firma Wenglor sowie der Sensor 3060-50 von Micro-Epsilon keine ausreichende Auflösung erreichen.

Anschließend folgten Messungen der verbliebenen beiden Sensoren an der Versuchsanlage bei einer Nassfilmhöhe von 150 μm . Hier zeigte sich, dass der Sensor der Firma ScanCONTROL die Walzenoberfläche bei Messfrequenzen von 500 Hz bis 1000 Hz nicht zuverlässig erfassen kann (vgl. Abbildung 12). Der Sensor von Keyence ist in der Lage, auch im kHz-Bereich zuverlässig Messergebnisse zu liefern.

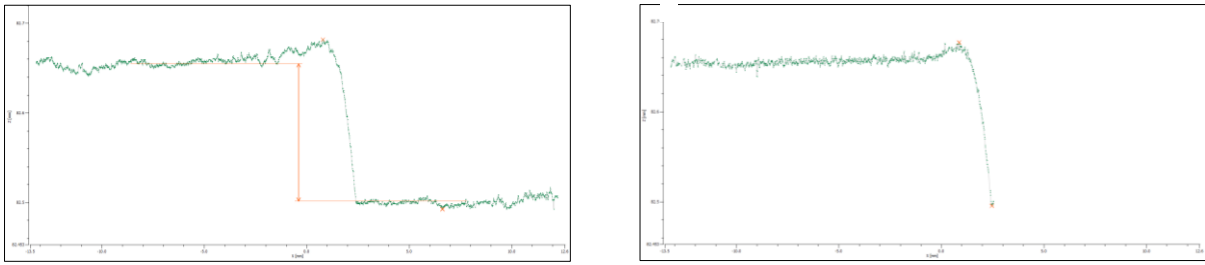


Abbildung 11: ScanControl 3060-25 Beschichtungsmessung mit 25 Hz (links) und 1000 Hz (rechts).

Somit konnte AP 4.1 erfolgreich abgeschlossen werden. Zur Überwachung von Nassfilmhöhe und Randüberhöhung wurden zwei Lasertriangulationssensoren LJ-X8080 der Firma Keyence mit den zugehörigen Steuergeräten LJ-X8000A beschafft.

UAP 4.2: Verbund von Messtechnik und Manipulator und Sensordatenvalidierung

Das folgende Arbeitspaket AP 4.2 sieht die hard- und softwareseitige Integration dieses Messsystems in die Versuchsanlage vor. Bezüglich der Hardwareanbindung umfasst dies die notwendige offline Breitenverstellung der Sensoren, um eine Anpassung an verschiedene Beschichtungsbreiten zu ermöglichen. Zusätzlich bedarf es eines Konzeptes, welches zukünftig auf weitere Anlagen und Beschichtungsanforderungen übertragen werden kann. Auf Basis dieser Anforderungen wurden verschiedenen Integrationskonzepte erarbeitet. Als nächster Schritt wurde das finale Konzept ausgewählt und aufgebaut (siehe Abbildung 12). Anschließend erfolgte die Integration in die Anlage. Gleichzeitig wurde die Synchronisation der Sensoren sowie deren Anbindung der Sensoren an die Steuerung realisiert.

Das gewählte Konzept ermöglicht, mittels zweier Linearachsen (Hub je 100 mm), eine sensorindividuelle Verstellung in z-Richtung, um auf unterschiedliche Schichthöhen zu reagieren. Weitere Linearachsen (Hub je 50 mm) ermöglichen die individuelle Einstellung jedes Sensors in x-Richtung, um flexibel Schichtbreiten zwischen 56 mm bis 200 mm aufnehmen zu können. Im aktuellen Aufbau sind die Sensoren senkrecht zur Beschichtung ausgerichtet.

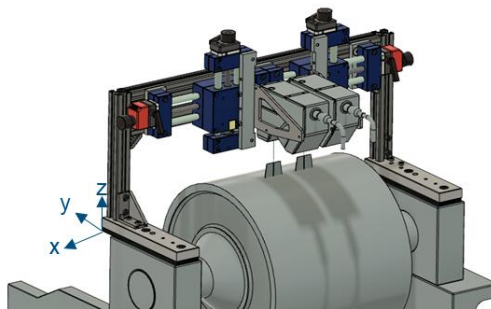


Abbildung 12: Hardwareseitige Integration der Lichtschnittsensoren in die Versuchsanlage als CAD.

Die Kalibrierung der Sensoren erfolgt mittels der Keyence-Software LJ-X-Navigator. Diese wird ebenso zum Setzen der globalen Sensor-Einstellungen verwendet. Hierzu zählen unter anderem die Konfiguration des Speicherzugriffs und der Master-Slave-Synchronisation, um beide Sensoren gleichzeitig zu empfangen. Die Sensoransteuerung und Datenübertragung wird über eine Programmierschnittstelle in Python umgesetzt. Hierzu wurde ein entsprechendes Skript geschrieben, welches für eine High-Speed-Datenübertragung konfiguriert ist. Die Datenübertragung erfolgt Batch-

Weise, wobei die Batch-Größe auf die Bahngeschwindigkeit angepasst wird. Die Datenpipeline wurde in Vorversuchen mit einem angeschlossenen Sensor getestet, wobei die Datenspeicherung in eine .csv-Datei je Batch erfolgte. Weiterführend wurde aufgrund der binären Speicherung und den damit verbundenen Vorteilen hinsichtlich Schnelligkeit und Effizienz „.npy“ als Zwischenspeicherformat für die anschließende inline Datenanalyse verwendet. Anschließend erfolgt die Übergabe an Arbeitspaket 5.

Als nächster Schritt erfolgte die Erweiterung auf eine synchronisierte Datenaufnahme beider Sensoren und die Validierung der Messgenauigkeit. Hierzu wurden Messungen an einem Parallel-Endmaß nach DIN EN ISO 3650 aus Keramik mit bekannter Merkmalsausprägung, sowie an verschiedenen Abstandsfolien definierter Dicke durchgeführt. Auf dieser Basis können anschließend die Sensordatenvalidierung und Datenanalyse im Arbeitspaket 4.3 erfolgen.

UAP 4.3: Algorithmen zur Sensordatenauswertung

Es hat sich gezeigt, dass insbesondere systematische Messabweichungen, bedingt durch ein Verstellen der Sensoren des Hardwareaufbaus, starke zufällige systematische Messabweichungen in das System induzieren, was eine nachgelagerte Bestimmung eben dieser systematischen Messabweichungen nach jeder Systemverstellung durch eine Kalibrierung notwendig macht. Zuletzt ist untersucht worden, inwiefern basierend auf den aufgenommenen Messdaten eine Bewertung der funktionskritischen Qualitätsmerkmale des Nassfilmprofils ermöglicht werden kann. Es ist ein Ansatz basierend auf maschinellem Lernen (ML) gewählt worden. Es wurde ein Autoencoder-System trainiert, welches in der Lage ist, Verläufe akzeptabler Nassfilmprofile zu replizieren. Dieser Autoencoder kann genutzt werden, um bei Input nicht akzeptabler Nassfilmprofile einen Rekonstruktionsfehler zu berechnen. Ist dieser hoch, so ist die Wahrscheinlichkeit eines anomaliebehafteten Nassfilmprofils hoch. Damit lassen sich anomaliebehaftete Nassfilmprofile erkennen, was ein Indiz für Prozessfehler ist.

AP 6: Zusammenführung im Demonstrator (Alle)

Die Hardwarekomponenten aus den vorangegangenen APs wurden in den Gesamtaufbau integriert und die Ansteuerung und Kommunikation zwischen SPS, Berechnungseinheit (PC) und den einzelnen Controllern von Messtechnik und Antrieben umgesetzt. Dabei wurden auch der Regler sowie das HMI (AP5) durch das IOSB integriert. Die Ansteuerung der Antriebe und somit der sicherheitsrelevanten Teile läuft über die SPS. Die Kommunikation zwischen PC und SPS läuft über Profinet und eine echtzeitfähige Schnittstelle.

Auf Basis der erfolgten Vorbereitung aller Einzelkomponenten (Motoren, SPS, Liniensensoren, konfokale Punktsensoren, Berechnungseinheit) sowie der Vorbereitung der Kommunikationsarchitektur, erfolgte in AP6 deren Zusammenführung zu einem Gesamtsystem. Bei der Ansteuerung kann auf direkte Kommunikation über Analog- und Digitalsignale gesetzt werden. Dies wird durch einen in den Motor integrierten Controller ermöglicht. Die Stellgrößen erhält die SPS wiederum über eine Profinet-Schnittstelle von der Berechnungseinheit (PC). Durch eine extra Profinet-Netzwerkkarte (Ixxat - INpact) wurde eine echtzeitfähige Kommunikationsschnittstelle implementiert und die rechenaufwendige Datenverarbeitung von der sicherheitsrelevanten Ansteuerung der Motoren entkoppelt. Dabei wird ausgehend von den über die Profinet-Verbindung erhaltenen Stellgrößen eines neuen absoluten Sollwertes für Spaltabstand und Anstellwinkel das entsprechende Signal für die Ausgangsgrößen bestimmt. Neben der Übersetzung in ein Analogsignal des Sollwertes für den Anstellwinkel wird der Spaltabstand über einen konfokalen Punktsensor überwacht und somit

der Istwert des Spaltabstandes in einem zweiten Regelkreis überwacht. Die Ansteuerung des Anstellwinkels erfolgt dabei über eine vorgegebene Position, die Ansteuerung des Spaltabstandes über eine vorgegebene Geschwindigkeit, abhängig von der Abweichung vom aktuellen Sollwert. Die Verarbeitung der Signale der SPS erfolgt im internen Controller der Motoren. Aufgrund der verschiedenen Ansteuerungen unterscheiden sich ebenfalls die jeweiligen Programme. Die Programmierung erfolgte dabei in der Umgebung NanoJ des Herstellers Nanotec. Zusätzlich wurde auch eine Referenzierfunktion für beide Stellgrößen implementiert. Eine Referenzierung ist dabei nach Neustart des Systems oder auch bei Umbau notwendig. Auch bei längeren Standzeiten oder großer Änderung des Arbeitspunktes ist eine erneute Referenzierung zu empfehlen.

Für die Sensorik ist ebenfalls die Integration in die Anlage sowie deren Integration an die Kommunikationsschnittstellen erfolgt. Das Python-Skript für das Starten und Auslesen der Sensoren wurde bereits vorab aufgebaut und getestet. Bei der Integration auf der Recheneinheit wurde das Programm hinsichtlich der Schnittstellen zum Regler angepasst. Hierbei werden die vorverarbeiteten Rohdaten zur Verfügung gestellt. Die Vorverarbeitung umfasst dabei ein Glätten zur Beseitigung des Messrauschens und eine initiale Winkelkorrektur. Die Winkelkorrektur im Gesamtaufbau, bei welcher die Orientierung der Sensoren zu der gemessenen Oberfläche im Programm kompensiert wird, ist dabei zu jedem Systemstart durchzuführen. Für den Gesamtaufbau wurde insbesondere die Kommunikationsschnittstelle angepasst und es wurde für einen stabileren Betrieb mit entsprechenden Geschwindigkeiten gesorgt. Weiter wurde eine Option zur Einstellung der Batchgröße einer Aufnahme über das HMI ergänzt. Dies ist notwendig, um die Batchgröße an die Beschichtungsgeschwindigkeit anzupassen. Zusätzlich wurden die Sensoren im laufenden Betrieb getestet. Die stärker spiegelnde Oberfläche des Nassfilms in Kombination mit der Bewegung der Rolle erforderte dabei eine Feinjustierung der Sensorparameter. Durch reduzierte Belichtungszeiten und ein stärkeres Glätten konnten so Effekte durch die – im Vergleich zur vorab durchgeführten offline Validierung - anspruchsvolleren Bedingungen reduziert werden.

Für die Integration des Zeilenkamerasystems in das Gesamtsystem wurde von der Nutzung der Originalsoftware zeitnah abgesehen, da hier keine Programmierschnittstelle existiert und alle Anpassungen an den Kameraparametern manuell über die Keyence-Oberfläche vorgenommen werden müssen. Dies bedeutet eine umständliche Handhabung im laufenden Betrieb und bei variablen Prozessbedingungen. Daher wurde im nächsten Schritt auf Rat des Herstellers die Software „Harvester“ genutzt, welche die GenICam Plattform in Python einbindet und damit grundsätzlich mit dem Human-Machine-Interface des ReFlexBat-Projekts kompatibel ist. Dazu ist es in einem ersten Schritt notwendig, einen GenICam Producer einzubinden, was über die Software "Impact Control" realisiert wurde. Die Grundfunktionen konnten damit abgedeckt werden, jedoch stellte sich heraus, dass gewisse kritische Parameter (z. B. die Zeilenfrequenz) nicht über diesen Weg eingestellt werden können, sondern wieder über die Herstellersoftware festgelegt werden müssen. Außerdem hat sich gezeigt, dass die Software bei kontinuierlicher Bildaufnahme nicht den erforderlichen Datendurchsatz verarbeiten konnte und damit nach wenigen Minuten keine Echtzeitdaten mehr ausgab. Schließlich wurde die kglLib-Bibliothek der Kamera über eine C#-Schnittstelle in Python integriert, um direkt auf die originalen Methoden Zugriff zu erlangen. Dazu war es zuerst notwendig, den Keyence-Namespace in Python zu integrieren. Damit konnte eine python-basierte Kamera-Klasse erstellt werden, die als Python-Objekt behandelt wird, jedoch im Hintergrund auf die C#-Methoden zugreift. Um eine möglichst reibungslose und benutzerfreundliche Bedienung zu gewährleisten, sind die Kameraparameter in Form einer .xml-Datei gesammelt abgelegt und dienen als

Initialisierungsparameter. Die Prozessparameter erhält die Klasse durch die Kommunikation mit einem Node-red-Dockercontainer, woraus sich die Kameraparameter inline ableiten und automatisch anpassen lassen. Ein zentraler Punkt bei der kontinuierlichen Aufnahme ist das Bufferhandling. Der Buffer wird im Modus „Ring“ kontinuierlich mit Daten befüllt, bis seine Kapazität erreicht ist, der älteste Eintrag wird anschließend überschrieben. Konventionelle Kopiervorgänge vom Speicher in einen temporären Speicher sind nicht ausreichend schnell, um bei der Schreibgeschwindigkeit in den Buffer mitzuhalten. Daher war es notwendig, eine Optimierung der Berechnungszeit durchzuführen, durch für die Anwendung zugeschnittene Bibliotheken (z. B. `numpy.from_buffer()`). Die Weiterverarbeitung der Rohdaten kann somit parallelisiert werden und trägt nicht zu einer Verzögerung oder einem Überspringen von Datenpunkten bei. Letztlich ergab sich außerdem eine Abweichung zu den vom Hersteller verfügbaren Programmieranweisungen, sodass die `queueBuffer()`-Methode in jedem Aufnahmezyklus erneut aufgerufen werden muss. Durch diese Vorgehensweise ist das System zu höheren Beschichtungsgeschwindigkeiten bis zu 140 m/min bei voller Auflösung unter kontinuierlicher Schichtvermessung befähigt und kompatibel mit der weiterführenden Verarbeitung der Bilder (Defekterkennung, Ermittlung der Beschichtungsbreite) und dem Dashboard (Node-Red).

Die Integration des Reglers in den Demonstrator benötigt eine funktionierende Pipeline zur Steuerung über das HMI, Weitergabe und Verarbeitung von Daten sowie für die Extraktion von Kenngrößen. Ein wichtiger Punkt ist die Neigung des Profilsensors, welche in Echtzeit kompensiert werden muss. Die Neigungskorrektur wurde in den ersten Versuchen zur Vereinfachung und Verbesserung der Vergleichbarkeit offline durchgeführt und wird in folgenden Programmversionen in die Pipeline integriert. Das korrigierte Profil wird dann im „SurfaceFeatureExtract“-Tool weiterverarbeitet, um die charakteristischen Punkte zu extrahieren. Im Programmablauf wurden während der Versuche an verschiedenen Stellen Optimierungen vorgenommen (Robustheit, Mittelungsintervalle, Gradientensuche und Plausibilitätsprüfungen). Die extrahierten Kenngrößen werden anschließend im Regler verarbeitet. In der ersten Version hatte dieser eine einstufige, datengetriebene Logik, deren Grundlage auf der Datenbank aus AP3.1 besteht.

KIT + IOSB: Die Integration aller Hardwarekomponenten inklusive deren softwareseitigen Integration wurde abgeschlossen. Die Systeme basieren auf einer Kombination aus C# und Python. Letztere werden über das reproduzierbare Verfahren eines Docker-Stacks genutzt. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten erfolgt mittels geteilter Datenbanken in einem gemeinsamen Volume, mqtt, Profinet und das Dashboard (Node-Red).

Das Komplettsystem wurde in einer gemeinsamen Versuchskampagne getestet. Als Beschichtungsfluid wurde eine Anodenpaste verwendet. Als Zielwerte für die Nassfilmhöhe der Beschichtung wurden 156 μm , 180 μm und 200 μm bei einer Beschichtungsgeschwindigkeit von 5 m/min gewählt. Die Startposition der Schlitzdüse befand sich beabsichtigt im instabilen Bereich und nach dem Start des Volumenstroms über das Dosiersystem wurde der Regler eingeschaltet. Die gemessenen Nassfilmprofile wurden durch die `surfaceFeatureExtract`-Methode verarbeitet, parametrisiert und dem Regler übergeben. Die einstufige Regelung ergab für jeden Prozesspunkt einen optimierten Spaltabstand und Anstellwinkel, welche über die Aktuatorik erfolgreich eingestellt werden konnten. Somit wurde gezeigt, dass das Gesamtkonzept von Interaktion über das HMI über die Messung bis hin zur Steuerung und Regelung im Prinzip funktioniert.



Abbildung 13: Aufbau mit Komponenten: 1 Schlitzdüse, 2 Stellmotor, 3 Triangulationslaser, 4 Zeilenkamera.

Die erzeugten Nassfilmprofile im optimierten Prozesspunkt wurden anschließend manuell gesichtet und analysiert. Dabei zeigte sich, dass der Prozess durch die einstufige Regelung in den stabilen Bereich überführt werden kann. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass eine nachfolgende, inkrementelle Optimierung für jeden individuellen Prozesspunkt eine weitere Verbesserung der Qualität und Genauigkeit der Filmabmessungen bewirken kann. Ein manuelles Nachjustieren auf Basis der Trends, die aus AP3.1 bekannt sind, zeigte positive Auswirkungen auf die Randüberhöhungen und das Verhältnis von Beschichtungsbreite zu Schichtdicke. Um diesen Prozess in die autonome Prozesskontrolle zu integrieren, wurde der Regler durch das IOSB in eine zweistufige Struktur überführt. Im zweiten Schritt wurde eine inkrementelle Optimierung des Profils während einer kontinuierlichen Überwachung der Auswirkungen auf das Profil durchgeführt.

Traversierende Punktmessung

Eine alternative Messmethode für das Nassfilmhöhenprofil ist die traversierende Punktmessung, bei der ein konfokaler Punktsensor auf einer Linearachse befestigt ist und in Querrichtung über die Beschichtung bewegt wird. Die abgetastete Linie ergibt sich im laufenden Prozess als Diagonale, deren Steigung durch das Verhältnis zwischen Beschichtungs- und Traversengeschwindigkeit vorgegeben ist. Da es sich um einen stationären Prozess handelt, ist das gemessene Profil in einem stabilen Zustand dennoch repräsentativ und es ist möglich, Zugang zum gesamten Profil über die Breite zu erhalten, nicht nur im Randbereich. Damit sind fundierte Aussagen über die Qualität der Beschichtung und Kenngrößen der Nassfilmgeometrie möglich.

Im Produktionsprozess wird diese Messmethode genutzt, indem zwei identische Sensoren exakt gegenüber angeordnet sind und sich Schwankungen des Substrats gegenseitig kompensieren, sofern die Position des Substrats nicht den Messbereich der Sensoren verlässt. In diesem Projekt wurde jedoch direkt auf die Stahlwalze beschichtet, weshalb nur eine einseitige Messung möglich war. Wegen der fehlenden Gegenseite wirken sich sämtliche Vibrationen oder Änderungen der Sensorposition direkt auf das Messprofil aus, weshalb die Anforderungen an die Genauigkeit der Bewegung des Sensors und der Kalibrierung hoch sind. Zu Beginn wurde eine Hochpräzisionslinearachse von HIWIN gewählt, auf der ein konfokaler Punktsensor (Precitec CHrocodile, 3mm Messkopf) montiert wurde. In Abbildung 14 ist das integrierte Messsystem am Demonstrator gezeigt.

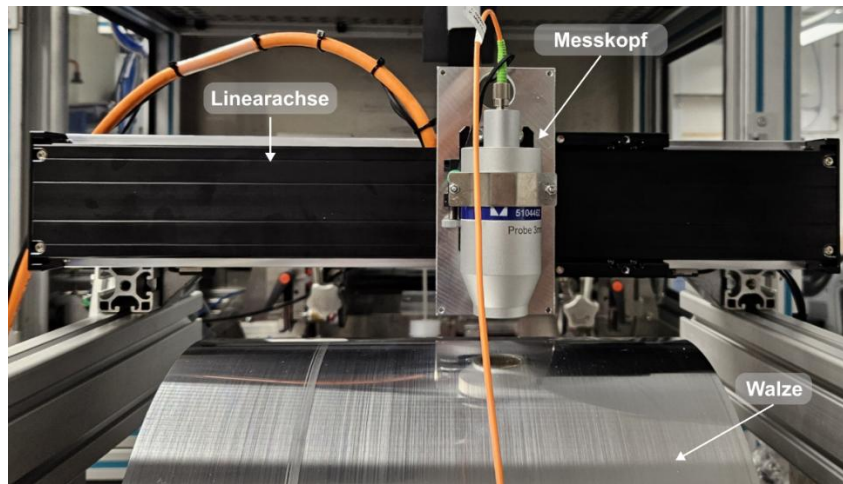


Abbildung 14: Integration des traversierenden Punktsensors mit Hochpräzisionslinearachse in den Demonstrator.

In einer ersten Kalibrierung zeigte sich, dass eine Referenzfahrt mit Messpunktaufzeichnung nicht ausreicht, da die Stahlwalze an jedem Punkt auf der Oberfläche einen geringfügig anderen Radius aufweist. Es war daher notwendig, die Oberfläche in kleine Bereiche aufzuteilen (ca. 10x10 mm). Während der Referenzfahrt wurde die Traversengeschwindigkeit so gewählt, dass jeder Bereich mindestens dreimal durchlaufen wurde, wobei der Mittelwert als Referenzwert gespeichert wurde. Die erhaltenen Messwerte stellen den Mittelpunkt des Bereichs dar, wobei eine Interpolation zu den umliegenden angewendet wurde. Es ergab sich daraus eine 3D-Topologie der Beschichtungswalze. Während der Messung einer Beschichtung ergab sich der bereinigte Messwert an einem bestimmten Punkt auf der Oberfläche der Beschichtungswalze aus der Differenz zwischen den Rohdaten und den Referenzwerten. Durch die Messung der Position der Walze durch einen Kontrastsensor konnten die der Position zugehörigen Referenzwerte in Echtzeit extrahiert und verrechnet werden. Um die Qualität der Kalibrierung zu überprüfen, wurde bei einer Beschichtungsgeschwindigkeit von 150 m min⁻¹ referenziert und bei kleineren Beschichtungsgeschwindigkeiten (5 bis 80 m min⁻¹) vermessen. Die dabei entstehenden Abweichungen zwischen Messwert und Referenzwert sind in Abbildung 15 dargestellt. Im Mittel ergab sich eine Genauigkeit von ca. $\pm 1 \mu\text{m}$ über einen weiten Bereich von Traversengeschwindigkeiten, unabhängig von der Bewegungsrichtung. Die Genauigkeit übertrifft dabei die Genauigkeit der Triangulationslaser.

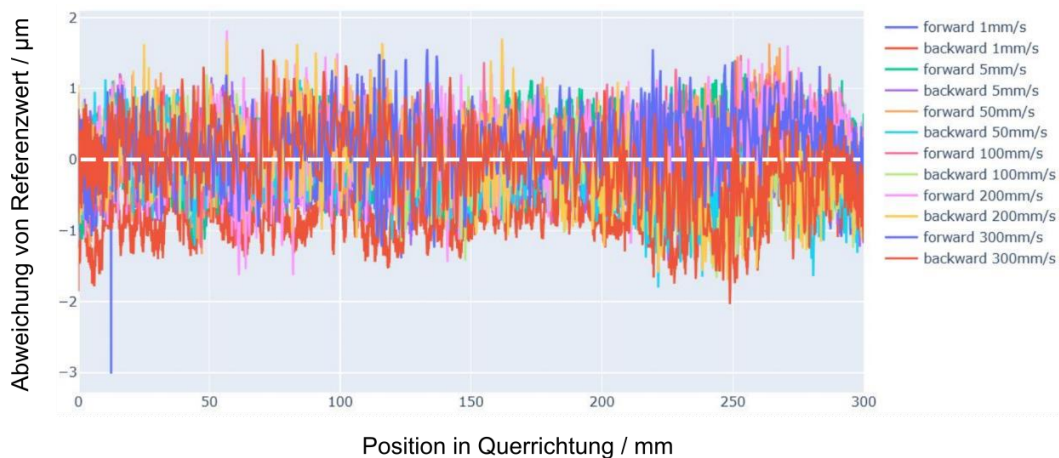


Abbildung 15: Genauigkeit der einseitig konfokalen Messmethode bei verschiedenen Traversengeschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen.

Mit der erfolgreichen Kalibrierung wurden Tests bei verschiedenen Beschichtungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Ein beispielhaftes Profil ist in Abbildung 16 gezeigt, wobei die identifizierten charakteristischen Punkte und Linien im Profil gekennzeichnet sind. Zum Vergleich ist außerdem der Messbereich der Triangulationslaser durch die rötliche Schattierung markiert.

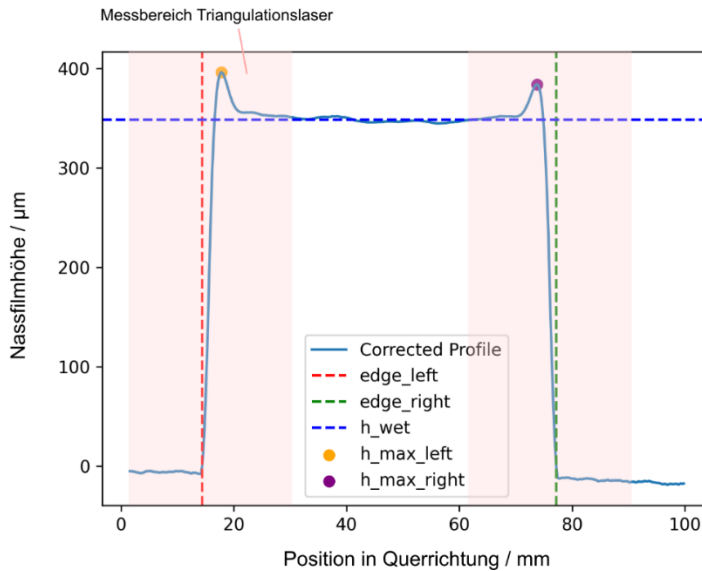


Abbildung 16: Nassfilmhöhenprofil gemessen mit dem Prinzip der traversierenden konfokalen Punktmessung.

Aus dem Beispiel geht hervor, dass durch das zusammenhängende Profil eine vereinfachte Extraktion der Kenngrößen möglich ist. Dazu gehört die Beschichtungsbreite, welche durch diese Messmethode ebenfalls direkt zugänglich ist. Die Randgeometrien und die Höhe des Nassfilmlateaus sind zudem deutlich erkennbar. Im Vergleich zu den Triangulationslasern ist der Informationsgehalt des Profils der Beschichtung mit 60 mm Breite erhöht. Mit steigender Beschichtungsbreite verstärkt sich dieser Trend. Im Optimalfall eignet sich die Kombination aus Triangulationslasern im Randbereich und einem traversierenden Punktsensor, um sowohl eine lückenlose Zeitreihe für die Randgeometrien zu erhalten, wobei gleichzeitig in regelmäßigen Abständen ein vollumfängliches Profil zur Analyse durch die traversierende Messung zur Verfügung steht.

Die Arbeiten des KIT im Projekt ReFlexBat legten die Grundlagen für ein profundes Prozessverständnis sowie die hardwareseitige Umsetzung einer selbstregelnden Beschichtungseinheit. Dies umfasste die Entwicklung eines tiefen Einblicks in die zugrunde liegenden Wechselwirkungen ebenso wie die Konzeption und Realisierung der erforderlichen technischen Komponenten. Die erzielten Ergebnisse fanden beim Projektpartner IOSB Anwendung und wurden dort für die Weiterentwicklung des Reglers genutzt.

I.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Posten	Bezeichnung	Soll	Ist
0812 - 0822	Personal	582.548 €	622.656 €
0850	Invest	168.299 €	172.096 €
Lfd. Nr. 1	Invest – Schlitzdüsenprototyp	83.000 €	43.218 €
Lfd. Nr. 2	Invest – Messsysteme	54.299 €	83.159 €
Lfd. Nr. 3	Invest – Aktor, Sensor, Steuerungstechnik	31.000 €	31.544 €
Lfd. Nr. 4	Invest – Zeilenkamera	0 €	14.175 €

0843	Sachmittel	54.013 €	20.946 €
0846	Dienstreisen	22.839 €	12.027 €
0899/ 0846	Summarisch/ Bundesmittel	827.699 €	827.725 €
0865	Projektpauschale	165.540 €	165.545 €

Im Projektverlauf haben sich zwei Anpassungen ergeben:

1. Umwidmung von 14.200 € von Pos. 0843 auf Pos. 0850 (Umwidmungsantrag vom 07.07.2022)
2. Kostenneutrale Verlängerung um sechs Monate (KNV-Antrag vom 24.01.2024)

I.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten zur Inline-Regelung und Verbesserung des Prozessverständnisses sind für die Batterielandschaft von großer Bedeutung. Sie fördern die Weiterentwicklung im Anlagenbau, verbessern die Qualität im Beschichtungsschritt und bestätigen die Machbarkeit und den Nutzen eines Inline-Regler-Konzeptes. Diese Fortschritte stärken die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie und tragen zur Innovationsführerschaft bei. Insbesondere führt die Reduktion des Produktionsausschusses zu ökologischen und ökonomischen Vorteilen.

I.4 Voraussichtliche Nutzung, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplan

Die Nutzung der im Rahmen des Projektes ReFlexBat erarbeiteten Ergebnisse wird nach den Gesichtspunkten der wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Verwertbarkeit dargestellt.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit

Durch das KIT als wissenschaftliche Institution ist keine direkte wirtschaftliche Verwertung angestrebt. Die Ergebnisse können jedoch in bilateralen Arbeiten mit der Industrie verbreitet werden und so in Serienanlagen implementiert werden. Entsprechende Angebote an die Industrie wurden beispielsweise auf den gemeinsamen Industrietagen der Cluster ProZell und InZePro veröffentlicht.

Wissenschaftliche und technische Verwertbarkeit

Für die wissenschaftliche und technische Verwertbarkeit sind Folgeprojekte mit Industriebeteiligung angestrebt. Insbesondere für das Vorhaben E-MoPEd (CGoIn – Transfermodul) ist eine Förderung mit Beginn 01.03.2025 absehbar. Hier soll im Sinne einer Verwertung der Ergebnisse aus dem Projekt ReFlexBat eine selbstregelnde Beschichtungsstation für Einzel- und Multilagen in klassischer „Fixed-Gap“-Konfiguration (TRL 5 auf TRL 7) konzipiert werden. Dadurch sollen die Kompetenzen der Firmen Jagenberg Converting GmbH (Jagenberg) und BASF SE (BASF) im Bereich der Beschichtung von Batterieelektroden gesteigert werden, um ihnen entscheidende Wettbewerbsvorteile als Anlagenbauer (Jagenberg) und Materiallieferant (BASF) für die industrielle Batterieproduktion zu verschaffen.

Zusätzlich werden die Erkenntnisse als Anwendungsbeispiel in den Vorlesungen „Automatisierte Produktionsanlagen“ und „Produktionstechnik für die Elektromobilität“ verwendet und den Studierenden vermittelt.

I.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Fortschritte in vergleichbaren Arbeiten in Forschungsprojekten bekannt geworden. Zu nennen ist das Projekt InTeAn, welches ebenfalls im Cluster InZePro verortet ist und in dem sich ebenfalls die Projektpartner wbk und IOSB beteiligen. Dessen Fokus liegt jedoch auf einer prozessübergreifenden Methodik für die In-Line Regelung.

Auf Seiten der Hersteller von Schlitzdüsen und Anlagenbauern wurden im Zeitraum zwei grundlegende Entwicklungen beobachtet. Zum einen findet die sogenannte „Flexlippe“ mit lokal einstellbarem Auslassspalt der Düse vermehrt Einsatz. Zum anderen werden Anlagen mittlerweile vermehrt auch mit der Option einer motorisierten Einstellung des Spaltabstandes und dessen In-Line Messung angeboten. Es bestätigt sich also die Entwicklung hin zu einem stärkeren Eingriff in den laufenden Prozess. Ein geschlossener Regelkreis der Beschichtungsqualität wie in ReFlexBat wird jedoch nicht angeboten.

I.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Zeitschriftenartikel

Denk, Florian; Hoffmann, Alex; Höger, Katja; Pfrommer, Julius; Poyer, Matthieu; Scharfer, Philip et al. (2022): Entwicklung einer autonomen Elektrodenbeschichtung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 117 (10), S. 673-676. DOI: 10.1515/zwf-2022-1128

Denk, Florian; Schabel, Sebastian; Hoffmann, Alexander; Scharfer, Philip; Schabel, Wilhelm; Fleischer, Jürgen (2024): Autonomous control of gap distance and angle of attack in slot-die coating. In: *Procedia CIRP* 121, S. 133-137. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.240.

Denk, Florian; Burg, Lukas; Schabel, Sebastian; Fleischer, Jürgen (2024): Implementation of a Fuzzy Controller for Battery Electrode Coating with a Slot Die. In: *Procedia CIRP* 130, S. 642-647. DOI: 10.1016/j.procir.2024.10.142.

Präsentationen

Denk, Florian; Fischer-Waldermann, Ole; Schabel, Sebastian; Fleischer, Jürgen (2023): Development of a module for inline variation of the angle of attack for existing electrode coating systems. In: International Battery Production Conference – IBPC.

1. Gemeinsamer Industrietag (ProZell und InZePro), 29.11.2021: ReFlexBat – Regelbare Beschichtungseinheit für die flexible Beschichtung von Batterieelektroden

2. Gemeinsamer Industrietag (ProZell und InZePro), 07.02.2023: Projektergebnisse und Transferangebote: ReFlexBat

Veröffentlichung ausstehend:

Denk, Florian; Fischer-Waldermann, Ole; Matkovic, Nikolas; Fleischer, Jürgen (2025): Optimized Control of In-Process-Measurement as an Enabler for Scrap Reduction in Electrode Coating, In: The 8 th International Conference on Sustainable Manufacturing (ICSM 2024)