

Assistenzsystem für Reparaturarbeitsplätze

KI-gestützte Prüfung manueller Klebeprozesse

C. Kuhn, D. Lucke, H. Wirtz

ZUSAMMENFASSUNG Manuelle Klebeprozesse nehmen vor allem bei Instandsetzung, Remanufacturing und Nacharbeit zu. Das hier vorgestellte Assistenzsystem erkennt Klebe- und Dichtnähte zuverlässig, bewertet kontinuierlich die Qualität und integriert die Ergebnisse in PPS- und MES-Systemen. Die Lösung ist für lokale Werkstätten und flexible Reparaturarbeitsplätze konzipiert und erhöht Resilienz und Nachhaltigkeit durch effizientere Reparaturen, weniger Ausschuss und längere Produktlebensdauer.

STICHWÖRTER

Künstliche Intelligenz, Fügetechnik, Nachhaltigkeit

AI-supported inspection of bonding processes

ABSTRACT Manual adhesive processes are spreading across repair, remanufacturing and rework. Therefore, an application system that reliably detects and classifies adhesive and sealing beads in real time and integrates results into PPS and MES systems is presented. The solution targets local workshops and flexible repair cells, improving resilience and sustainability through efficient repair, reduced scrap, and extended product lifetime.

1 Einleitung

Klebverbindungen sind Schlüsselemente moderner Produkte und finden sich in nahezu allen Branchen von der Automobil- und Luftfahrtindustrie über den Maschinenbau bis hin zu Konsumgütern [1]. Mit der wachsenden Variantenvielfalt, verkürzten Entwicklungszyklen und dem steigenden Bedarf an Instandsetzung, Remanufacturing und Nacharbeit verlagern sich viele Arbeitsschritte aus hochautomatisierten Linien zunehmend in flexible Werkstatt- und Reparaturumgebungen. Gerade dort nimmt der Anteil manueller Klebprozesse deutlich zu. Gleichzeitig fehlen oft die in Großserien üblichen Inline-Inspektionssysteme, sodass Sichtprüfungen unter realen Umgebungsbedingungen subjektiv, fehleranfällig und nur unzureichend dokumentierbar sind [2]. Gerade die Sauberkeit der Fügeflächen sowie stabile Umgebungsparameter (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit) erschweren konsistente Prüfentscheidungen [3]. Dies führt zu erhöhten Risiken mit Blick auf Funktionssicherheit, Nacharbeit und Gewährleistung sowie zu unnötigem Material- und Energieverbrauch.

Die Motivation ist somit an realen Anforderungen ausgerichtet: Klebe- und Dichtnähte müssen insbesondere bei Reparaturen sicher erkannt und beurteilt werden, um die Funktionssicherheit aufbereiteter Produkte zu gewährleisten. Viele dieser Klebevorgänge erfolgen manuell und erfordern eine unmittelbare, leicht interpretierbare Rückmeldung. Lokale Werkstätten benötigen Assistenzsysteme statt komplexer Sondermaschinen, um flexibel auf wechselnde Bauteile, Materialien und Losgrößen reagieren zu können [4]. Zugleich sollen Effizienz und Transparenz steigen, um Resilienz und Nachhaltigkeit in der Wertschöpfung zu verbes-

sern. Das vorgestellte System kombiniert dafür robuste Datenerfassung, flexible KI-Modelle für kriterienbezogene Auswertungen und ein auf Ampellogik basierendes Human-Machine-Interface (HMI) mit nahtlosen Integrationsmechanismen in Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (PPS) sowie Manufacturing Execution Systems (MES). Der Schwerpunkt des Beitrags liegt auf dem Assistenzsystem und dessen Einbettung in industrielle Abläufe. Architektur, Hardware-/Software-Bausteine, Bedienfluss und Datenmanagement werden beschrieben, Validierungsergebnisse und Kennzahlen zur Leistungsfähigkeit anhand eines entwickelten Prototyps vorgestellt und Integrationsmöglichkeiten der Lösung in Fabrikplanung, Produktionsplanung und Supply-Chain-Prozesse werden aufgezeigt.

Die Fähigkeit, qualitativ hochwertige Kleb Reparaturen dezentral und ohne Großanlage durchzuführen, erhöht die operative Handlungsfähigkeit bei Störungen, verlängert die Produktlebensdauer und senkt damit den Ressourcenverbrauch [5]. Damit leistet das System, das im Rahmen eines ZIM-Forschungsprojekts der axiss Achsen- und Dosiertechnik GmbH, der Anticipate GmbH und der Hochschule Reutlingen entstanden ist, einen konkreten Beitrag zu resilienter, nachhaltiger Wertschöpfung in Werkstatt- und Fabrikumgebungen.

2 Stand der Technik

Klebverbindungen sind in der industriellen Praxis weit verbreitet: Aktuelle Übersichtsarbeiten zeigen ihre wachsende Bedeutung über Branchen hinweg sowie die damit verbundenen Anforderungen an Auslegung, Fertigung und Qualitätssicherung [6]. In manuellen Werkstatt- und Reparaturumgebungen fehlen

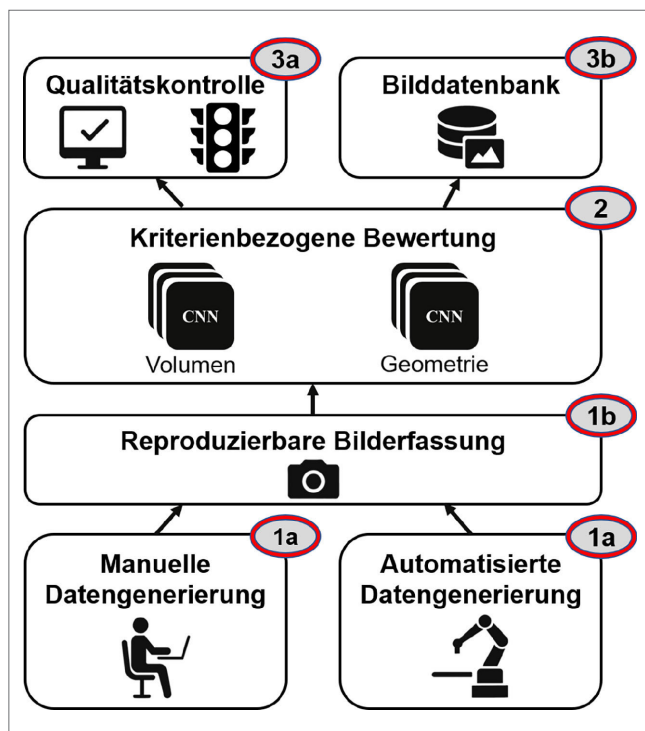


Bild 1 Architektur des Assistenzsystems. Grafik: Hochschule Reutlingen

jedoch häufig die in Linien üblichen Inline-Inspektionssysteme. Die visuelle Sichtprüfung bleibt dadurch anfällig für Subjektivität, Ermüdung und Umfeldbedingungen. Dies wird seit den klassischen Human-Factors-Studien und neueren Übersichten immer wieder bestätigt [7, 8]. Für Klebprozesse existieren frühe maschinelle Ansätze zur Nahtprüfung, etwa strukturierte Beleuchtung und softwarebasierte Geometrieauswertung direkt im Prozess [9].

In den letzten Jahren hat sich der Fokus hin zu KI-gestützter Bildverarbeitung verschoben. Systeme verbinden 2D-/3D-Sensorik mit Machine-Learning-Verfahren, um Dosierprozesse lokal und aus der Ferne zu überwachen, Geometrie-/Volumenabweichungen zu erfassen und Prozessfreigaben zu beschleunigen. Dies ist auch bei großen Bauteilen deren Maße über die Arbeitsfläche eines herkömmlichen Arbeitsplatzes hinausgehen relevant [10]. Für manuelle Klebprozesse ist dabei zentral, dass Sensorik und Auswertung kompakt, schnell konfigurierbar und edgefähig sind. Dies ermöglicht ohne aufwendige Integration reproduzierbare Entscheidungen am Arbeitsplatz. Außerdem verlangen Normen, wie DIN EN ISO 21368, geregelte Umgebungsbedingungen, dokumentierte Vorbehandlungen sowie organisatorische und prozessuale Qualitätssicherung entlang der gesamten Klebprozesskette auch explizit bei handgeführten Anwendungen [11].

Ein wiederkehrendes Problem in industriellen Anwendungen ist die Datenknappheit beziehungsweise unzureichende Varianz für robuste KI-Modelle. Hier hat sich synthetische Datengenerierung mit Domain Randomization etabliert: Beleuchtung, Texturen und Hintergründe werden gezielt variiert, um die Generalisierbarkeit zu erhöhen. Reale Datensätze dienen zum Finetuning und zur Validierung [12, 13]. Stand der Technik für die Echtzeitfähigkeit sind One-Stage-Detektoren (You Only Look Once (YOLO)-Familie). Diese kombinieren hohe Detektionsleistung mit geringen Latenzen und eignen sich daher für Szenarien mit kurzen Taktzeiten [14]. In der Praxis wird dies mit industriellen Rahmenbedingungen wie stabiler Optik/Beleuchtung, verlässlicher

Metadatenführung, revisionssicherer Protokollierung sowie, wo erforderlich, 3D-Sensorik für Volumenmerkmale verknüpft [10].

Vor diesem Hintergrund adressiert der hier entwickelte Prototyp eine Lücke zwischen aufwendigen Inline-Lösungen und rein manueller Sichtprüfung.

3 Assistenzsystem – Implementierung

Das Assistenzsystem zielt auf eine übertragbare Lösung zur Qualitätssicherung in manuellen Klebprozessen, die bestehende Werkstatt- und Reparaturarbeitsplätze mit minimalem Aufwand aufrüstbar macht. Im Kern besteht das Konzept aus drei Ebenen (Bild 1), welche prototypisch umgesetzt wurden.

Zunächst wird auf einer nachrüstbaren, edgefähigen Einheit für manuelle und automatisierte Reparaturarbeitsplätze (1a) die reproduzierbare, bildbasierte Datenerfassung durchgeführt (1b). Dan erfolgt eine kriterienbezogene, KI-gestützte Bewertung (2) und abschließend wird eine einheitliche, intuitive Rückmeldung zur Qualitätskontrolle an das Bedienpersonal über eine Ampellogik (3a) gegeben. Alle Rückmeldungen und Parameter werden revisionssicher dokumentiert (3b) und können optional in PPS- oder MES-Systeme integriert werden. Das Gesamtkonzept verfolgt somit die Idee einer skalierbaren, werkstatttauglichen Prüfung, die Transparenz und Rückverfolgbarkeit ohne komplexen Integrationsaufwand schafft.

Durch modulare Architektur, Standardkomponenten und offene Schnittstellen kann das System sowohl lokal als auch netzwerkbasierend betrieben werden. Die KI-Modelle sind so ausgelegt, dass sie sich mit überschaubarem Aufwand an neue Materialien, Geometrien und Beleuchtungssituationen anpassen lassen. Die Anforderungen einen funktionsfähigen Prototyp zu erstellen waren somit:

- Geeignete Optik und Hardware zu finden,
- einen standardisierten Datensatz für Klebprozesse zu erzeugen,
- Kommunikationsprotokolle und Infrastruktur zur sicheren Datenübertragung auszuwählen,
- eine KI-Architektur mit getrennten Detektoren für Volumen- und Geometrieabweichungen zu definieren,
- ein schlankes, webbasiertes HMI mit Bild-Overlays, Konfigurationen und geführten Handlungshinweisen zu entwickeln,
- Robustheit und Bedienbarkeit sicherzustellen.

Auf Basis der Anforderungen, welche aus dem Konzept abgeleitet wurden, werden im Folgenden die drei prototypisch umgesetzten Ebenen erläutert.

3.1 Ebene 1: Datengenerierung und Bilderfassung

Zunächst wurde für die Datengenerierung definiert, welche Optik und Hardware verwendet wird. Die Bildaufnahme erfolgt mit einer kompakten Industriekamera und programmierbaren LED-Bändern (Bild 2).

Winkel, Intensität und Farbtemperatur werden pro Anwendungsfall definiert, um Reflexionen kontrolliert zu halten und sowohl Volumen- als auch Geometrieabweichungen sichtbar zu machen. Der Aufbau ist mechanisch skaliert (verstellbarer Halter, definierter Arbeitsabstand), sodass bei Bauteilwechseln Einstellungen reproduzierbar sind. Ein Industrie-PC mit Graphics Processing Unit (GPU) führt die Anwendung mit KI-Modellen lokal aus, um Netzwerklatenzen auszuschließen und stabile Bildraten

sicherzustellen. Eine Kameramontage direkt an der Klebepistole wurde untersucht. Erste Ergebnisse haben gezeigt, dass die Bilder nur marginal von denen einer stationären Kamera abweichen, weshalb zunächst stationär mit definiertem Sichtfenster gearbeitet wurde. Zur Kontextbildung erfasst der Prototyp zusätzlich Umgebungsparameter (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit) über einfache Sensorik. Grenzbereiche werden im HMI angezeigt und in den Metadaten mitgeführt.

Anschließend ist für die modellbasierte Bewertung eine valide Datenbasis erforderlich. Der Prototyp nutzt daher reale Aufnahmen von Klebe- und Dichtnähten mit und ohne Defekte sowie synthetisch generierte Bilder zur gezielten Varianzerhöhung. Die reale Datenerzeugung umfasst manuell und automatisiert durch einen Cobot aufgetragene Klebe- und Dichtnähte (**Bild 3**).

Bei der Klebepistole können Parameter wie Volumenfluss, Vorschub, Düse, Unterbrechungen oder Versatz werden variiert. So können menschliche Imperfektionen wie Zittern, spontane Volumenänderungen oder allgemeine Unsauberkeiten abgebildet werden. Bei der synthetischen Datengenerierung werden Szenen mit Domain Randomization (Texturen, Licht, Hintergrund) erzeugt, damit Modelle robust gegenüber wechselnden Werkstattbedingungen werden. Annotationen erfolgen nach klaren Richtlinien und bei Diskrepanzen wird eine Zweitmeinung eingeholt. Für jedes Bild werden Metadaten (etwa Licht-Setting, Material, Prozessparameter, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit) mitgeführt, um spätere Auswertungen und Retrainings zu stützen.

Abschließend wurden am Prototyp WLAN und 5G-Standalone für die Daten-/Bildübertragung verglichen. Messungen wurden anhand eines Versuchsaufbaus durchgeführt, der verschiedene

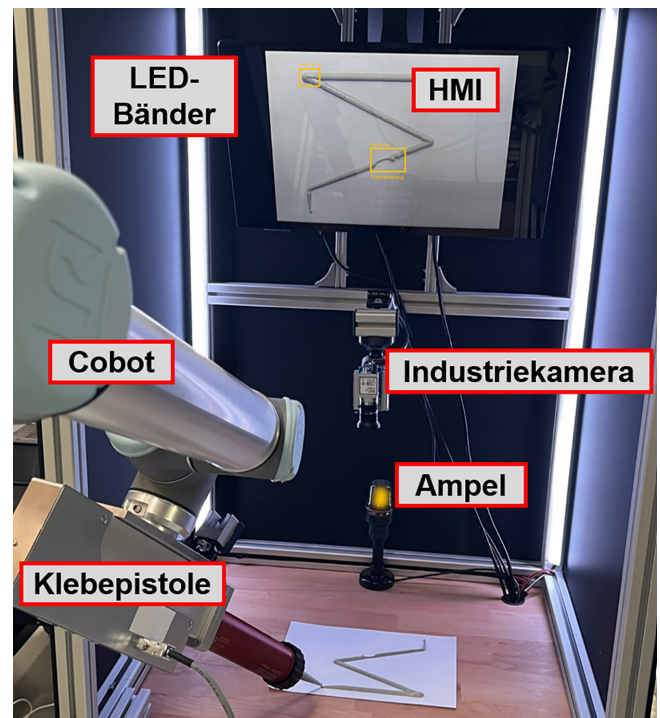


Bild 2 Aufbau des Prototyps. Foto: Hochschule Reutlingen

5G-Endgeräte mit WLAN-Endgeräten und einer Ethernet-Verbindung vergleicht. WLAN zeigte im Versuchsaufbau niedrigere durchschnittliche Latenzen, 5G hingegen eine geringere Latenz-

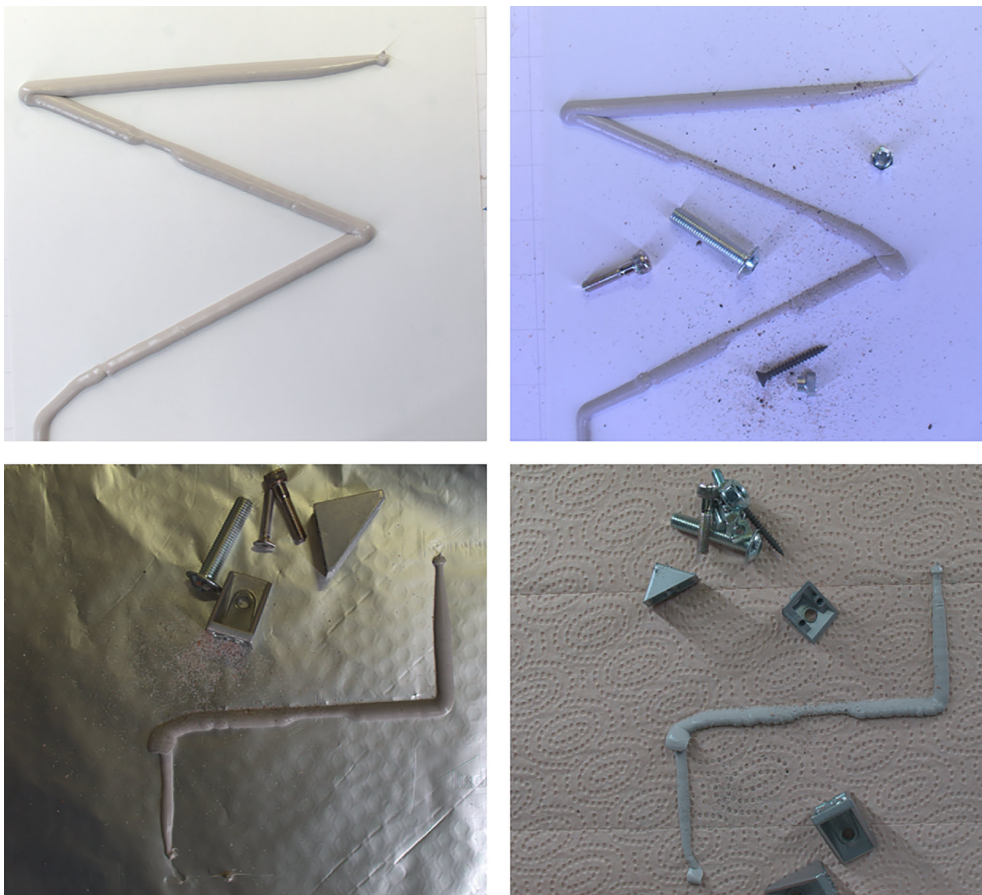


Bild 3 Reale Aufnahmen von Klebe- und Dichtnähten. Foto: Hochschule Reutlingen

schwankung. Für die aktuelle Projektphase wird primär Ethernet/WLAN eingesetzt, eine 5G-Option bleibt vorgesehen.

3.2 Ebene 2: Kriterienbezogene, KI-basierte Bewertung

Anhand der Datenbasis wurden zunächst Zeitreihenansätze (etwa Long-Short-Term-Memory-Architektur) zur Auswertung der Daten verwendet. Diese wurden jedoch frühzeitig zugunsten einer robusten Bildprüfung verworfen. Die prototypische Implementierung setzt auf kriteriengetrennte, spezialisierte Modelle (YOLO-Familie). Es wird ein Modell für Volumenabweichungen (Unter-/Überdosierung, Unterbrechung) und ein Modell für Geometrieabweichungen (Versatz, Schräglage, Breitenvarianz) verwendet. Die Auswertung verfolgt das Ziel, Abweichungen in Auftrag, Verlauf und Form einer Klebnaht zuverlässig zu identifizieren und daraus eine automatisierte Gut-/Schlecht-Entscheidung für die Reparaturqualität abzuleiten. Dazu werden die Bilddaten zunächst geometrisch normalisiert und hinsichtlich Belichtung plausibilisiert, bevor die spezialisierten YOLO-Modelle die Nahtsegmente analysieren und Abweichungen als Klassenlabels mit zugehörigen Konfidenzwerten ausgeben. Über anschließende Non-Maximum-Suppression- (NMS)-Schritte werden Mehrfachdetektionen reduziert, sodass eine robuste und eindeutig interpretierbare Bewertung der Klebnaht entsteht.

Die Trennung in zwei Modelle erhöht die Generalisierbarkeit und vereinfacht Adaptionen im Betrieb, da Grenzwerte und Trainingsdaten eines Modells angepasst werden können, ohne andere Modelle zu beeinflussen.

3.3 Ebene 3: Qualitätskontrolle und Dokumentation

Nach dem Erstellen einer Klebe- und Dichtnaht durch das Bedienpersonal sowie der KI-basierten Bewertung erfolgt die Qualitätskontrolle und Dokumentation. Das analysierte Bild mit farbigen Overlays wird auf dem HMI angezeigt und die Ampellogik kennzeichnet die Bewertung mit einem eindeutigen Freigabesignal. Für typische Befunde sind kurze Handlungshinweise hinterlegt (wie etwa Nachdosierung in markierten Segmenten, Neuauftrag nach Entfernen). Konfidenzwerte werden angezeigt, um Grenzlagen einzuschätzen. Das HMI ist webbasiert und mehrsprachig angelegt. Bedienfehler (unscharf, überstrahlt, abgeschnitten) können abgefangen werden und führen zu einer Wiederaufnahmeaufforderung. Entscheidungen werden mit Zeitstempel, Teile-/Auftragsreferenzen und optionalem Kommentar revisionssicher protokolliert. Bei Grenzwerten für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit oder unbestätigter Oberflächenreinigung fordert das HMI eine Check-&-Clean-Bestätigung beziehungsweise eine erneute Aufnahme vor der Freigabe an.

Für die Prozesssicherheit und konsistente Dokumentation der Ergebnisse verhindern Rollen/Rechte unbefugte Kalibrierungen oder Modellwechsel. Kalibrier- und Prüfprozeduren (Weißabgleich, Schärfereferenz, Licht-Check) sind geführt und werden dokumentiert. Für reproduzierbare Ergebnisse können Reinigungsschritte und Umgebungsschecks in die Start-Routine integriert werden.

Das Assistenzsystem zielt somit nicht auf eine vollautomatisierte Inline-Prüfanlage, sondern auf eine nachrüstbare, werkstatttaugliche Einheit für die manuelle Reparatur. Es ist derzeit mit den oben aufgeführten Funktionen als einsatzfähiger Prototyp in einem Laborkontext realisiert.

4 Validierung und Kennzahlen

Durch die Validierung wird das Ziel verfolgt, die Tauglichkeit des Prototyps für den Einsatz in Reparaturanwendungen zu belegen. Im Mittelpunkt stehen Reproduzierbarkeit, Erkennungsleistung unter praxisnah variierten Bedingungen und die Performance des Systems vom Kamera-Frame bis zur Entscheidung im HMI. Die Trennung der KI-Modelle in Volumenabweichung und Geometrieabweichung erlaubt es, Architektur- und Trainingsparameter auf die jeweilige Merkmalsgruppe abzustimmen und Schwellenwerte gezielt anzupassen, ohne andere Kriterien zu beeinflussen. Für die Bewertung des finalen KI-Modells wurden Präzision, Recall und F1-Score ermittelt.

Die Ergebnisse zeigten hohe Erkennungsraten: Das Volumen-Modell (**Bild 4**) erreichte eine Präzision von rund 96,4 % und einen Recall von etwa 94,8 % (F1-Score: 95,6 %), das Geometriemodell (**Bild 5**) eine Präzision von circa 95,2 % und einen Recall von etwa 93,9 % (F1-Score: 94,5 %). Die End-to-End-Latenz bei der Datenübertragung lag im niedrigen Millisekundenbereich.

Im Versuchsaufbau wurden Mittelwerte von etwa 16,3 ms über WLAN und 36,0 ms über 5G gemessen, wobei 5G durch geringere Latenzschwankungen auffiel. Die Bildrate blieb bei Videoaufnahmen stabil oberhalb von 25 FPS und ermöglichte damit eine unmittelbare, flüssige Rückmeldung im HMI. Die Ampellogik wurde von Testpersonen als intuitiv bewertet und Overlays mit Bounding-Boxes reduzierten die Entscheidungszeit und halfen, Grenzlagen transparent zu kommunizieren. Die kriteriengetrennte Architektur ermöglicht kurze Retrainingzyklen: Wechsel von Klebstoff, Düse oder Substrat erfordern nicht zwingend ein vollständiges Neuaufsetzen, sondern lassen sich durch gezielte Datenanreicherung und Schwellenanpassung pro Kriterium adressieren. Grenzen ergaben sich erwartungsgemäß bei extrem spiegelnden Oberflächen oder sehr tiefen Schatten. Hier ist eine Anpassung der Beleuchtung vorgesehen.

Die Validierung belegt damit, dass der Prototyp unter praxisnahen Randbedingungen reproduzierbar arbeitet, verlässliche Go/No-Go-Entscheidungen in Echtzeit unterstützt und eine verständliche HMI-Rückmeldung liefert. Die Ergebnisse bilden die Basis für den Transfer in reale Reparaturarbeitsplätze.

5 Integration eines realen Reparaturarbeitsplatzes

Der reale Reparaturarbeitsplatz resultierend aus dem Konzept des Assistenzsystems sowie den Ergebnissen der Validierung ist ein funktionsfähiges Gesamtsystem. Dieses kann im industriellen Kontext in Fertigungslinien integriert und als eigenständiger Arbeitsplatz eingesetzt werden. Von der Datenaufnahme bis hin zur Integration von PPS- und MES-Systemen sind alle Komponenten beschrieben.

Nach jeder Bewertung einer Klebe- und Dichtnaht erzeugt das System ein Ereignis mit eindeutiger Kennung, Zeitstempel, erkannter Klasse und Konfidenz. Die Ereignisdaten enthalten zudem Kontextfelder für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit, was die Korrelation von Daten mit Umgebungsvariablen ermöglicht. Ein Ereignis wird zusammen mit dem analysierten Bild und den relevanten Metadaten in einem webbasierten Rückmeldesystem abgelegt. So entsteht eine nachvollziehbare, revisionssichere Entscheidungshistorie, welche sowohl zur opera-

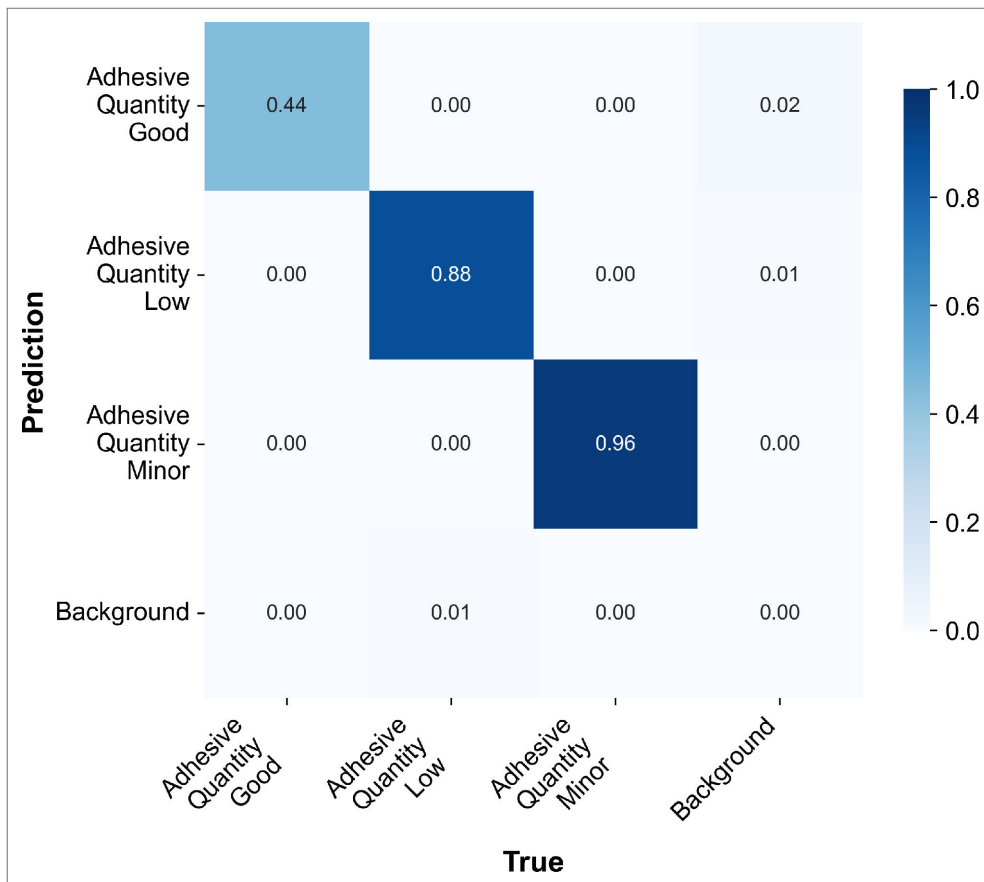


Bild 4 Performance des Volumenmodell-Algorithmus (Confusion Matrix).
Grafik: Hochschule Reutlingen

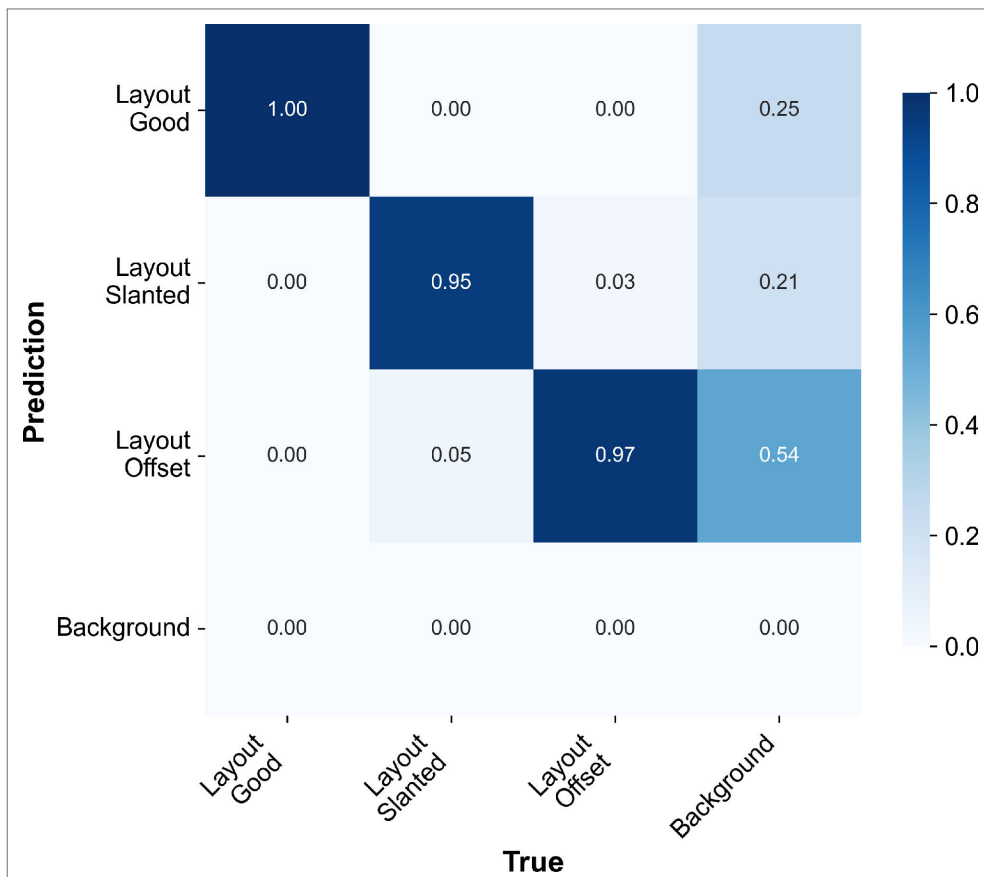


Bild 5 Performance des Geometriemodell-Algorithmus (Confusion Matrix).
Grafik: Hochschule Reutlingen

tiven Freigabe als auch für spätere Auswertungen genutzt werden kann. Für die Kopplung an bestehende Umgebungen kann ein Konverter genutzt werden, der die Ereignisse in ein standardisiertes Format überführt.

Mit Blick auf die Unternehmensintegration ist eine Anbindung auf zwei Wegen vorgesehen. Zustandsbehaftete Daten und Stammdaten werden über eine REST-API und ereignisgetriebene Rückmeldungen über MQTT abgefragt. Idempotente Ereigniskennungen verhindern Doppelbuchungen, etwa nach temporären Offline-Phasen. Ein lokaler Puffer stellt sicher, dass Bilder, Metadaten und Entscheidungen auch bei instabiler Verbindung vollständig erhalten bleiben und später verlustfrei synchronisiert werden können. Konflikte werden über einfache Regeln aufgelöst (zum Beispiel Umplanung eines Auftrags). Im Zweifel verlangt das System eine erneute Sichtprüfung.

Das Datenmanagement folgt dem Prinzip „so viel wie nötig, so wenig wie möglich“. Im Vordergrund stehen die Qualitätsereignisse, die für Planung und Steuerung maßgeblich sind. Ergänzend werden Metadaten zu Prozess und Optik geführt, um Ursachenanalysen, Trendbewertungen und spätere Retraining zu unterstützen. Bilddaten werden selektiv archiviert: obligatorisch bei Nicht in Ordnung (NIO)-Fällen, stichprobenhaft bei Grün/Gelb sowie bei geänderten Licht- oder Materialeinstellungen. Daten sind verschlüsselt, Zugriffe werden protokolliert. Rollen und Rechte steuern, wer Profile, Schwellen und Modelle anpassen darf. Für sensible Einsatzorte ist eine Pseudonymisierung auf Exportebene vorgesehen.

Das Monitoring ist bereits im Prototyp integriert. Erfasst werden Latenzen vom Kamera-Frame bis zur Entscheidung, Bildraten unter Last, Fehlerraten der Detektoren sowie Systemgrößen wie GPU-Last, Speicher und Netzqualität. Die Kennzahlen sind lokal einsehbar und können zentral visualisiert werden. Grenzwertverletzungen erzeugen Hinweise im HMI.

Für den Betrieb der Modelle wird ein Governance-Konzept vorbereitet. Modelle, Schwellen und Kalibrierungen werden in einer Registry versioniert. Neue Releases durchlaufen Tests gegen Baselines und werden stufenweise freigegeben. Canaries auf ausgewählten Arbeitsplätzen reduzieren Einführungsrisiken und Rollback-Mechanismen sichern die Rückkehr auf stabile Stände. Annotation im Betrieb erfolgt kuratiert: Das HMI erlaubt die Markierung typischer Grenzfälle, welche in Trainingsdatensätze überführt werden.

Die Stammdatenkopplung bleibt bewusst minimal. Erforderlich sind vor allem Referenzen auf Arbeitsplatz, Auftragsnetz und Teile-/Seriennummern. Single-Sign-On ist vorbereitet, um Bedien- und Administratoren-Zugänge in bestehenden Identitätsdiensten zu führen. In Summe entsteht eine flexibel integrierbare Anwendung, die belastbare Entscheidungen liefert und zugleich die Brücke in Richtung Planung, Disposition und Reporting schlägt.

6 Nachhaltigkeit und Prozessrobustheit

Der Prototyp zeigt bereits im Versuchsumfeld, dass manuelle Klebprozesse durch eine reproduzierbare, bildbasierte Bewertung messbar transparenter und beherrschbarer werden. Der vorgestellte reale Reparaturarbeitsplatz hat dadurch potenzielle ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber herkömmlichen

Reparaturarbeitsplätzen. Die frühzeitige Erkennung vermeidbarer Abweichungen reduziert den Ausschuss und energieintensive Nacharbeit. Dokumentierte Klebqualität verlängert die Produktlebensdauer und senkt damit den Ressourceneinsatz über den Lebenszyklus.

Auf der Kostenseite wirken sich kürzere Freigabezyklen und weniger Wiederholungen direkt auf Durchlaufzeiten und Bestände aus. Standardkomponenten und ein modulares Design halten die Einstiegshürde niedrig, was vor allem kleineren Betrieben den Zugang erleichtert. Einheitliche Datenmodelle und versionierte Modelle schaffen Vergleichbarkeit über Standorte hinweg, wodurch Qualitätsmaßstäbe konsistent angewendet und Erfahrungswissen zum Skalieren verwendet werden kann. In Richtung Circular Economy bildet die revisionssichere Dokumentation die Voraussetzung für rechtssichere Wiederverwendung, Remanufacturing und Second-Life-Nutzung insbesondere dort, wo Klebprozesse sicherheits- oder funktionskritisch sind.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Assistenzsystem adressiert eine Lücke der industriellen Praxis: Im manuellen Reparaturkontext fehlen häufig verlässliche, dokumentierbare Qualitätsentscheidungen für Kleb- und Dichtnähte. Diese Lücke schließen der reale Reparaturarbeitsplatz sowie bereits der Prototyp durch eine nachrüstbare Einheit aus reproduzierbarer Bilderfassung, kriteriengetrennter KI-Auswertung und einer klaren Ampellogik. Im Zentrum stehen eine standardisierte Datensatz-Erzeugung (reale und synthetisch domänenrandomisierte Aufnahmen), eine modulare Architektur mit getrennten Detektoren für Volumen- und Geometrieabweichungen (YOLO-Familie) sowie ein webbasiertes HMI, die Befunde mit Overlays und Konfidenzen transparent macht. Damit entsteht eine belastbare Grundlage für nachvollziehbare Entscheidungen direkt am Bauteil auch ohne vollautomatisierte Anlagen.

Die Validierung am Prototyp belegt die Tauglichkeit für den Echtzeiteinsatz. Sowohl hohe Erkennungsraten, stabile Bildraten oberhalb von 25 FPS als auch End-to-End-Latenzen im niedrigen Millisekundenbereich führen dazu, dass Rückmeldungen unmittelbar genutzt werden können. Die kriteriengetrennte Architektur verkürzt Retrainingzyklen bei Material-, Düsen- oder Substratwechseln und erleichtert die Pflege im Betrieb. Grenzen bestehen bei extremen Reflexionen und tiefen Schatten. Insgesamt zeigt sich, dass die Kombination aus reproduzierbarer Optik, leichter KI und transparentem HMI die Qualitätssicherung in den manuellen Bereich überführt und zugleich revisionssicher dokumentiert.

Die weitere Forschung fokussiert sich auf den Transfer in die Fertigung: Feldtests an ausgewählten Reparaturarbeitsplätzen mit REST-API und MQTT-Anbindung zu PPS- und MES-Systemen, Ausbau der betrieblichen Annotation mit kuratierten Reviews, domänenspezifische Adaptionen für weitere Klebstoffe sowie ein rollenbasiertes Dashboard mit Kennzahlen für Arbeitsplatz, Planung und Management. Auf dieser Basis kann der Prototyp schrittweise von der laborvalidierten Lösung hin zum vorgestellten realen Reparaturarbeitsplatz in Werkstatt- und Reparaturumgebungen mit messbarem Beitrag zu nachhaltiger Wertschöpfung weiterentwickelt werden.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Kooperationsprojekts „Entwicklung von Algorithmen zur Kompensation unterschiedlicher Rahmenbedingungen bildbasierter Qualitätskontrolle mit KI (Fluidworks)“, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) im Programm „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ gefördert (Förderkennzeichen KK5499502SW3) und vom Projektträger AiF Projekt GmbH betreut wurde.

LITERATUR

- [1] Dachev, D.; Kazilas, M.; Alfano, G. et al.: Towards Reliable Adhesive Bonding: A Comprehensive Review of Mechanisms, Defects, and Design Considerations. *Materials* (Basel, Switzerland) 18 (2025) 12, #2724, doi.org/10.3390/ma18122724
- [2] Sundaram, S.; Zeid, A.: Artificial Intelligence-Based Smart Quality Inspection for Manufacturing. *Micromachines* 14 (2023) 3, #570, https://doi.org/10.3390/mi14030570
- [3] Paranjpe, N.; Uddin, M. N.; Rahman, A. S. et al.: Effects of Surface Treatment on Adhesive Performance of Composite-to-Composite and Composite-to-Metal Joints. *Processes* 12 (2024) 12, #2623
- [4] Noeske, M.; Leite Cavalcanti, W.; Brüning, H. et al.: Introduction to Recent Advances in Quality Assessment for Adhesive Bonding Technology. In: Leite Cavalcanti, W.; Brune, K.; Noeske, M. et al. (Hrsg.): *Adhesive Bonding of Aircraft Composite Structures*. Cham: Springer International Publishing 2021, pp. 1–50
- [5] Sandez, S.; Ibáñez-Forés, V.; Juan, P. et al.: The effect of repair and life-time extension on the environmental performance of energy-using products. Application to electric water kettles. *Sustainable Production and Consumption* 51 (2024), pp. 445–456
- [6] Wei, Y.; Jin, X.; Luo, Q. et al.: Adhesively bonded joints – A review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges. *Composites Part B: Engineering* 276 (2024), #111225
- [7] Drury, C. G.: Inspection of sheet materials-model and data. *Human factors* 17 (1975) 3, pp. 257–265
- [8] See, J. E.: Visual inspection : a review of the literature. Sandia National Laboratories, SAND2012–8590, https://doi.org/10.2172/1055636
- [9] Davidor, Y.; Davies, B. L.: A vision system for the on-line quality control of adhesive beads. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 8 (1988) 1, pp. 33–38
- [10] Prezas, L.; Michalos, G.; Arkouli, Z. et al.: AI-enhanced vision system for dispensing process monitoring and quality control in manufacturing of large parts. *Procedia CIRP* 107 (2022), pp. 1275–1280
- [11] DIN EN ISO 21368. Klebstoffe – Leitlinien für die Herstellung geklebter Strukturen und Berichtsverfahren, die für die Risikobewertung solcher Strukturen geeignet sind (ISO 21368:2022); Deutsche Fassung EN ISO 21368:2023. Ausgabe 2024–10
- [12] Valtchev, S. Z.; Wu, J.: Domain randomization for neural network classification. *Journal of big data* 8 (2021) 1, p. 94
- [13] Tremblay, J.; Prakash, A.; Acuna, D. et al.: Training Deep Networks with Synthetic Data: Bridging the Reality Gap by Domain Randomization. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 1082–10828, doi.org/10.1109/CVPRW.2018.00143
- [14] Varghese, R.; M., S.: YOLOv8: A Novel Object Detection Algorithm with Enhanced Performance and Robustness. 2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS), Chennai, India, 2024, pp. 1–6, https://doi.org/10.1109/ADICS58448.2024.10533619

Christian Kuhn, M.Sc.
christian.kuhn@reutlingen-university.de

Prof. Dr.-Ing. Dominik Lucke
Hochschule Reutlingen
NXT Nachhaltigkeit und Technologie, Werk150
Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen
www.reutlingen-university.de

Heiko Wirtz, M.Sc.
info@anticipate.ml
Anticipate GmbH
Krantzstr. 7, Gebäude 80, 52070 Aachen
www.anticipate.ml

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)