KI-gestützte Qualitätssicherung in Lackieranlagen

Einführung

Die industrielle Lackiertechnik stellt einen hochkomplexen und automatisierten Prozess dar, der in Branchen wie der Automobilindustrie essenziell zur wirtschaftlichen Produktion und Erzeugung einer reproduzierbaren Qualität ist. Trotz einer Vielzahl von Sensoren zur Prozessüberwachung werden Qualitätsprobleme häufig erst am Ende der Produktionslinie durch manuelle Sichtkontrollen oder halbautomatische Detektion erkannt. Dies führt zu steigenden Kosten durch Nacharbeit, Ausschuss und verlängerte Produktionszyklen. Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsprojekt "pAInt-Behaviour" initiiert, um mittels Künstlicher Intelligenz (KI) eine datengetriebene, kontinuierliche Qualitätssicherung zu etablieren. Ziel ist es, Fehlerquellen frühzeitig zu erkennen, die Produktionseffizienz zu steigern und neue Maßstäbe in der Qualitätssicherung zu setzen.

1. Herausforderungen in der Qualitätssicherung

Der Lackiervorgang ist geprägt von einer Vielzahl von Wechselwirkungen, die den Prozess schwer beherrschbar machen. Die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien, automatisierte Abläufe wie die Förder- und Robotertechnik sowie Umweltfaktoren wie Temperatur und Sauberkeit beeinflussen die Lackierqualität in hohem Maße. Weiterhin variieren Materialeigenschaften stark zwischen verschiedenen Lackfarben, was eine Anpassung des Prozesses erfordert. Traditionelle, regelbasierte Überwachungssysteme stoßen angesichts der großen Datenmengen und der hohen Dynamik an ihre Grenzen. Zudem fehlt es häufig an Beschreibungsmodellen, die die komplexen, nicht-linearen Zusammenhänge im Prozess abbilden können. Die Folge ist ein hoher manueller Aufwand, der die Effizienz mindert und die Kosten erhöht.

2. Lösungsansätze durch KI-gestützte Verfahren

Das Projekt "pAInt-Behaviour" setzt auf den Einsatz maschinellen Lernens, um die multikausalen Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Qualitätskennzahlen datenbasiert zu modellieren. Zunächst wurde das normale Prozessverhalten anhand von Sensordaten erlernt, um Anomalien zu identifizieren. Dabei kamen sowohl Transfer Learning als auch Unsupervised Learning zum Einsatz, um die KI mit Vorwissen aus ähnlichen Prozessen zu trainieren und gleichzeitig spezifische Daten aus der Lackierlinie zu nutzen.

Ein zentraler Bestandteil der Modellarchitektur ist der Einsatz von Autoencodern, die durch Dimensionsreduktion und Rekonstruktion der Daten Abweichungen von der Norm erkennen. Ergänzend wurde ein Graph Attention Network Autoencoder implementiert, der Wechselwirkungen zwischen Prozessvariablen und deren zeitlichem Verlauf modelliert. Diese KI-Modelle wurden unter Berücksichtigung von historischen Prozessdaten, saisonalen Effekten und Chargenunterschieden trainiert. Die Datenaufbereitung umfasste Schritte wie die Normalisierung, die Entfernung redundanter Merkmale und die

Anwendung der Sliding-Window-Methode, um zeitliche Abhängigkeiten besser erfassen zu können.

3. Implementierung und Anomalie-Detektion

Die entwickelte Lösung wurde auf Daten aus der Prozesstseuerung in der Produktionsanlage angewandt, um das System an Realdaten zu testen. Die Anomalie-Detektion basiert auf dem Rekonstruktionsfehler der Autoencoder, der als Anomalie-Score interpretiert wird. Um Fehlalarme zu minimieren, wurde ein Schwellenwert definiert, der sich an etablierten Produktionskennzahlen wie dem Process Capability Index (CPK) und der Ausschussrate orientiert. Die KI ermöglicht es, Anomalien zeitlich und prozessspezifisch zuzuordnen, wodurch kritische Ressourcen oder Engpässe identifiziert werden können.

Neben der Online-Detektion bietet das System auch eine Offline-Analyse, die historische Daten für die kontinuierliche Prozessoptimierung auswertet. Dies erlaubt es, Ursachen von Fehlern systematisch aufzudecken und langfristig die Effizienz des Produktionsprozesses zu steigern. Die gewonnenen Erkenntnisse können auch für datengetriebene Kaizen-Schleifen genutzt werden, um den Lackierprozess nachhaltig zu optimieren.

4. Ergebnisse und Potenziale

Die Implementierung der KI-gestützten Qualitätssicherung hat bereits vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Durch die frühzeitige Erkennung von Prozessabweichungen kann die Ausschussrate signifikant reduziert und die Effizienz gesteigert werden. Die Online-Detektion ermöglicht es, potenzielle Defekte bereits während der Produktion zu erkennen, sodass sofortige Maßnahmen eingeleitet werden können. Langfristig lassen sich durch die Offline-Analyse Ursachenanalysen durchführen, die zu einer verbesserten Prozesssteuerung beitragen. Die Vorteile der KI-gestützten Überwachung erstrecken sich über verschiedene Bereiche. Neben der Reduktion von Kosten durch geringere Nacharbeit und Lackverbrauch wird die manuelle Sichtprüfung durch die automatisierte Detektion ergänzt. Dies spart Zeit und Ressourcen. Zudem schafft die Lösung eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Produktionsdaten, was für Audits und Compliance-Anforderungen von großer Bedeutung ist. Die Möglichkeit, Regelungen automatisiert durchzuführen, eröffnet zusätzliche Potenziale für die Prozessautomatisierung.

5. Fazit

Das Projekt "pAInt-Behaviour" illustriert eindrucksvoll, wie KI-Technologie die Qualitätssicherung in der industriellen Lackiertechnik revolutionieren kann. Die datengetriebene Modellierung komplexer Wechselwirkungen und die kontinuierliche Prozessüberwachung bieten sowohl kurz- als auch langfristige Vorteile. Neben der Steigerung der Produktqualität und der Senkung von Kosten trägt die Lösung dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in einem hochdynamischen Marktumfeld zu sichern. Die gewonnenen Erkenntnisse und Technologien lassen sich perspektivisch auch auf andere industrielle Anwendungen übertragen, wodurch das Innovationspotenzial der KI in der Fertigung weiter ausgeschöpft werden kann.