

Vorschlag für ein Forschungsvorhaben im IGF-Programm der AiF

Arbeitstitel:

Erhöhung der Reproduzierbarkeit aerosolbasierter Verfahren mittels mathematischer Modellbildung und numerischer Simulation (Erbsae)

Forschungsstellen:

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. in Stuttgart (Akronym HS)

IMH - Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen der Hochschule Niederrhein (Akronym IMH)

Motivation:

Sprühverfahren wie Luft-, Ultraschall- oder Elektrostatiksprühsysteme kommen in den verschiedensten Industrien zur Herstellung von präzisen Strukturen und Oberflächenbeschichtungen zum Einsatz. Je nach zu verarbeitendem Material und Verfahren wird hier beispielsweise von Paintbrush für Lacksysteme, Conformal Coating für Kunststoffschichten auf Leiterplatten, aerosolbasierte Druckprozesse für nanopartikuläre Metallsuspensionen oder thermokinetisches Spritzen für keramische Schichten gesprochen. Alle Verfahren eint das Bedürfnis der Fertigung mit möglichst geringem Materialverbrauch bei hoher Präzision, Tiefenschärfe und Reproduzierbarkeit. Diese Anforderungen sind ebenfalls auf das Wasserstrahlschneiden und andere Prozesse wie Plasmastrahlbeschichtungen übertragbar. Durch die aktuellen und zukünftig dominierenden Trends wie Erreichung der CO₂-Neutralität, Digitalisierung, Industrie 4.0 und Künstliche Intelligenz wird das Bedürfnis zur Prozesskontrolle und -optimierung sowie Ressourcenschonung noch verstärkt und damit auch die Anzahl verbauter Sensoren in diesen Anlagen stetig zunehmen.

Herausforderungen bestehen bei Sprühverfahren hinsichtlich der Reproduzierbarkeit des Materialauftrags, der Schichthomogenität und der Fokussierung des Strahls. Hier ist insbesondere der Overspray-Effekt zu nennen, wobei dieser sehr stark von strömungsmechanischen Parametern wie der Reynoldszahl des Freistrahls abhängt (Beispiele in Abbildung 1 links und rechts oben). Der sich daraus ergebende Zusammenhang im Bezug zum Umschlag von laminar nach turbulent wurde bisher nur unzureichend untersucht. Des Weiteren erfolgt die Qualitätskontrolle bei der Herstellung von mittels Sprühverfahren hergestellten Strukturen und Beschichtungen meist indirekt durch optische Bildgebung erst nach Ende der Herstellung der gesprühten Schicht.

Eine Technologie, die für die Herstellung von Sensoren immer häufiger zum Einsatz kommt, ist die Drucktechnik. Hierbei eignet sich speziell die digitale Drucktechnik mittels Inkjet oder aerosolbasierte Verfahren wie Nano JetTM und Aerosol Jet[®] für die zunehmenden Anforderungen der Individualisierung durch ihre sehr hohe Flexibilität. Darüber hinaus lassen sich insbesondere aerosolbasierte Verfahren auch auf ausgewählte dreidimensionale Substratoberflächen übertragen, da hier nur eine Düse mit einem geringen Platzbedarf konturnah an der Substratoberfläche eingesetzt wird (Abbildung 1, rechts unten). Dies eröffnet die Chance gedruckte Sensoren sehr nah an das zu messende Signal zu bringen und es durch die direkte Anbindung an das Substrat und durch die Erzeugung sehr feiner Strukturen ohne größere Signalverluste zu erfassen. Bei neuen Anlagen können gedruckte Sensoren direkt integriert werden, bei älteren Modellen gibt es die Möglichkeit diese als Retrofit-Sensorik zu applizieren. Um gedruckte Strukturen mit für eine Auswertelektronik geeignete, definierten Widerständen zu erzeugen, wird daher in der Regel iterativ vorgegangen und eine geringe Ausbeute von 10 - 20 % in Kauf genommen. Ursache hierfür ist die beschriebene unzureichende Prozesskontrolle, welche sich bei dreidimensionalen Substraten verstärkt äußert. Zusätzliche

Entwicklungen wie steigende Variantenvielfalt und zunehmende Individualität von Anlagen und Produkten führen zu immer höheren Ansprüchen an die Sensoren.

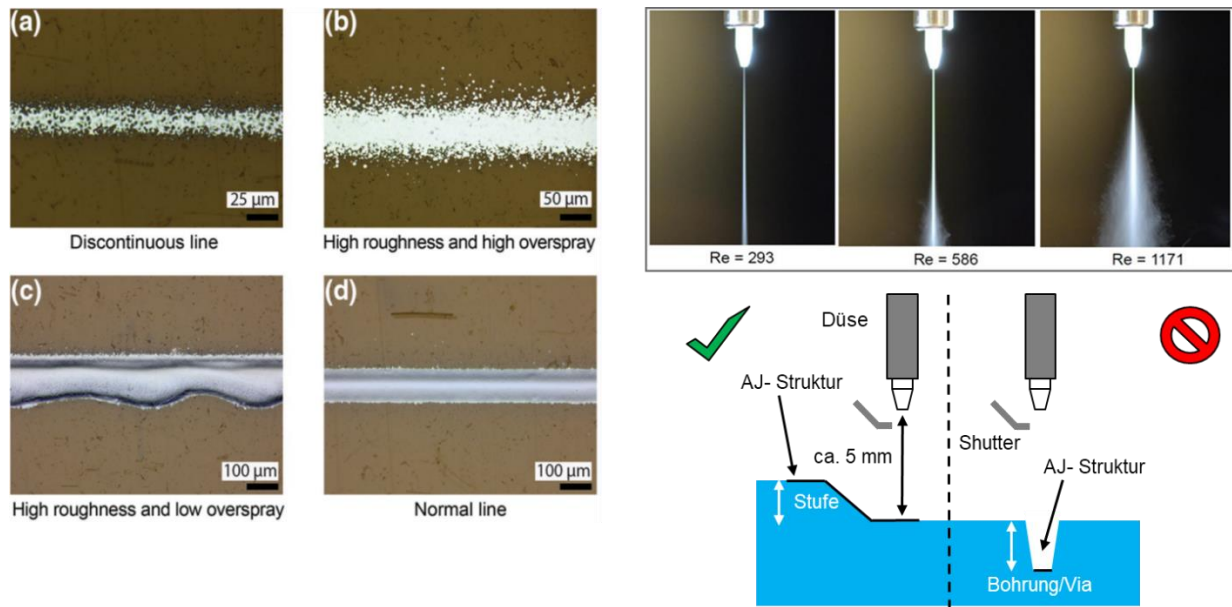


Abbildung 1: Links: Unterschiedliche Fehlerbilder a) diskontinuierliche Linie, b) hohes Overspray, c) stark ungleichmäßige Linie, d) Linie mit optimalen Bedingungen nach [Zhang, H. 2020] Rechts oben: Bilder von Freistrahlen bei verschiedenen Reynoldszahlen [Feng, J. 2019] Rechts unten: Aktuell mögliche Anwendungsszenarien von aerosolbasierten Druckverfahren.

Lösungsansatz:

Zu Beginn des Projektes sollen hinsichtlich verschiedenster Sprühtechnologien verfahrensoffen verschiedene Lösungspotentiale analysiert werden (Abbildung 2). Hierdurch werden die Erfahrungen aus diesen Technologien früh in die Entwicklung einbezogen, sodass diese Herstellungsmethoden zukünftig durch den in diesem Projekt gewählten Ansatz profitieren können. Aus den verschiedenen Sprühverfahren werden in der ersten Phase des Projektes mehrere generische Prozesse definiert.

Der Lösungsansatz besteht aus paralleler Verfolgung einer Sensorintegration am/im Druckkopf sowie mathematischer Modellbildung und numerischer Simulation der Strömungsvorgänge im und nach dem Druckkopf.

Um die Inline-Prozesskontrolle zu verbessern, sind wichtige Größen wie Druck, Temperatur, Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsverteilung sowie Aerosoltropfengröße und -verteilung an verschiedenen Messpunkten wie z.B. dem Eintritt in den Düsenkopf zu ermitteln. Im Rahmen des Projektes sollen daher Sensoren für Druck und Temperatur analysiert und definiert sowie in den Bereich des Aerosolstroms integriert werden. Weitere Sensorprinzipien, wie z.B. die optische Messtechnik sollen ebenfalls getestet werden. Dies soll die Inline-Messung der genannten Größen während des Prozesses und eine Vorhersage auf die zu erwartenden Eigenschaften am Beispiel gedruckter Sensoren ermöglichen. Die dabei erzeugten Erkenntnisse der Sensorintegration sollen auf die gewählten generischen Prozesse übertragbar sein.

Parallel sollen mittels mathematischer Modellbildung und numerischer Simulation der Strömung im Inneren der Düse zusammen mit dem Freistrahle nach der Düse der vorher definierten generischen Prozesse bisher unbekannte Zusammenhänge und neue Erkenntnisse erschlossen werden (Abbildung 2). Anschließend wird eine Verfahrensoptimierung der generischen Prozesse mittels einer sogenannten Front-Loading-Entwicklung im Rahmen der numerischen Strömungssimulation durchgeführt, bei der vor der ersten Geometriefestlegung in Simulationsmodellen Designvarianten

untersucht und optimiert werden. Erst danach werden physische Modelle der optimierten generischen Prozesse gefertigt und experimentell überprüft. Die Verbesserungen wirken sich beispielsweise positiv auf die Fokussierung des Strahls und somit auf einen geringeren Materialverbrauch bei einer gleichzeitig höheren Tiefenschärfe der Prozesse aus.

Die Vorhersagequalität der im Projekt entwickelten mathematischen Modelle und numerischen Simulationen der generischen Prozesse anhand physikalischer Experimente soll in gleichzeitig mittels der Sensorintegration, mathematischen Modellierung und numerischen Simulation eines ausgewählten physisch verfügbaren aerosolbasierten Druckverfahrens erfolgen (Abbildung 2).

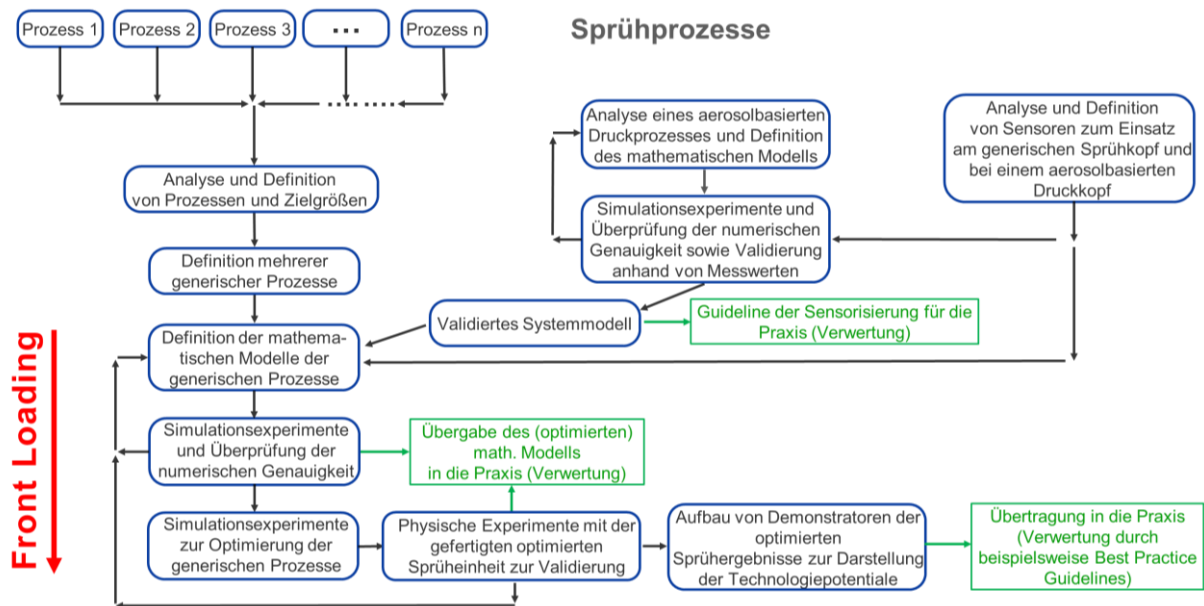


Abbildung 2 Schematischer Ablauf des Projektes Erbsae.

Zielsetzung:

Ziel des Projektes ist es am Beispiel ausgewählter generischer Prozesse die Systemzuverlässigkeit von Sprühverfahren allgemein zu erhöhen, indem zum einen durch die Integration von Sensoren eine umfassende Prozesskontrolle ermöglicht wird. Zum anderen soll mittels mathematischer Modellbildung und numerischer Strömungssimulationen das Verhalten des Aerosols im Inneren der Düse und im Freistrahls nach Austritt aus der Düse verbessert werden. Durch den Ansatz der Front-Loading-Entwicklung soll mittels Variation der Düsengeometrie in numerischen Simulationen und in physikalischen Experimenten eine stärkere Fokussierung des Strahls erreicht werden. Somit soll die Tiefenschärfe für 3D-Substrate und die Reproduzierbarkeit der über Sprühverfahren hergestellten Schichten und Strukturen am Beispiel von aerosolbasiert gedruckten Sensoren überprüft werden.

Mögliche Vorteile für Unternehmen:

- Erweiterung der Einsatzgebiete für verschiedenste Sensorarten und Messmethoden.
- Guideline für die Sensorintegration in Sprühprozesse.
- Optimierte und geprüfte mathematische Modelle in Form von Software-Programmen, die an die kommerziell verfügbare Software Ansys Fluent koppelbar sind und Best Practice Guidelines für die math. Modellbildung und numerische Simulation.
- Designregeln für Düsengeometrien inklusive der Erschließung neuer Märkte für Präzisions- und additive Fertigungstechnologien für solche Geometrien.
- Prozesshandbuch für aerosolbasiert hergestellte Sensoren mit höherer Reproduzierbarkeit und gesteigerter Anwendungspotentiale auf komplexen Oberflächen.