

1 Motivation und Zielstellung der Arbeit

Die druckbasierte Herstellung metallischer Messgitter in dieser Arbeit lässt sich verfahrensseitig zwei Themengebieten zuordnen: Erstens der additiven Fertigung (engl. Additive Manufacturing AM) und zweitens der gedruckten Elektronik (engl. Printed Electronics PE). Durch eine Steigerung der Fertigungsqualität lässt sich die Entwicklung innovativer Komponenten mit integrierter Sensorik und elektrischen Funktionalitäten voranbringen. Zur Erhaltung und Sicherung des Wohlstandes in einem exportorientierten Hochlohnland wie Deutschland kommt der Innovationsfähigkeit im produzierenden Gewerbe eine besondere Bedeutung zu [1]. Das steigende Bedürfnis nach einer erhöhten Produktvielfalt muss dabei in Einklang mit Wirtschaftlichkeit und einem geringen ökologischen Fußabdruck gestillt werden. AM-Verfahren mit denen sich Bauteile durch Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen, vorzugsweise schichtweise, automatisiert herstellen lassen [2], konnten sich in diesem Spannungsfeld erfolgreich behaupten [3]. So konnte der Markt für AM seit 2004 jährlich um durchschnittlich 20 Prozent wachsen [4] und beziffert 2020 ein Volumen von 12,6 Mrd. USD, wobei mit einem Anstieg auf über 37 Mrd. USD bis 2026 gerechnet wird [5].

Als wesentliche Entwicklungstreiber für AM von einem Tool zur schnellen Prototypenentwicklung hin zur massenhaften Produktion von Einzelteilen sind folgende zwei Charakteristika anzusehen: Die losgrößenunabhängige Herstellung und die erhöhte Wirtschaftlichkeit bei steigender Komplexität der Bauteilgeometrie [2]. Die hohe Nachfrage aus weiteren Anwendungsgebieten zur Nutzung dieser Vorteile schlägt sich auf der einen Seite in der Entwicklung von Anlagen und Materialien zur Nutzung neuer Werkstoffe nieder. Auf der anderen Seite werden hybride Ansätze zur Integration (bislang noch nicht) additiv gefertigter Funktionselemente verfolgt, um beispielsweise aktive elektrische und elektronische Komponenten und Systeme, wie Sensoren, einzubetten [6].

Die Entwicklungen im Bereich PE konnten insbesondere in den letzten Dekaden von neu verfügbaren Nanomaterialien profitieren [7, 8]. Nanopartikuläre Metalltinten lassen sich unter Verwendung digitaler Drucktechnologien (beispielsweise Inkjet) in dünnen Schichten ($< 1 \mu\text{m}$) zur Erzeugung leitfähiger Strukturen wie Leiterbahnen oder Sensoren aufbringen. Dies geschieht meist auf polymeren Substraten wie Folien [9]. Einhergehend mit hohem Potential für den Einsatz in Leichtbauanwendungen ist diese Technologie bereits bei der Fertigung von Displays und in der Photovoltaik erprobt und zeichnet sich durch seine Skalierbarkeit aus. Im Vergleich zu konventioneller Halbleitertechnologie ist bei PE von geringen Produktionskosten, kürzeren Taktzeiten und einem verminderten Einsatz umweltgefährdender Materialien bei einem Faktor 10 bis 100 geringen Investitionskosten auszugehen [7]. 2015 betrug der Markt für PE bereits 3,1 Mrd. USD mit einem zu erwartenden Anstieg auf 20,7 Mrd. USD in 2025 [10].

Mit voranschreitender Entwicklung der Fertigungsverfahren und neuen verfügbaren Materialien und Werkstoffen wird die Abgrenzung zwischen AM und PE immer unschärfer. Die technologische Schnittmenge beider Bereiche nimmt zu, was in einer Vielzahl neuer Möglichkeiten mündet: Neue Produkte und Produktionsverfahren werden ermöglicht und Prozessketten werden flexibel, digital und resilient. Auf Basis von CAD-Modellen lassen sich Produktdesigns aus multiplen Werkstoffen konstruieren und digital herstellen. Bauteile mit integrierter Sensorik für ein Structural Health Monitoring helfen die Sicherheit in autonomen Verkehrsmitteln zu verbessern, den Ressourceneinsatz in der Luftfahrt sowie Windkraftanlagen zu verringern und damit einen Beitrag zur Nachhaltigkeit zu leisten. Doch mit dem Betreten neuer technologischer Anwendungsbereiche steigen auch die Anforderungen an die Fertigungsqualität, wie es sich am Beispiel additiv gefertigter Dehnungsmessstreifen verdeutlichen lässt.

Digitale Fertigungsverfahren wie Inkjet-Druck weisen beim Herstellen der metallischen, elektro-sensorischen Messgitter von Dehnungsmessstreifen große Fertigungstoleranzen auf, sodass die für eine präzise Messung notwendigen erzielbaren elektrischen Widerstände einer großen Schwankungsbreite unterliegen. Die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit besteht daher in der Entwicklung eines angepassten Inkjet-Druck-Verfahrens, um die Fertigungsqualität von DMS-Messgittern zu steigern und die Schwankungsbreite eine Größenordnung zu reduzieren.

Zur Erreichung dieser Zielsetzung werden zunächst - auf Basis des derzeitigen Standes von Wissenschaft und Technik - wissenschaftliche Fragestellungen hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die Fertigungsqualität erarbeitet. Darauf aufbauend wird eine Vorgehensweise zur Bearbeitung dieser Fragestellungen abgeleitet und umgesetzt. Diese umfasst die Ausarbeitung mehrerer neuartiger Druck-Strategien. Abschließend werden diese experimentell evaluiert und die elektrischen Schichteigenschaften untersucht, um abschließend das Anwendungspotenzial des entwickelten Inkjet-Druck-Verfahrens zu beurteilen.