

1 Einleitung

"The factory of the future will have only two employees, a man and a dog. The man will be there to feed the dog. The dog will be there to keep the man from touching the equipment."
- Warren Gamaliel Bennis (1978)

Die provokante Vision des Autors erscheint nicht unrealistisch, auch wenn diese knapp vierzig Jahre später noch nicht gänzlich eingetreten ist. Der technologische Trend ist allerdings klar und zeigt in die Richtung autonomer Systeme. Dies gilt für personenbefördernde Fahrzeuge, unbemannte Flugobjekte, Roboter in der Logistik sowie für deren Abwandlungen für Haus und Garten. Gleichermaßen lassen sich Maschinen als auch ganze Produktionslinien und Fabriken so weit automatisieren, dass menschliche Eingriffe immer seltener erforderlich sind. Unter Oberbegriffen wie *Digitalisierung* und *Industrie 4.0* sind in diesem Zusammenhang unterschiedliche Technologiebereiche wie die virtuelle Realität, das industrielle Internet der Dinge sowie die künstliche Intelligenz (KI) zusammengefasst. Insbesondere bietet der Einsatz von KI im Kontext der Fabrikautomatisierung das Potenzial, die Wertschöpfung weltweit um bis zu 45% bis zum Jahr 2035 zu steigern [PUR17, S. 18]. Eine Studie von McKinsey aus dem Jahr 2022 zum Einsatz von maschinellen Lernverfahren in der industriellen Fertigung zeigt unter anderem Verbesserungspotenziale im Bereich der Gesamtanlageneffektivität und bei der Senkung der Kosten für die Qualitätssicherung im jeweils zweistelligen Prozentbereich auf [BOE22].

In der Lasermaterialbearbeitung ermöglichen KI-basierte Methoden die Umsetzung applikationsspezifischer Lösungen im Rahmen der Produktionsoptimierung. Dazu zählen kurzfristig sowohl die Verringerung von maschinenbezogenen Wartungsphasen, die Reduktion von Maschinenausfallzeiten als auch die Produktqualitätssicherung parallel zur Prozessierung eines Bauteils. Mittel- und langfristig ermöglicht der Einsatz von KI zudem die vollständige Automatisierung von Prozessketten mit dem Ziel, nicht nur die Gesamtanlageneffektivität zu steigern, sondern gleichzeitig, im Hinblick auf die aktuellen klimabezogenen Herausforderungen, einen minimalen Ressourcenverbrauch zu erzielen. In diesem Zusammenhang eignen sich die hervorragende Automatisierbarkeit und die hohe Präzision laserbasierter Verfahren in besonderem Maße zur Umsetzung ressourceneffizienter, vollautonomer Fertigungsmaschinen. In den letzten 50 Jahren hat sich der Laser als hocheffektives Werkzeug in der industriellen Fertigung etabliert [STE72], das unter anderem beim Laserschweißen von Karosseriebauteilen [TEN17], Batterieelementen und Brennstoffzellenkomponenten seine Stärken ausspielt [HAD22]. Trotz der beständigen Forschungsbemühungen führen kontinuierliche Prozessgeschwindigkeitssteigerungen in Kombination mit anspruchsvoller Materialkonfigurationen zu einer höheren Fehleranfälligkeit der Fügeprozesse. Dabei sind die im Karosseriebau hauptsächlich verwendeten verzinkten Stahlbleche, aufgrund der während der Bearbeitung entstehenden hochdynamischen Strömungssituationen, dem Risiko einer Bildung von Nahtfehlern in besonderem Maße ausgesetzt [ABT17, S. 110–117]; [TEN18, S. 25]. Dem überlagert bewirken insgesamt wachsende Anforderungen an die Flexibilität von Fertigungsprozessen zusammen mit

steigenden Qualitätsstandards, dass bisherige Prozessüberwachungssysteme an ihre Grenzen gelangen [STA18].

Dieser Handlungsbedarf stellt die Anknüpfungspunkte für die zu adressierenden Fragestellungen in dieser Arbeit dar. Trotz der positiven Entwicklungen in den vergangenen Jahren mangelt es an Messsystemen, die eine robuste Lokalisierung und Differenzierung unterschiedlicher Nahtunregelmäßigkeiten während des Fügeprozesses erlauben. Häufig eingesetzte integrale Detektoren, wie Fotodioden, liefern meist zu wenig Informationen, um daraus zuverlässige Aussagen hinsichtlich der Art eines vorliegenden Nahtfehlers ableiten zu können. Neben der Erkennung von Nahtunregelmäßigkeiten ist die Bestimmung der Einschweißtiefe anhand prozessspezifischer Emissionen eine Herausforderung. Typische Korrelationsbeziehungen zwischen den Messsignalen der Prozessüberwachung und der Einschweißtiefe verlieren im Falle sich ändernder Prozessbedingungen häufig ihre Gültigkeit. KI-basierte Systeme können diesbezüglich einen Beitrag leisten, sodass ungültige Signalzusammenhänge erkannt und bei Bedarf korrigiert werden können. Im Bereich der Kompensation von Störgrößen sind unterschiedliche Regelungstechnische Ansätze bekannt, um Abweichungen der Einschweißtiefe zu kompensieren. Diese Systeme beruhen meist auf etablierten Regelkonzepten, die zwar mit bekannten Prozesssituationen in eingeschränkten Wirkungsbereichen gut umgehen können, aber sich nicht zum Einsatz in dynamischen Fertigungsumgebungen mit komplexen Randbedingungen eignen. Dahingegen ermöglichen lernende Verfahren die Umsetzung von Strategien zur adaptiven Erkennung und Kompensation unterschiedlicher Prozessungänzen, wodurch sich insgesamt folgende Potenziale für den Endanwender ergeben:

- Reduzierung von Produktionsausschuss und Vermeidung von Fehlerfolgekosten durch die frühe Erkennung und Kompensation von Nahtunregelmäßigkeiten.
- Schnellere Behebung prozessbedingter Maschinenstillstände durch Hinweise auf die Fehlerursache, basierend auf der Klassifizierung auftretender Nahtfehler.
- Qualitätsskontrolle bzw. -dokumentation durch die detaillierte Vermessung während des Bearbeitungsprozesses in Form prozessspezifischer Signalcharakteristika.
- Eine leistungsfähige in-situ Qualitätsdiagnose ermöglicht die Verringerung von Taktzeiten, da eine nachgelagerte visuelle Inspektion entfallen kann.

Zusammenfassend ist das Ziel der Arbeit die Entwicklung und Qualifizierung eines KI-basierten Systems zur bildgebenden Prozessüberwachung und -regelung, das mit hoher Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit unterschiedliche Prozessabweichungen eindeutig identifiziert und, nach Möglichkeit, kompensiert.

Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wird am Anwendungsbeispiel des Laserstrahlschweißens von Überlappnähten untersucht, welche häufig im Automobilbau zur Anwendung kommen. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anforderungen an industriell einsetzbare KI-Systeme stellt der vorgestellte Ansatz somit einen weiteren Schritt in Richtung selbstoptimierender, hochautomatisierter Fertigungssysteme als wesentlichen Bestandteil zukünftiger Fabriken dar.