

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-03-133
Datum der Einreichung: 08.01.2026
Datum der Annahme: 02.03.2026
Datum der Veröffentlichung: 07.04.2026

Sensorkonzept und OPC UA-Datenmodell für die Strukturmontage im Flugzeugbau

In-Process-Prüfung und digitale Rückverfolgbarkeit

K. Kirner, S. Maier, J. Möhrle, J. Schilp

ZUSAMMENFASSUNG In diesem Beitrag wird ein hybrides Sensorkonzept für die automatisierte Nietmontage vorgestellt, das Bohren, Dichten und Fügen integriert. Mittels Laser-Triangulation und Machine Vision werden Setztiefe und Dichtmittelbenetzung in-process validiert, wodurch die manuelle Prüfung substituiert wird. Die Datenausgabe über eine standardisierte OPC-UA-Schnittstelle ermöglicht ergänzend eine lückenlose digitale Rückverfolgbarkeit der Prozessqualität.

STICHWÖRTER

Montage, Fertigungstechnik, Industrieroboter

In-process inspection and digital traceability – Sensor concept and OPC UA data model for structural assembly in aircraft construction

ABSTRACT This paper presents a hybrid sensor approach for automated rivet assembly that integrates drilling, sealing, and joining. Using laser triangulation and machine vision, setting depth and sealant wetting are validated in-process, substituting manual inspection. Additionally, data output via a standardized OPC UA interface enables seamless digital traceability of process quality.

1 Motivation

Die Strukturmontage in der Luftfahrt ist durch große Bauteile, sicherheitskritische Toleranzen und hohe Anforderungen an die Rückverfolgbarkeit geprägt. Vor allem die Montage der Rumpfstrukturen trägt wesentlich zur strukturellen Integrität bei, da die Verbindung von Strukturelementen und Aluminium-Außenhaut die Belastbarkeit und Ermüdungsfestigkeit des Flugzeugrumpfs direkt beeinflusst [1]. Das Nieten ist hierbei das dominierende Fügeverfahren. Der Nietprozess setzt sich aus einer definierten Abfolge von Teilschritten zusammen: dem Bohren und Senken der Fügestelle sowie dem finalen Setzen des Verbindungselements. Traditionell werden diese Arbeitsschritte sowie die zugehörige Qualitätsbewertung von geschultem Fachpersonal ausgeführt, das Abweichungen visuell und haptisch unmittelbar erkennen und kontextbezogen bewerten kann [2]. Diese Kopplung von manueller Ausführung und subjektiver Qualitätskontrolle begrenzt aber die Rückverfolgbarkeit und führt zu einer von Erfahrung und subjektiven Einflussfaktoren abhängigen Ergebnisqualität.

Mit dem zunehmenden Einsatz roboterbasierter Systeme in der Luftfahrtfertigung verändert sich die Prozesskette grundlegend. Aktuelle Ansätze zeigen, dass der Nietvorgang in der Strukturmontage weitgehend automatisiert werden kann, um Taktzeit, Wiederholgenauigkeit und ergonomische Bedingungen zu verbessern [1, 3, 4]. Damit entfällt jedoch die subjektive Wahrnehmung und erfahrungsbasierte Klassifikation des Menschen als Qualitätsprüfung. In der Literatur wird genau dieser Wegfall als eine Hürde für den Einsatz von Automatisierung identifiziert [5, 6]. Aus diesem Wandel ergibt sich ein Bedarf an reproduzierbaren, in die Automatisierungslösungen integrierten Verfahren

zur Prüfung zentraler Qualitätsmerkmale sowie an einer strukturierten, digitalen Dokumentation der Prozessdaten.

Vor diesem Hintergrund stellen die Autoren ein Konzept zur sensorisch gestützten Prüfung der automatisierten Nietmontage sowie zur Modellierung der Prozessdaten und Dokumentation vor. Das vorgestellte Konzept wird in einem Laboraufbau erprobt. Der Fügeprozess in der Luftfahrt besteht aus einer Abfolge anspruchsvoller Einzelschritte. Diese sind in **Bild 1** dargestellt.

Wie **Bild 1 (a)** zeigt, umfasst der Bohrprozess die Positionierung des Werkzeugs. Anschließend erfolgt das Bohren zusammen mit dem Senken in einem Arbeitsgang durch ein kombiniertes Werkzeug. Dies erfolgt auf der gekrümmten Oberfläche, was die Ausrichtung anspruchsvoll gestaltet. Im nächsten Schritt, **Bild 1 (b)**, wird die Fügeverbindung hergestellt. Verwendete Verbinder sind Nieten oder, wie im betrachteten Fall, Schließringbolzensysteme des Typs „Hi-Lok“. Um die Verbindung vor Korrosion und Leckagen zu schützen wird Dichtmittel aufgetragen. Typischerweise erfolgt der Auftrag des Dichtmittels auf das Bauteil oder den Verbinder. Darauf folgen das Setzen und Verschließen des Hi-Lok, sodass die Bauteile fest gefügt sind. Mit diesem Schritt ist die Montage abgeschlossen. Abschließend erfolgt, wie in **Bild 1 (c)** dargestellt, die Qualitätsinspektion der gesetzten Verbindung sowie die Dokumentation der Qualität, **Bild 1 (d)**, um die Einhaltung der strengen Qualitätsanforderungen nachzuweisen.

Unter In-Process-Prüfung wird in dieser Arbeit die Qualitätskontrolle unmittelbar innerhalb des Montagezyklus verstanden. Anstatt Bauteile erst nach Abschluss der gesamten Fertigung zu prüfen, validiert das System kritische Merkmale direkt nach der Ausführung des Teilprozesses [5]. Dies ermöglicht eine sofortige

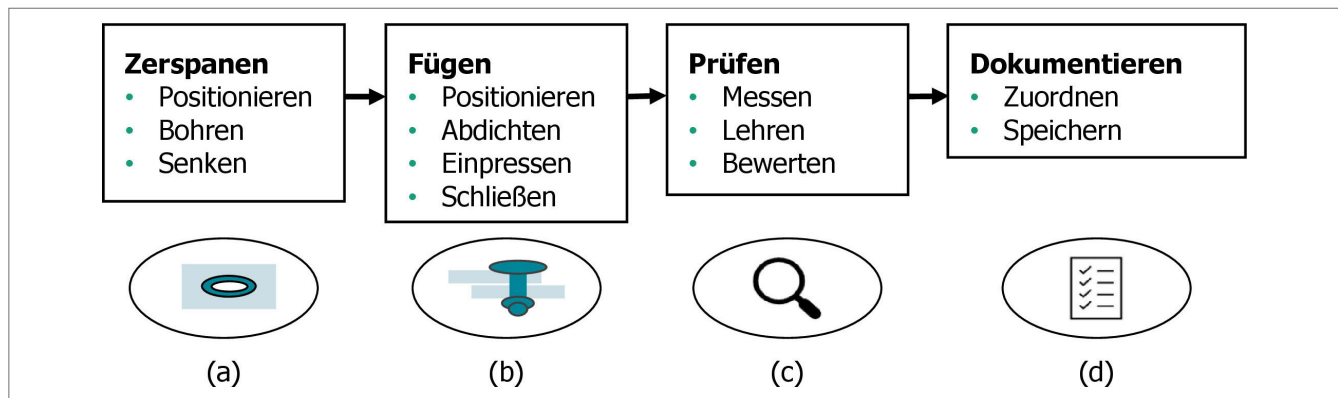


Bild 1 Phasenmodell des Fügeprozesses mit den vier aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten: (a) Zerspanen, (b) Fügen, (c) Prüfen und (d) Dokumentieren. Grafik: nach [4]

Reaktion auf Abweichungen. Davon abzugrenzen ist die In-Line-Prüfung, bei der keine Prozessunterbrechung stattfindet.

2 Anforderungen

Ziel des Forschungsvorhabens „Programmier- und Lernsystem für eine flexibilitätsgerechte Automation und Digitalisierung in der Luftfahrt“ (ProLeFanD) war es, für den komplexen manuellen Montageprozess in der Sektionsmontage eine automatisierte Lösung zu entwickeln. Die Entwicklung des Automatisierungssystems basierte auf einem strukturierten Vorgehensmodell, um die manuellen Montageprozesse in eine automatisierte Lösung zu überführen. In diesem Beitrag wird das zur In-Process Qualitätskontrolle entwickelte Sensorkonzept vorgestellt.

Zur Definition des genauen Lösungsumfanges und der kritischen Systemparameter wurde ein workshop-basierter Ansatz mit Vertretern aus Fertigung, Planung und Qualitätssicherung umgesetzt. Folgende Anforderungen wurden definiert:

- A1: Einsatz einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) des Typs “Siemens S7-1500” zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der bestehenden Infrastruktur.
- A2: Aufbau aus austauschbaren Komponenten zur Sicherstellung einer effizienten Wartbarkeit.
- A3: Einhaltung des Toleranzbereichs der Einbringtiefe (Überstand des Hi-Lok-Kopfes 0–0,2 mm) zur Sicherstellung der strukturellen und aerodynamischen Anforderungen.
- A4: Expertenbasierte Klassifikation der Dichtmittelbenetzung am konischen Teil des Verbinders (Nassmontage) zur Gewährleistung des dauerhaften Korrosionsschutzes.
- A5: Durchführung einer 100-%-Prüfung aller Fügestellen (in-process), bedingt durch die Klassifizierung als sicherheitskritisches Bauteil.
- A6: Lückenlose digitale Dokumentation der Prüfergebnisse zur Gewährleistung der Rückverfolgbarkeit und Nachweisführung auf Bauteilebene.

Das Kernziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines integrierten Prüfsystems, das die strengen Qualitätsvorgaben der Luftfahrtindustrie automatisiert überwacht. Dieses System bildet die technologische Voraussetzung, um eine Montagezelle autonom und ohne manuelle Zwischenkontrollen betreiben zu können.

3 Stand der Technik

Die Automatisierung der Flugzeugstrukturmontage ist Gegenstand intensiver Forschung und industrieller Entwicklung. Um den in der Einleitung und Anforderungsanalyse beschriebenen Bedarf einzuordnen, wird hier der Stand der Technik in den Bereichen robotergestütztes Fügen, Prozessüberwachung sowie digitale Dokumentation betrachtet.

Eine Schlüsselrolle kommt dabei den Endeffektoren zu. Ein Endeffektor ist die Komponente, die ein Robotersystem zu einer funktionsfähigen Einheit macht, indem er als Greifer, Werkzeug oder Prüfmittel fungiert [7]. Bei der Bearbeitung großvolumiger Bauteile wird der Endeffektor in einer werkzeuggeführten Automatisierung vom Roboter direkt zum Produkt geführt [8]. Im Kontext der Industrie 4.0 entwickeln sich Endeffektoren zu komplexen, sensorintegrierten Systemen, die Prozessdaten erfassen und Qualitätsprüfungen, etwa durch Vision-Systeme, direkt während des Prozesses ermöglichen [9].

3.1 Automatisierungssysteme

Eine initiale Literaturrecherche zeigt, dass die Automatisierung des Fügevorgangs in der Luftfahrt derzeit ein zentrales Forschungsfeld ist [3, 10]. Moderne Ansätze verfolgen als Ziel die ganzheitliche Abbildung von Bohren, Senken, Abdichten, Setzen und Inspektion in einem robotergestützten Ablauf [4, 11, 12]. In der aktuellen Forschung zur Automatisierung der Flugzeugstrukturmontage lassen sich zwei dominierende Trends identifizieren: Die Weiterentwicklung spezialisierter Portalsysteme für maximale Präzision und der Einsatz, kooperierender Robotersysteme für komplexe Geometrien.

Für die effiziente Bearbeitung großer Rumpfsektionen werden weiterhin dedizierte Anlagenkonzepte erforscht. *Abshagen et al.* [4] stellen mit der iMOD-Plattform ein ganzheitliches Automatisierungskonzept vor, das automatisierte Fügeprozesse in einer einzigen Station erlaubt. Technologischer Kern ist ein Portalsystem, das mit zwei parallel arbeitenden Endeffektoren ausgestattet ist. Diese hochintegrierten Endeffektoren automatisieren die gesamte Prozesskette, vom Referenzieren über das Bohren und Senken bis hin zum Dichtmittelauftrag und Setzen der Verbinder. Spezifisch für die Herausforderung des Bohrvorgangs beschreiben *Zhu et al.* [1] eine automatisierte Bohrmaschine mit einer Zwei-Ebenen-Schienenstruktur. Fokus ist der iterative Versatzmechanismus, der die Positionierung zu festen Umfangsschienen erlaubt. Der Ansatz

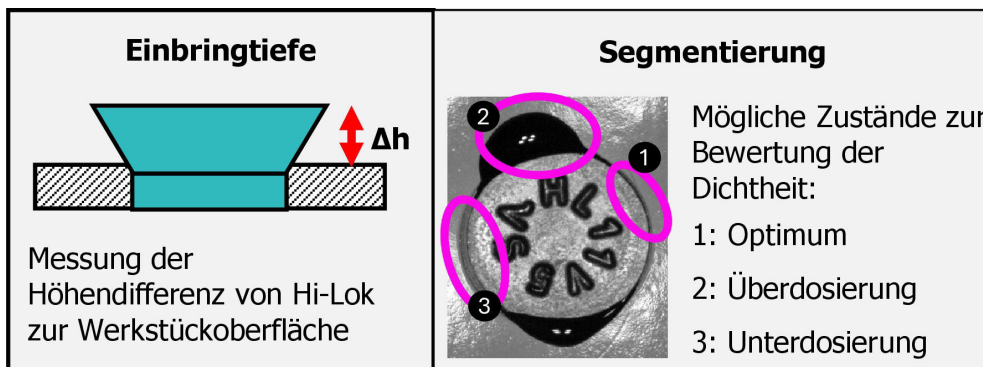


Bild 2 Identifizierte Messgrößen: Einbringtiefe (links) und Klassifizierung der Dichtmittelzustände (rechts). Grafik: Fraunhofer IGCV

ermöglicht eine vollständige Abdeckung des zylindrischen Arbeitsraums bei hoher lokaler Bohrpräzision.

Um die Flexibilität zu erhöhen und starre Vorrichtungen zu reduzieren, setzen neuere Ansätze auf die Kooperation mehrerer Roboter mit speziellen Endeffektoren. Das „Once“-System [11], wie es im Kontext von Rumpf-Tonnenstrukturen diskutiert wird, demonstriert die Integration eines externen Industrieroboters mit einer internen Einheit, um den gesamten Arbeitsbereich entlang der Flugzeuglängsachse abzudecken. Einen Schritt weiter in Richtung Autonomie geht das „Labor“-Projekt. *Lettera und Natale* [3] sowie *Caterino et al.* [12] beschreiben eine integrierte Architektur, die auf der direkten Zusammenarbeit zweier Roboter basiert. Ein Roboter agiert von der Innenseite der Rumpfschale, der andere von der Außenseite. Die verwendete Sensorik ermöglicht einen geschlossenen Regelkreis des Bohrprozesses. Das System bearbeitet das Bauteil, misst die Bohrung unmittelbar und führt dann den Fügeprozess durch.

3.2 In-Process-Qualitätsüberwachung bei der Nassmontage

Trotz dieser fortschrittlichen Systeme zeigt sich ein technologisches Defizit bei der integrierten Qualitätsprüfung der Nassmontage. *Bruni et al.* stellen zwei bildbasierte Prüfwerkzeuge für Nietverbindungen vor. Ein 3D-System ermittelt aus einer aufgenommenen Punktwolke die Kontur des Verbinders und leitet die Bündigkeit und den korrekten Verschluss des Niets ab [13]. Die Punktwolke ist hier der Ausgangszustand geliefert von dem System.

Während die geometrische Prüfung damit abgedeckt ist, fehlt es an Lösungen für die Dichtmittelbenetzung [12]. Aktuelle Systeme applizieren Dichtmittel automatisiert, doch die Prüfung beschränkt sich auf die Menge [13] oder erfolgt visuell durch den Menschen [2]. Die Anforderung, die vollständige Benetzung der Kontaktfläche der Fügestelle während des Setzprozesses zu validieren, wird von den beschriebenen Systemen nicht prozessintegriert gelöst.

3.3 Handlungsbedarf

Zusammenfassend zeigt der Stand der Technik, dass der Prozess (Bohren, Senken und Fügen) der Flugzeugstrukturmontage (siehe die definierten Anforderungen in Kapitel 2) zwar bereits durch Lösungen automatisiert ist (A1–2). Auch sind für diesen Fall bereits Prüfverfahren vorhanden (A3), jedoch besteht ein Defizit in der ganzheitlichen Qualitätsabsicherung bei der Nassmontage (A4). Es fehlen integrierte Konzepte, die

1. nicht nur geometrische Kennwerte (Bündigkeit, Lochdurchmesser), sondern auch komplexe Qualitätsmerkmale wie die Dichtmittelbenetzung im Prozess validieren (A5),
 2. sich als integrale Systemkomponente nahtlos in die Steuerungsarchitektur der Automatisierungslösung einfügen (A3–5),
 3. die Daten über standardisierte Schnittstellen bereitstellen, um die Rückverfolgbarkeit zu sichern und isolierte Dateninseln zu überwinden (A6).
- Die Diskrepanz zwischen hochautomatisierter Montage und unzureichender In-Process-Prüfung der Dichtmittelbenetzung definiert die Forschungslücke, die durch den vorliegenden Beitrag adressiert wird.

4 Konzept

4.1 Identifizierte Messgrößen

Um die Anforderungen in messbare Werte zu überführen, ist die Ableitung von Messgrößen erforderlich. Für das Sensorkonzept wurden hierzu zwei primäre Indikatoren definiert: die geometrische Einbringtiefe und das visuelle Erscheinungsbild des Dichtmittelaustritts.

Die Einbringtiefe beschreibt den vertikalen Abstand zwischen der Oberseite eines Hi-Lok und der lokalen Werkstückoberfläche (**Bild 2**, links).

Diese Messgröße wird direkt aus den Konstruktionsvorgaben abgeleitet. Ein in der Praxis üblicher Toleranzbereich für eine qualitätsgerechte Verbindung liegt bei einer Einbringtiefe von 0 mm bis 0,2 mm. Im manuellen Prozess erfolgt die Prüfung dieser Eigenschaft durch einen haptischen und visuellen Abgleich des Werkers mit einem Referenzmuster. Im automatisierten Konzept wird diese subjektive Prüfung durch eine messbare Höhendifferenz (Δh) abgedeckt.

Rückschlüsse auf die Dichtheit und die korrekte Benetzung des Verbinders liefert das ausgetretene Dichtmittel. Dieses Merkmal wurde ausgehend von Erfahrungswissen sowie Fertigungsvorschriften synthetisiert. Ein visuell erkennbarer, geschlossener Ring um den Verbinderkopf dient hier als qualitativer Indikator für einen erfolgreichen Fügeprozess. Wie in **Bild 2** rechts zeigt, lassen sich drei Zustände klassifizieren, welche die Entscheidungsgrundlage der Prüfung bilden:

- Zustand 1 (Optimum): Ein geschlossener, gleichmäßiger Ring indiziert eine korrekte Benetzung.
- Zustand 2 (Überdosierung): Ein übermäßiger Austritt von Dichtmittel führt zu einer Verschmutzung der Oberfläche. Dies erfordert im Prozessschritt die Einleitung einer manuellen Reinigung und eine Anpassung der Prozessparameter.

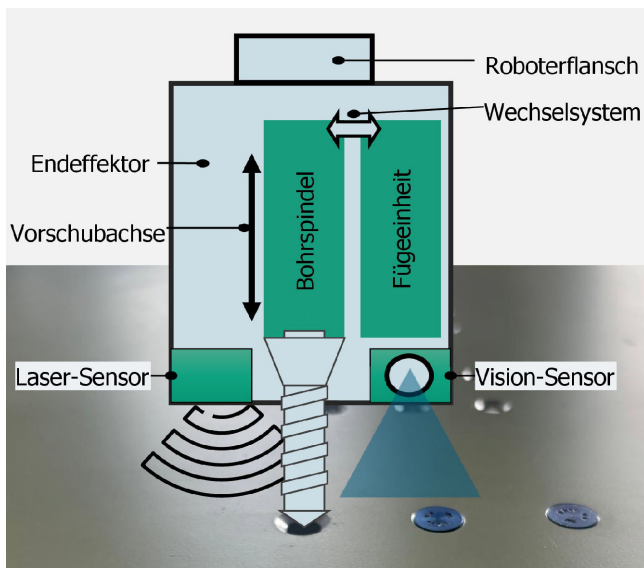


Bild 3 Schematischer Aufbau des Endeffektors mit integrierter Sensorik. Grafik: Fraunhofer IGCV

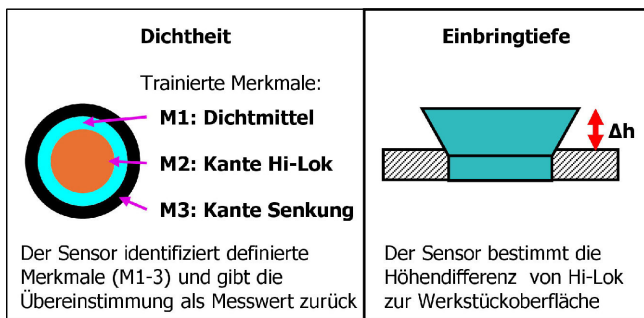


Bild 4 Schematische Darstellung der abgeleiteten Messgrößen für Dichtheit (links) und Einbringtiefe (rechts). Grafik: Fraunhofer IGCV

- Zustand 3 (Unterdosierung): Das Fehlen eines geschlossenen Rings deutet auf unzureichende Dichtheit hin. Da dies die funktionale Sicherheit gefährdet, muss der Hi-Lok entfernt und neu gesetzt werden.

4.2 Sensorik

Zur Kontextualisierung der Sensorintegration veranschaulicht **Bild 3** den schematischen Aufbau des entwickelten Endeffektors. Dieses multifunktionale Werkzeug vereint die Prozessschritte Bohren, Dichtmittelanwendung und Fügen in einer kompakten Einheit. Die Hauptkomponenten umfassen eine lineare Vorschubachse, welche die parallel angeordnete Bohrspindel und Fügeeinheit positioniert sowie die integrierte Sensorik.

Die Selektion der Sensorik erfolgte auf Basis der im Anforderungskatalog definierten Kriterien. Maßgeblich sind die Anbindung an die SPS über eine „Profinet“-Schnittstelle (A1 und A6). Die identifizierten Messgrößen (A3-A5) und kompakte Bauweise der Sensoren (A2). Aufgrund dieser Forderungen fiel die Wahl auf bildgebende Sensoren der Modellreihen IV2 [14] und IX [15] der Firma Keyence. Beide Systeme verfügen über eine industrietaugliche Kapselung gemäß Schutzart IP67, wodurch die Resistenz gegenüber den im Bohrprozess auftretenden Umgebungsbelastungen (Ölnebel, Stäube) gewährleistet ist. Die standardisierte

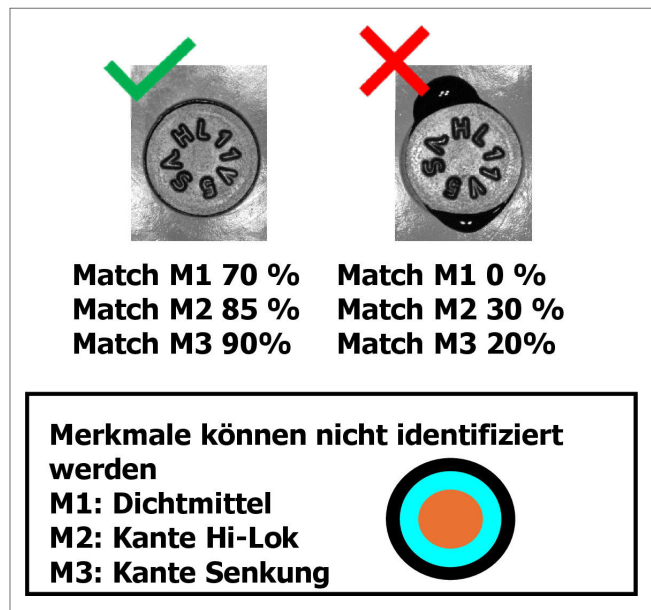


Bild 5 Exemplarische Klassifizierungsergebnisse des Vision-Sensors: Gegenüberstellung von Gut-Zustand (links) und Schlecht-Zustand (rechts). Grafik: Fraunhofer IGCV

Anschlussstechnik mittels eines einzelnen Hybridkabels unterstützt zudem eine modulare Austauschbarkeit.

Die physikalischen Messprinzipien sind in **Bild 4** dargestellt. Zur Bewertung der Dichtheit (links) nutzt das Bildverarbeitungssystem trainierte Merkmale (M1: Dichtmittel, M2: Hi-Lok Kante, M3: Senkung). Als Prüfwert wird der Übereinstimmungsgrad der Merkmale herangezogen. Zur Bestimmung der Einbringtiefe (rechts) ermittelt der Lasersensor die Höhendifferenz Δh zwischen Verbinderkopf und Außenhaut.

Zur qualitativen Prüfung des Dichtmittelaustritts wird der KI-gestützte Vision-Sensor „Keyence IV2“ eingesetzt. Dieser Smart-Sensor vereint Beleuchtung, Bildaufnahme und Auswertung in einem Gehäuse, was die Latenzzeiten bei der Datenübertragung minimiert. Das Messprinzip basiert auf einem lernbasierten Algorithmus. Hierbei wird das System mit von Experten gelabelten Referenzbildern von Gut- und Schlechteilen trainiert, um semantische Merkmale zu extrahieren. Wie **Bild 5** zeigt, ermittelt der Sensor im laufenden Betrieb den Übereinstimmungsgrad des aufgenommenen Bildes mit den trainierten Klassen.

Auf diese Weise wird Expertenwissen in das KI-Modell überführt und die manuelle Sichtprüfung durch eine automatisierte qualitative Messung ersetzt.

- Gut-Fall (links): Die Merkmale (M1–M3) werden mit hoher Konfidenz (70–90 %) erkannt.
- Schlecht-Fall (rechts): Bei fehlendem Dichtmittel oder Artefakten sinkt der Übereinstimmungsgrad signifikant. Unterschreitet dieser Wert einen definierten Schwellenwert (50 %), wird das Bauteil als fehlerhaft klassifiziert.

Zur quantitativen Bestimmung der Einbringtiefe fungiert der Laser-Höhenvergleichssensor „Keyence IX-055“. Das Messprinzip beruht auf der Laser-Triangulation, wobei der Sensor die Höhentopologie im Erfassungsbereich detektiert. Zur Kompensation von eventuellen Schräglagen des Endeffektors oder der Bauteiloberfläche erfolgt die Messung nicht punktuell, sondern als referenzierter Höhenvergleich. Wie in **Bild 6** ersichtlich, werden dazu

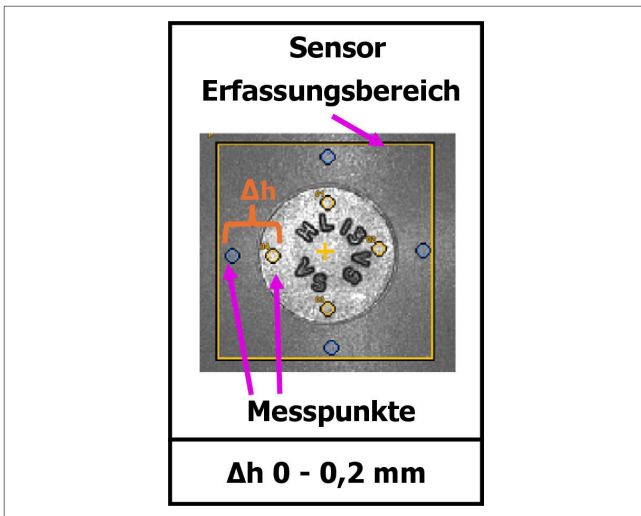


Bild 6 Bestimmung der Einbringtiefe: Anordnung der Referenz- und Messpunkte im Erfassungsbereich. Grafik: Fraunhofer IGCV

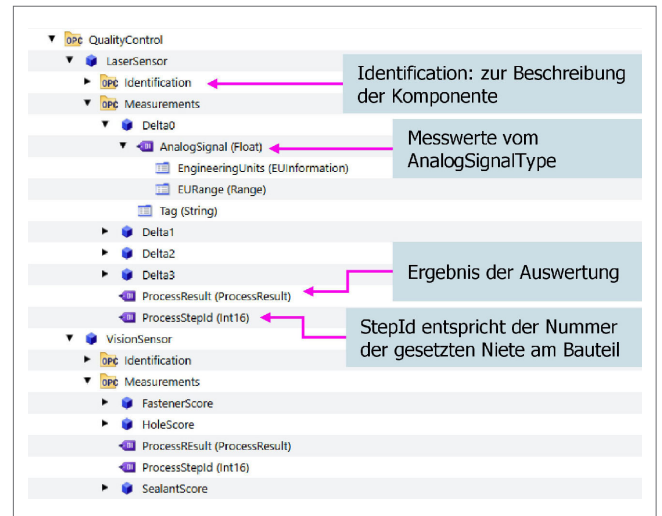


Bild 7 Hierarchische Struktur des OPC-UA-Informationsmodells erstellt mit dem „Siemens OPC UA Modeling Editor“. Grafik: Fraunhofer IGCV

Tabelle 1 Spezifikation der OPC-UA-Schnittstelle: Definition der Prozessvariablen, Datentypen und Einheiten.

Sensor	BrowseName	Datentyp	Einheit	Beschreibung
Vision	FastenerScore	AnalogSignal	%	Übereinstimmungsgrad des Hi-Lok Kopfes
	HoleScore	AnalogSignal	%	Übereinstimmung der Bohrungskante
	SealantScore	AnalogSignal	%	Übereinstimmung des Dichtrings
Laser	Delta0 - Delta3	AnalogSignal	mm	Höhendifferenz der Messpunktpaare
Allgemein	ProcessStepId	Int16	-	Index zur Referenzierung der Fügeposition
	ProcessResult	Enumeration	-	Aggregierte Bewertung

vier Messpunkte auf dem Verbinderkopf sowie Referenzpunkte auf der umgebenden Bauteiloberfläche erfasst.

Der Sensor berechnet aus diesen Werten die relative Höhendifferenz Δh (Bild 6). Liegt einer der vier ermittelten Differenzwerte außerhalb des definierten Toleranzbereichs von 0 mm bis 0,2 mm, wird ein Fehlersignal an die Steuerung ausgegeben.

4.3 Dokumentation

Zur Gewährleistung einer lückenlosen Dokumentation werden die erfassten Messwerte an übergeordnete IT-Systeme übergeben. Als Schnittstelle dient ein in die SPS integrierter OPC-UA-Server [16], der eine direkte Datenverfügbarkeit ohne zusätzliche Gateways ermöglicht. Der Datenaustausch erfolgt ereignisgesteuert via Subscriptions. Dies reduziert die Netzwerk- und Prozessorlast, da aktualisierte Werte nur bei Änderungen übertragen werden und bereits serverseitig mit einem Zeitstempel (SourceTimestamp) versehen sind.

Das Informationsmodell (Bild 7) fokussiert qualitätsrelevante Prozessdaten. Auf die Abbildung komplexer Instandhaltungslogiken oder die Übertragung reiner Sensor-Statusinformationen wird im Server verzichtet, um die Ressourcen der Echtzeit-Steue-

rung nicht zu belasten. Im Fehlerfall erfolgt der Stopp der Anlage über die deterministische Logik der SPS.

Die Identifikation der Komponenten erfolgt über das „Identifikation“-Objekt gemäß der „OPC UA for Machinery“-Spezifikation [17], wodurch Sensoren herstellerunabhängig identifizierbar sind. Die Prozesswerte selbst sind objektorientiert instanziiert. Dabei kommt, wie in Bild 7 dargestellt, der AnalogSignalType [18] zum Einsatz. Dieser Datentyp verknüpft den eigentlichen Messwert mit semantischen Metainformationen wie der physikalischen Einheit (EngineeringUnits) und dem gültigen Wertebereich (EURange).

Wie in Tabelle 1 dargestellt, werden für den Vision-Sensor verschiedene Qualitäts-Scores (Übereinstimmungsgrade) und für den Laser-Sensor geometrische Abweichungen (Delta-Werte) übertragen. Ergänzend verfügt jeder Sensor über eine Variable „ProcessResult“. Diese aggregiert die Einzelmessungen zu einer Gesamtentscheidung (zum Beispiel IO/NIO) für den aktuellen Schritt, was eine schnelle Gut/Schlecht-Auswertung ohne Analyse der Einzelwerte ermöglicht.

Da die Übertragung der Prozesswerte ohne hierarchische Struktur in Form einer flachen Liste erfolgt, ist für die eindeutige Zuordnung von Bauteil, Bearbeitungsschritt und Messwerten eine

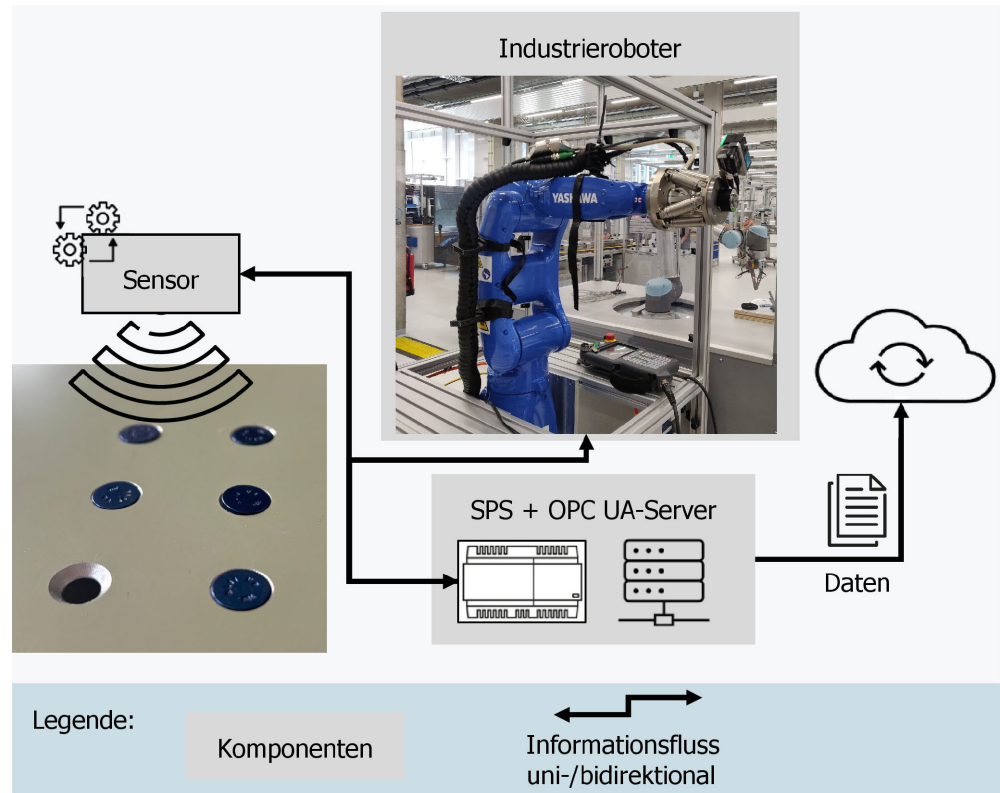


Bild 8 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Industrieroboter, integrierter Sensorik und OPC-UA-Datenanbindung. Grafik: Fraunhofer IGCV

Tabelle 2 Konfusionsmatrix der Bildklassifikation zur Beurteilung des Dichtmittelaustritts (Ist-Zustand versus Messung, Klassen Gut und Schlecht).

		Messung	
		Gut	Schlecht
Ist	Gut	25	5
	Schlecht	0	70

zusätzliche Identifikation nötig. Dazu wird jedem Datensatz eine „ProcessStepId“ beigefügt (Tabelle 1). Diese ID repräsentiert den logischen Index des Fügevorgangs (zum Beispiel Position im SPS-Programm). Die Auflösung dieser ID in Koordinaten erfolgt im übergeordneten System durch Abgleich mit Prozess- oder Planungsdaten. Dies entkoppelt die Prozesssteuerung von komplexen Datenmodellen des Produkts.

5 Realisierung und Diskussion

5.1 Versuchsaufbau

Zur Verifizierung des Sensorik-Konzepts und der Schnittstellenarchitektur wurde eine Untersuchung unter Laborbedingungen durchgeführt. Der realisierte Versuchsaufbau ist schematisch in **Bild 8** dargestellt.

Als zentrale Steuerungseinheit kommt eine Siemens S7-1500 zum Einsatz, die gemäß dem zuvor beschriebenen Konzept gleichzeitig die Bereitstellung der Prozessdaten übernimmt. Die Validierung der Datenschnittstelle und der Übertragungskonsistenz erfolgte im Versuch mittels des OPC-UA-Clients „UaExpert“.

Die Positionierung der Sensorik relativ zum Bauteil wurde realisiert durch einen Industrieroboter des Typs „Yaskawa GP8“

(Bild 8). Im Rahmen dieser Voruntersuchung sind die Sensoren (Laser- und Vision-Sensor) direkt am Roboterflansch montiert. Auf den Einsatz des finalen Endeffektors wurde in dieser Phase verzichtet, um isolierte Aussagen über die Sensorperformance treffen zu können. Als Prüflinge dienten originale Musterbauteile aus der Serienproduktion (Bild 8 links), um eine hohe Aussagekraft der Messergebnisse sicherzustellen.

Eine abschließende Validierung des Gesamtsystems unter Einbeziehung des im Projekt entwickelten Endeffektors ist für eine nachgelagerte Projektphase vorgesehen.

5.2 Ergebnis der Machbarkeitsstudie

Die Qualitätssicherung der Einbringtiefe wurde anhand von 15 Musterteilen validiert. Die Messungen zeigen eine Streuung im Bereich 0,01 mm und bestätigen somit die Genauigkeit des gewählten Sensors. Damit ist die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Messkette nachgewiesen. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs sind jedoch keine statisch belastbaren Aussagen zur Messunsicherheit möglich.

Zur Bewertung des Dichtmittelaustritts wurden 100 Beispiele aus der Produktion herangezogen (30 gut, 70 schlecht). Die resultierende Konfusionsmatrix ist in **Tabelle 2** dargestellt.

Damit werden 25 von 30 Gutteilen und alle 70 Schlechteile korrekt klassifiziert. Die Gesamt-Trefferrate beträgt rund 95%. Die fünf „False Positives“ (gut, aber als schlecht erkannt) führen lediglich zu einer manuellen Prüfung beziehungsweise Auswertung. „False Negatives“ (schlecht, aber als gut erkannt) traten nicht auf. Dieser Fehlerfall ist besonders kritisch, da Fehler nicht erkannt werden. Vor diesem Hintergrund wurde der Klassifikator so ausgelegt, dass grenzwertige Fälle als schlecht klassifiziert werden.

In Summe zeigen die Ergebnisse, dass das Sensorkonzept Einbringtiefe und Dichtmittelaustritt grundsätzlich automatisiert bewerten kann, eine statistisch belastbare Systembewertung erfordert jedoch weiterführende Untersuchungen mit größerem Stichprobenumfang.

5.3 Diskussion

Die Diskussion des entwickelten Systems erfolgt durch den Abgleich der definierten Anforderungen (A1–A8) mit den experimentellen Ergebnissen:

- (A1) Steuerung: Das Konzept einer hybriden Sensorik unter Führung einer zentralen SPS konnte getestet werden.
- (A2) Modularität der Sensorik: Die Anforderung wurde durch die Kapselung der Sensoren als eigenständige OPC-UA-Komponenten erfüllt. Dies ermöglicht den Austausch der physischen Sensoreinheit (wie etwa Wechsel des Kamera-Modells), ohne die logische Integrationsstruktur im Leitsystem ändern zu müssen, da die Schnittstelle standardisiert bleibt.
- (A3) Einbringtiefe & (A4) Benetzung: Die Kombination aus Lasertriangulation (für Überstand) und 2D-Vision (für Dichtmittel) deckt die geforderten Qualitätsmerkmale ab.
- (A5) Prüfumfang: Eine 100-%-Prüfung der definierten Merkmale ist möglich.
- (A6) Dokumentation & Rückverfolgbarkeit: Vollständig umgesetzt durch das semantische Datenmodell.

Die Aussagekraft der Ergebnisse zu A3 und A5 ist jedoch begrenzt. Der geringe Stichprobenumfang zur Einbringtiefe erlaubt lediglich einen Funktionsnachweis der Messkette, nicht aber eine belastbare Quantifizierung der Messunsicherheit. Auch die Bewertung der Dichtheit beruht auf einer begrenzten Auswahl von Verbindungen. Die daraus abgeleitete Trefferrate ist daher nur als Hinweis auf die grundsätzliche Eignung des Ansatzes und nicht als statistisch robuste Systemkennzahl zu verstehen. Formale Signifikanztests wurden vor diesem Hintergrund nicht durchgeführt.

Der Laboraufbau bildet lediglich idealisierte Randbedingungen ab. Effekte wie Verschmutzung der Optik, wechselnde Lichtverhältnisse oder bauteilabhängige Reflexionen werden bislang nicht systematisch untersucht. Zudem beschränkt sich die Prüfung auf die von außen zugänglichen Merkmale. Eine Kontrolle des innenliegenden Schließrings ist im aktuellen Aufbau nicht vorgesehen und muss durch ein korrespondierendes Innen-System ergänzt werden. Insgesamt ist das Sensorkonzept daher als technischer Machbarkeitsnachweis zu verstehen, eine industrielle Validierung mit größerer Stichprobe, realitätsnahen Störgrößen und beidseitiger Prüfung ist Gegenstand zukünftiger Arbeiten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Sensorkonzepts im Labor für die In-Process-Prüfung von Einbringtiefe und Dichtmittelaustritt demonstriert werden konnte. Die Integration der Sensorik in den entwickelten Endeffektor sowie umfangreiche Versuchsreihen in einem realitätsnahen Laborumfeld sind erforderlich, um Messunsicherheit, Robustheit und Klassifikationsgüte für eine zukünftige industrielle Anwendung belastbar zu quantifizieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit adressierte die Diskrepanz zwischen dem etablierten Stand der Automatisierungstechnik und der bislang fehlenden integrierten Qualitätssicherung in der Flugzeug-

montage. Zur Schließung dieser Lücke wurde ein hybrides Sensorkonzept entwickelt, welches die geometrische Einbringtiefe mittels Laser-Triangulation und die Dichtmittelbenetzung mittels Bildverarbeitung überwacht. Die Machbarkeitsstudie bestätigte, dass die relevanten Qualitätsmerkmale prozesssicher innerhalb des Qualitätskorridors erfasst und über OPC UA dokumentiert werden können. Damit wurde der Nachweis erbracht, dass die Qualitätsprüfung technologisch in den automatisierten Fügeprozess integrierbar ist.

Ausblickend steht der Transfer vom statischen Laboraufbau auf den realen Endeffektor an, um dynamische Einflussfaktoren des Gesamtsystems im Laborumfeld zu evaluieren. Das wesentliche Potenzial für künftige Entwicklungen liegt in der sekundären Nutzung der akquirierten Datenbasis. Über die reine Dokumentation hinaus ermöglichen die gespeicherten Prozesskennwerte tiefgehende Analysen zur langfristigen Prozessoptimierung. Durch die Auswertung von Trends und Korrelationen können Fertigungsparameter datengestützt angepasst werden, um systematische Abweichungen zu korrigieren und die Prozesseffizienz nachhaltig zu steigern, noch bevor Toleranzgrenzen verletzt werden.

FÖRDERHINWEIS

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi) für die Förderung des Verbundprojekts „ProLefAnD“

L I T E R A T U R

- [1] Zhu, W.; Zhang, A.; Mei, B. et al.: Automatic stepping for circumferential splice drilling in aircraft fuselage assembly. *Industrial Robot: An International Journal* 43 (2016) 2, pp. 144–152
- [2] Deng, L.; Liu, G.; Zhang, Y.: A Review of Machine Vision Applications in Aerospace Manufacturing Quality Inspection. 2024 4th International Conference on Computer, Control and Robotics (ICCCR), Shnghai, China, 2024, pp. 31–39
- [3] Lettera, G.; Natale, C.: An Integrated Architecture for Robotic Assembly and Inspection of a Composite Fuselage Panel with an Industry 5.0 Perspective. *Machines* 12 (2024) 2, #103, <https://doi.org/10.3390/machines12020103>
- [4] Abshagen, S.; Chahine, A.; Shah, N. H. et al.: Production-related testing and optimisation environment for hardware and software in aircraft production of today and tomorrow. *Forschungsaktivitäten im Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr dtec.bw : Band 2* (2024), <https://doi.org/10.24405/16791>
- [5] Psarommatis, F.; May, G.; Azamfirei, V. et al.: Optimizing efficiency and zero-defect manufacturing with in-process inspection: challenges, benefits, and aerospace application. *Procedia Computer Science* 232 (2024), pp. 2857–2866
- [6] Cai, H.; Zhang, W.; Zhu, Z.: Quality Management and Analysis of Aircraft Final Assembly Based on Digital Twin. 2019 11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), Hangzhou, China, 2019, pp. 202–205
- [7] Braun, G.; Glück, R.; Stefani, T. et al.: Wirtschaftliche und technische Gesichtspunkte der Bearbeitung von kohlenstoffaserverstärkten Bauteilen durch roboterbasierte kombinierte Laser- und Fräsbearbeitung. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2018, Friedrichshafen, elib.dlr.de/121775/*
- [8] Pott, A.: Industrielle Robotersysteme. *Entscheidungswissen Für Die Planung und Umsetzung Wirtschaftlicher Roboterlösungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2019
- [9] Wolf, A.; Schunk, H.: Greifer in Bewegung. *Faszination der Automatisierung von Handhabungsaufgaben*. München: Carl Hanser Verlag 2016


- [10] Wang, Z.; Qin, X.; Bai, J. et al.: Design and Implementation of Multi-functional Automatic Drilling End Effector. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 187 (2017), #12032
- [11] Mao, J.; Xiao, S.; Yang, J. et al.: Integration and Experiment of Double Robot Drilling and Riveting System with Barrel Structure. 2024 9th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), Dalian, China, 2024, pp. 118–126
- [12] Caterino, M.; Chiacchio, P.; Cristalli, C. et al.: Robotized assembly and inspection of composite fuselage panels: the LABOR project approach. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1024 (2021) 1, #12019
- [13] Bruni, A.; Concettoni, E.; Cristalli, C. et al.: Smart Inspection Tools in robotized aircraft panels manufacturing. Proceedings of the 2019 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace. Torino, Italy, 2019, IEEE 2019, pp. 649–654
- [14] Keyence Deutschland: Vision-Sensor mit künstlicher Intelligenz – Modellreihe IV2. Stand: 2026. Internet: www.keyence.de/products/vision/vision-sensor/iv2/. Zugriff am 02.03.2026
- [15] Keyence Deutschland: Bildbasierter Höhenvergleichssensor – Modellreihe IX. Stand: 2026. Internet: www.keyence.de/products/sensor/positioning/ix/. Zugriff am 02.03.2026
- [16] OPC Foundation: OPC 10000–1: UA Part 1: Overview and Concepts 1.05.06. Stand: 31.10.2025. Internet: reference.opcfoundation.org/Core/Part1/v105/docs/. Zugriff am 03.03.2026
- [17] OPC Foundation: OPC 40001–1: Machinery Basic Building Blocks 1.04.1. Stand: 13.01.2026. Internet: reference.opcfoundation.org/Machinery/v104/docs/. Zugriff am 03.03.2026
- [18] OPC Foundation: OPC 30081: Process Automation Devices – PADIM 1.01.0. Stand: 27.10.23. Internet: reference.opcfoundation.org/PADIM/v101/docs/. Zugriff am 03.03.2026

Keven Kirner, M.Eng. 
keven.kirner@igcv.fraunhofer.de

Sebastian Maier, M.Sc. 
sebastian.maier@igcv.fraunhofer.de

Jannik Möhrle, M.Sc. 
jannik.moehrle@igcv.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp 
johannes.schilp@igcv.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV 
 Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg
www.igcv.fraunhofer.de

LIZENZ



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