Entwicklung eines Mensch-Roboter-kollaborationsfähigen Nietprozesses unter Verwendung von KI-Algorithmen und Blockchain-Technologien

- Unter Randbedingungen der Flugzeugstrukturmontage -

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von
Tobias Masiak

Saarbrücken
2020

Tag des Kolloquiums: 18.12.2020
Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Jörn Walter
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller
Korreferat: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Georg Frey
Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. Paul Motzki

Kurzfassung

Steigende Variantenzahlen und immer kürzere Entwicklungszyklen bei sinkenden Verkaufserlösen stellen die Flugzeugbranche vor neue Herausforderungen und Kostendruck, der sich unter anderem in der Produktion niederschlägt. Daher besteht Bedarf für eine intelligente und anpassungsfähige Produktion.

Zur Sicherstellung der Qualität während der Montage von Großbauteilen gelten enge Toleranzfelder und hohe Sicherheitsstandards. Dies wird bis heute mit einer Vielzahl an manuellen Montage-, Prüf- und Signierprozessen sichergestellt.

Bei der Montage von Flugzeugstrukturen - in dem in der Arbeit vorliegenden Szenario, dem Rumpfheck - gilt es eine ergonomische Entlastung des Menschen unter Verwendung einer fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter sicherzustellen und gleichzeitig die Effizienz und Prozessnachverfolgbarkeit zu steigern.

Die Mensch-Roboter-Kollaboration erlaubt in Verbindung mit einem intuitiven Interaktionskonzept, die effiziente Durchführung der Prozesse im Hybriden-Team. Künstliche Intelligenz unterstützt bei der Qualitätssicherung, indem prozessspezifische Sensordaten zur Bewertung der Qualität verwendet werden. Die anschließende Qualitätsdokumentation wird mithilfe von Blockchain-basierten Technologien integer und sicher durchgeführt.

Anhand von Demonstratoren wird die Funktion des entwickelten Systems nachgewiesen und validiert, der Mehrwert gegenüber dem Stand der Technik aufgezeigt und ein Ausblick gegeben.

Abstract

An increasing number of variants and shortened development cycles are coinciding with decreasing sales revenue to challenge the aircraft industry and cause cost pressure, which is reflected in production. There is therefore a need for intelligent and adaptable production.

In order to ensure the products quality during the assembly of large components, narrow tolerance ranges and high safety standards are applied. This is guaranteed with a number of manual assembly, testing, and signing processes.

In the assembly of aircraft structures - in this scenario presented in this dissertation, the aft section of the fuselage - the aim is to ensure ergonomic relief for humans via skill-based division of tasks between humans and robots while also increasing efficiency and process traceability.

Human-robot collaboration, in combination with an intuitive interaction concept, allows efficient execution of processes in this hybrid team. Artificial intelligence supports quality assurance by using process-specific sensor data to evaluate quality. The subsequent quality documentation is done with integrity and security using blockchain-based technologies.

Demonstrators are used to prove and validate the function of the developed system, show the added value compared to the state of the art, and provide an outlook.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH (ZeMA) in Saarbrücken in der Abteilung Montageverfahren und -automatisierung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller, Lehrstuhlleiter und wissenschaftlicher Geschäftsführer des ZeMA und Betreuer meiner Dissertation, danke ich besonders für seine hilfreichen Ratschläge, die wissenschaftlichen Erkenntnisse und die umfassende Betreuung, die zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.

Für die wissenschaftliche Begleitung meiner Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Frey sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl für die Übernahme des Korreferates.

Bedanken möchte mich bei allen Mitarbeiterinnen Mitarbeitern des Institutes, den studentischen Hilfskräften sowie den Studien-, Diplom- und Masterarbeitern und Kooperationspartnern: Christian Gusenburger, Daniel Mayer, Sascha Vosseler, El Khansa Rekik, Aditya Gulati, Gonzalo Castro, Daniel Gusenburger, Tajbeed Ahmed Chowdhury, Sreekesh Prabhu, Zeeshan Khan, Graydon Hope, Gregory Ivo, Joshua O'Reilly, Ben Wagner, Ben Johnson, Mehdi Aroua, Albert Schulz (PIKON) und Benjamin Duppe (PIKON).

Ein besonderer Dank gilt der Forschungsgruppe Robotik & Mensch-Technik-Interaktion bei der Begleitung, der gemeinsamen Forschung und Durchsicht meiner Arbeit. Dazu gehören: Matthias Vette-Steinkamp, Maja Maltipoo, Ali Kanso, Daniela Schmidt, Svenja Haerecke, Fabian Adler, Anette Slotty, Verena Milde und Luise Ehrmantraut.

Abschließend bedanke ich mich insbesondere bei meinen Eltern, Rita und Fred, meinem Bruder Christian und meiner großen Liebe Andrea für die stetige Unterstützung während meiner Promotionszeit.

Saarbrücken, Februar 2020
Tobias Masiak

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung **III**

Danksagung **V**

Abbildungsverzeichnis **III**

Tabellenverzeichnis **IX**

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis **X**

1 Einleitung **1**

1.1 Zielsetzung und These der Arbeit 4

1.2 Aufbau der Arbeit 6

1.3 Forschungsdemonstrator 8

2 Stand der Technik in Forschung und Industrie **11**

2.1 Grundlagen der Montagetechnik 11

2.2 Grundlagen der Robotik 15

2.3 Grundlagen Mensch-Roboter-Kollaboration 29

2.4 Grundlagen Mensch-Technik-Interaktion 32

2.5 Grundlagen der Künstlichen Intelligenz 35

2.6 Grundlagen Blockchain - Distributed-Ledger-Technologie - Directed Acyclic Graphs 44

2.7 Begriffe des Toleranzmanagements 51

2.8 Produktbetrachtung und Szenario für die Mensch-Roboter-Kollaboration 53

3 Vorgehen zum Systementwurf und Konzept **65**

3.1 Vorgehen in der Applikationsentwicklung 65

3.2 Konzept des teilautomatisierten Nietsystems 68

4 Planungsansatz für die MRK-Station **75**

4.1 Methodik zur Stationsbedienung 75

4.2 Vorgehen zur Integration von Sensoren und Algorithmen 79
4.3 Erweiterung des Vorgehensmodells um die Distributed-Ledger-Technologie 82

5 Konzeption MRK-Station für die Großbauteilmontage 85
5.1 Systemarchitektur 85
5.2 Messstrategien 90
5.3 Prozesswerkzeugentwicklung 102
5.4 KI-basierte Echtzeit-Qualitätsprüfung 112
5.5 Mensch-Technik-Interaktion in den Phasen Konzeption, Planung, Konfiguration und Betrieb 119
5.6 Konzept zur Steigerung der Datenintegrität mittels DLT 125

6 Validierung des MRK-Systems 133
6.1 Validierungsszenario 133
6.2 Funktionsnachweis 135
6.3 Erprobung im Gesamtsystem 142
6.4 Beantwortung der Forschungsfrage 146
6.5 Reflexion der Forschungsarbeit 150

7 Zusammenfassung und Ausblick 155

Literaturverzeichnis i

Anhang xv
A.1 Zusätzliche Abbildungen xvi
A.2 Veröffentlichungen xvii
A.3 Betreute Abschlussarbeiten xviii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Die Abbildung zeigt alle Kernkomponenten des Demonstrators zur Validierung des kollaborativen Nietprozesses in der Flugzeugsektionsmontage. 9
Abbildung 1.2 Arbeitsraumanalyse für den Roboter in der Sektion 19 9

Abbildung 2.1 Aufgaben der Montage [21] 12
Abbildung 2.2 Haupt- und Nebenachsen eines seriellen Knickarmroboters [34] 16
Abbildung 2.3 Bauarten und Arbeitsräume von Industrierobotern in Anlehnung an [29] [30] 17
Abbildung 2.4 Bauarten von Roboterhandgelenken - Winkelhand (links) und Zentralhand (rechts) [36] [37] [34] 18
Abbildung 2.5 Beschreibung eines Körpers/Punktes im Raum durch einen Vektor [36] 19
Abbildung 2.6 Koordinatentransformationen zwischen den Koordinatensystemen, $\mathbf{O}_i$, $\mathbf{O}_j$ und $\mathbf{O}_k$ 21
Abbildung 2.7 Roll-Pitch-Yaw-Notation eines körperfesten Koordinatensystems in der Schifffahrt (links) und an einer Roboterhand (rechts) [39] . . . 22
Abbildung 2.8 Transformationen nach Denavit Hartenberg in Anlehnung an [36] 24
Abbildung 2.9 Transformationen nach Denavit Hartenberg für ein Robotersystem mit sechs Freiheitsgraden in der Home Position. 24
Abbildung 2.10 Vorwärts- und Rückwärtstransformation zwischen Kartesischen und Achsspezifischen Koordinatensystemen [44] 27
Abbildung 2.11 Online- und Offline-Programmierverfahren für Industrieroboter [44] 27
Abbildung 2.12 Betriebsmodispektrum vom Stand der Technik bis zur Mensch-Roboter-Kollaboration [46] 30
Abbildung 2.13 Darstellung der Mensch-Technik-Interaktion bzw. Mensch-Roboter-Interaktion-Taxonomie in Anlehnung an [48] und [59] 33
Abbildung 2.14 Möglichkeiten des Informationsaustausches zwischen Mensch und Technik über verschiedene Ein- und Ausgabeeinheiten 34
Abbildung 2.15 Graphische Einordnung der KI-Begrifflichkeiten 38

Abbildung 2.16 Darstellung der unterschiedlichen Machine-/Deep-Learning-Methoden 39
Abbildung 2.17 Vorgehen bei Machine-Learning-Projekten mit der Supervised-Learning-Methode 41
Abbildung 2.18 Aufbau eines biologischen Neurons (links) [65] und Modellierung eines Artificial Neural Networks (rechts) 42
Abbildung 2.19 Modellierung eines Convolutional Neural Networks am Beispiel des LeNet-Modells zur Erkennung von handschriftlichen und maschinell gedruckten Zeichen [82] 43
Abbildung 2.20 Beispielhafte Modellierung eines Ensemble-Entscheidungsbaums (*Decision Tree*) in Anlehnung an [89] 44
Abbildung 2.21 Daten-Struktur einer Blockchain in Anlehnung an [98] [14] . . 47
Abbildung 2.22 Ablauf einer Transaktion im Blockchain-Netzwerk in Anlehnung an [98] 48
Abbildung 2.23 Datenstruktur eines Directed Acyclic Graph (DAG) [105] [14] . 50
Abbildung 2.24 Flugzeugstruktur des Airbus A320 mit seinen verschiedenen Sektionen (links) und dem Teilabschnitt Sektion 19, bestehend aus der Druckkalotte und der Sektionstonne (rechts) in Anlehnung an [114] [115] [116]. 53
Abbildung 2.25 Darstellung des Produktionsablaufes von der Stringer- und Clip-Montage bis zur finalen Konservierung in Anlehnung an [116] 54
Abbildung 2.26 Schnittdarstellung des aktuellen manuellen Mensch-Mensch-Nietverfahrens während der Montage der Sektion 19 in Anlehnung an [114] 55
Abbildung 2.27 Verwendete Betriebsmittel im Nietprozess: Verschiedene Ausführungen eines Niethammers (links) und eines Ambosses/Gegenhalters (rechts) [119] 56
Abbildung 2.28 Begriffe des Nietprozesses [120] [23] 57
Abbildung 2.29 Typische Fehler, die während des Nietprozesses auftreten können [23] 58
Abbildung 2.30 Verfahren zum Entfernen von fehlerhaften Nietverbindungen [23] 59
Abbildung 2.31 Struktureller Aufbau eines Airbus A350 [115] 61
Abbildung 2.32 Automatisierung mit Robotern im Hangar 245 bei Airbus in Hamburg [115] 62
Abbildung 2.33 Darstellung einer Fließmontage von der Schalenmontage bis zur Sektionsmontage [116] [35] 62
Abbildung 2.34 Roboter-Nietsystem für Boeing 777-Rumpfmontage von KUKA Systems [124] 63

Abbildung 3.1 Angewandtes V-Modell für die Konzeption einer MRK-Station für die Großbauteilmontage in der Flugzeugsektionsmontage in Anlehnung an [126] 66
Abbildung 3.2 Ganzheitlicher Planungsansatz für die Entwicklung von Montageprozessen in Anlehnung an [114] 68
Abbildung 3.3 Konzept für die Teilautomatisierung eines Nietvorgangs in der Montage der Druckkalotte zur Sektionstonne mittels Mensch-Roboter-Kollaboration 69
Abbildung 3.4 MRK-Prozess zwischen Mensch und Roboter an der Druckkalotte und Sektion 19 71
Abbildung 3.5 Das teilautomatisierte Nietsystem besteht aus sieben Kernkomponenten, die abgedeckt sein müssen in Anlehnung an [127] 73

Abbildung 4.1 Die allgemeingültige Bedienmethode des teilautomatisierten Systems wird individuell auf die Anforderungen der Prozessstation in der Flugzeugproduktion zugeschnitten (in Anlehnung an [134] [114]). 76
Abbildung 4.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) für die intuitive Bedienmethode in Anlehnung an [114] 78
Abbildung 4.3 Arten der Six-Sigma-Methoden: DMAIC- und PIDOV-Methode in Anlehnung an [135] 80
Abbildung 4.4 Vorgehensmodell zur Integration von Sensoren und Algorithmen während der Prozessentwicklung in Anlehnung an das Six-Sigma PIDOV-Modell [135] 81
Abbildung 4.5 Erweiterung des Vorgehensmodells zur Integration von Sensoren und Algorithmen um die Distributed-Ledger-Komponenten 83

Abbildung 5.1 Das modulare Steuerungssystem zur Konfiguration des Montagesystems mit multimodalen Interaktionsmöglichkeiten in Anlehnung an [10] 88
Abbildung 5.2 Software- und Hardwarekomponenten des Steuerungssystems . 89
Abbildung 5.3 Anpassung des Koordinatensystems entsprechend den Gleichungen 5.1 und 5.2 in Anlehnung an [114] 91
Abbildung 5.4 Feature-Erkennung der Nietlöcher durch Interpolation und Best-Fit-Methode. Vektoren zu den von einem Laserliniensensor aufgezeichneten verrauschten Punkten; projizierte Punkte zu der angepassten 2D-Ebene in Anlehnung an [10] 93
Abbildung 5.5 Toleranzkette mit und ohne Laserliniensensor im Forschungsdemonstrator in Anlehnung an [149] 95

Abbildung 5.6 Transformationsbeziehungen zwischen Nietloch, Sensor, Roboterbasis und Amboss in Anlehnung an [149] 96
Abbildung 5.7 Zweig des Merkmalentstehungsbaums, der den Roboterteil des Nietprozesses beschreibt [149] 99
Abbildung 5.8 Zweimassensystem bestehend aus Roboter (links) und Gegenhalter (mitte) als Prozesswerkzeug. Die Kraft- und Schwingungsanregung erfolgt durch den Niethammer (rechts), der vom Werker betätigt wird. In Anlehnung an [127] 103
Abbildung 5.9 Skizze des Nietwerkzeugprototyps entsprechend der Anforderungsliste [150] 106
Abbildung 5.10 Schwingung des Roboter-TCPs in z-Achsenrichtung nach Stimulation durch einen Hammer (links). Ergebnis der Fast-Fourier-Transformation des gegebenen Signals (rechts) in Anlehnung an [127]. 108
Abbildung 5.11 Amplitudenfrequenzgang des Zweimassensystems von Roboter und Gegenhalter in Anlehnung an [127] 110
Abbildung 5.12 Zusammenhang zwischen der aufgebrachten Kraft durch den Niethammer und der Übertragungskraft auf den Roboterflansch 111
Abbildung 5.13 Sensordaten, die für das Training des Modells verwendet werden. In Anlehnung an [152] 113
Abbildung 5.14 Bilder, Laserliniensensor- und Kraft-Moment-Sensordaten werden entsprechend den Spezifikationen als gute (links) oder schlechte (rechts) Nietverbindung kategorisiert. 114
Abbildung 5.15 Rohdaten des Kraft-Momenten-Sensors von zwei guten Nietverbindungen (Niet 9 und 186). Kraft Fx, Fy und Fz in N; Drehmoment Tx, Ty und Tz in Nm [152] 116
Abbildung 5.16 Ausrichtung der Sensordaten. Geglättete Kraft Fx vor (links) und geglättete Kraft Fx nach der Ausrichtung (rechts) in Anlehnung an [152]. 117
Abbildung 5.17 Die drei verschiedenen Arten der vorverarbeiteten Daten. Die Kraft Fx, Fy, Fz und die Drehmomente Tx, Ty, Tz sind standardisiert. [152] 118
Abbildung 5.18 Architektur des Convolutional-Neural-Network-Klassifikators [152] 118
Abbildung 5.19 Anwendung der Mensch-Technik-Interaktion bzw. Mensch-Roboter-Interaktion-Taxonomie auf den Niet- und Prüfprozess in der Flugzeugproduktion entsprechend Abbildung 2.13. 119
Abbildung 5.20 Verfahren zur Planung und Programmierung eines Montagesystems in Anlehnung an [35] (Abschnitt 1-2 von 4) 123

Abbildung 5.21 Verfahren zur Planung und Programmierung eines Montagesystems in Anlehnung an [35] (Abschnitt 3-4 von 4) 124
Abbildung 5.22 Mobile Schnittstellen für die Mensch-Technik-Interaktion mit dem Steuerungssystem, den Betriebsmitteln einschließlich Visualisierungen im Rahmen der Werkerassistenz. Smartwatch (links) und Mixed Reality (rechts) in Anlehnung an [127] [10]. 125
Abbildung 5.23 Computer und mobile Schnittstellen für die Mensch-Technik-Interaktion mit dem Steuerungssystem, den Betriebsmitteln einschließlich Visualisierungen im Rahmen der Werkerassistenz. MTI-Schnittstelle zur Robotervisualisierung und Anpassung der Wegpunkte (links), browserbasierte Robotervisualisierung (Mitte) und Steuerungszentrale zum Starten und Stoppen einzelner Softwarekomponenten (rechts) in Anlehnung an [127] [10]. 125
Abbildung 5.24 Vision von vernetzten Diensten und Maschinen mittels kabelgebundener oder funkbasierter Technologien und eines sicheren Kommunikationsprotokolls - hier am Beispiel der 5G-Funktechnologie und dem IOTA-Projekt. 126
Abbildung 5.25 Prozess- und Sensordaten, die während des Nietprozesses gesammelt und im IOTA-Tangle hinterlegt werden in Anlehnung an [14] . . 127
Abbildung 5.26 Darstellung einer json-formatierten Nachricht, die dem IOTA-Tangle hinzugefügt wird 128
Abbildung 5.27 Ablauf von der Erfassung der Rohdaten bis zur Validierung unter Verwendung des IOTA-Protokolls und der entwickelten IOTA-Management-Console 129
Abbildung 5.28 Visualisierung des IOTA-Management-Console-Dashboards . . 130
Abbildung 5.29 Sensordatenstream in der unternehmensinternen Datenbank . . 130
Abbildung 5.30 Validierung eines Sensordatenstreams im IOTA-Tangle 131

Abbildung 6.1 Die aktuelle Situation in der Sektionsmontage von Flugzeugen [116] 134
Abbildung 6.2 Demonstrator/ Entwicklungsumgebung zur Validierung des kollaborativen Nietprozesses, der Qualitätskontrolle mittels Künstlicher Intelligenz und der blockchain-basierten Steigerung der Datenintegrität mittels des IOTA-Protokolls am ZeMA. 135
Abbildung 6.3 Messung der Nietprozesskräfte, die in die Roboterkinematik eingeleitet werden. Nietung ohne integriertes Federelement links und Nietung mit integriertem Federelement rechts. [150] 138

Abbildung 6.4 Das entwickelte modulare Nietwerkzeug besitzt aufgrund der Schwungmasse die Fähigkeit, den Nietprozess kollaborativ mit dem Menschen auszuführen und ist mit diversen Sensoren ausgestattet. 139
Abbildung 6.5 Mobiler Demonstrator zur Validierung des kollaborativen Nietprozesses, der Qualitätskontrolle mittels künstlicher Intelligenz und der blockchain-basierten Steigerung der Datenintegrität mittels des IOTA-Protokolls am ZeMA. 143
Abbildung 6.6 Gesamtaufbau der Flugzeugnietstation am ZeMA 144
Abbildung 6.7 Validierung des Nietwerkzeuges. Das Nietwerkzeug wird von einem MRK-fähigen Robotersystem im Arbeitsraum positioniert. 145
Abbildung 6.8 Validierung des Prozessablaufes in der Sektion 19. Das MRK-fähige Robotersystem wird von einer Hubeinheit im Arbeitsraum positioniert. 146
Abbildung 6.9 Validierung der Mensch-Technik-Interaktion sowie Integration einer Bedienmethode und Smart Devices. 147

Abbildung A.1 Abbildung aller MEB-Module des Nietprozesses [149] xvi

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Aufstellung unterschiedlicher KI Definitionen in Anlehnung an [65] 36

Tabelle 5.1 Soll- und Istwerte der Toleranzkettenanalyse [149] 102
Tabelle 5.2 Anforderungsliste an das Nietprozesswerkzeug 105
Tabelle 5.3 Teilfunktionen des Werkzeuges und ausgewählte Komponenten . 106

Tabelle 6.1 Leistungsmessungen von Modellen des maschinellen Lernens an vorverarbeiteten Kraft-Momenten-Sensordaten [152] 140
Tabelle 6.2 Leistungsmessung von Modellen des maschinellen Lernens anhand von Bilddaten [152] 140

Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung
${}^{i}\underline{r}_{p}$	Ortsvektor im Koordinatensystem i
${}^{j}\underline{r}_{p}$	Ortsvektor im Koordinatensystem j
${}^{i}\underline{r}_{O_j,O_i}$	Koordinatenursprungsvektor im Koordinatensystem i
${}^{i}\mathbf{D}_{j}$	Drehmatrix
${}^{i}\mathbf{T}_{j}$	Homogene Matrix
${}^{0}\mathbf{T}_{6}$	Gesamttransformationsmatrix
${}^{i}\mathbf{T}_{j}$	Transformationsmatrix
α	Rollwinkel
β	Gierwinkel
γ	Nickwinkel
$\delta_{j,i}$	Drehwinkel der DH-Notation
$d_{j,i}$	Achslänge der DH-Notation
$l_{j,i}$	Kreuzungsabstand der DH-Notation
$\gamma_{j,i}$	Kreuzungswinkel der DH-Notation

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AI	Artificial Intelligence
ANN	Artificial Neural Networks
AWL	Anweisungsliste
CAD	Computer-Aided Design = rechnerunterstütztes Konstruieren
CNN	Convolutional Neural Network
DAG	Directed Acyclic Graphs
DH Notation	Denavit-Hartenberg-Notation
DLT	Distributed-Ledger-Technologie
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FT-Sensor	Force-Torque-Sensor = Kraft-Momenten-Sensor
FUP	Funktionsplan
IPO	Innovative Prozessoptimierung
KCF	Key Characteristic Flowdown
KI	Künstliche Intelligenz
KNN	Künstliche Neuronale Netze
KOP	Kontaktplan
MAgg	Maximale Aggregation
MAv	Moving Average = gleitenden Mittelwert
MEB	Merkmalentstehungsbaum
ML	Machine Learning
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MTI	Mensch-Technik-Interaktion
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
OEM	Original Equipment Manufacturer
OG	Orientierungsgrad
OZ	Ordnungszutand
PIP	Perceptually Important Points = wahrnehmungsbedingt wichtige Punkte

Abkürzung	Beschreibung
PoW	Proof of Work
RSS	Root Sum Square
RPY	Roll-Pitch-Yaw Notation
SOA	Serviceorientierte Architekturen
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
TCP	Tool Center Point
TOC	Theory of Constraints = Engpasstheorie
TTPs	Trusted Third Parties

Gender Hinweis

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Dissertation die gewohnte männliche Sprachform bei personenbezogenen Substantiven und Pronomen verwendet. Dies impliziert jedoch keine Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, sondern soll im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen sein. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mit gemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

Gewidmet
Rita, Fred, Christian und Andrea ♡

Kapitel 1

Einleitung

Der stetige technologische Fortschritt und eine zunehmende Globalisierung führen zu erhöhtem Kostendruck in der industriellen Produktion und stellen produzierende Unternehmen vor große Schwierigkeiten beim Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit an Hochlohnstandorten. Gleichzeitig müssen Unternehmen auf individuelle Kundenwünsche, volatile Märkte, schwankende Stückzahlnachfragen und den demografischen Wandel reagieren. [1] [2]

Die Automobilindustrie hat es demonstriert: In der Montage von Automobilen existieren Vormontagelinien, die Baugruppen an das Fahrzeug liefern. Diese Baugruppen werden in der Hauptlinie an das Fahrzeug montiert. Die Produktion heutiger Automobile erfolgt über Unternehmens- oder Ländergrenzen hinweg. Aus Kostengründen werden Vormontageaufgaben oftmals an Zulieferer ausgelagert. Weiterhin ist die Automobilbranche von einem hohen Automatisierungsgrad geprägt. Davon ausgenommen ist aufgrund der Variantenvielfalt und dadurch entstehender Komplexitäten üblicherweise die Endmontage. [3] [4] [5]

Im Gegensatz dazu gleicht die Flugzeugbranche einer Manufaktur. Jene Flugzeugbranche steht vor der Herausforderung, mithilfe bestehender Methoden tendenziell höhere Stückzahlen zu liefern und effizienter zu produzieren, um dem Kostendruck der Konkurrenz standzuhalten. Gleichzeitig muss dem demographischen Wandel entgegengewirkt und das damit einhergehende alternde Personal ergonomisch entlastet werden. [6]

Eine Besonderheit der Flugzeugbranche stellen im Vergleich zur Automobilindustrie geringe Stückzahlen, lange Produktlebenszyklen und die Vielzahl an manuell durchgeführten Prozessen, die es hinsichtlich Komplexität, Ergonomie und steigender Qualitätsanforderungen zu beherrschen gilt. [7] [8]

Auch wenn ab den 1990er Jahren in den Hochlohnländern ein Trend zur Hochautomatisierung zu beobachten war, konnten in der Praxis nicht alle Aufgaben sinnvoll und

wirtschaftlich umgestellt werden. Neben den Flexibilitätsanforderungen sind umfangreiche Montageprozesse, hohe Umbaukosten für neue Varianten oder Stillstandszeiten Herausforderungen bei hochautomatisierten Stationen. [9]

Die Flugzeugproduktion sieht sich mit zahlreichen technischen Problemstellungen konfrontiert, z. B. großen Produktabmessungen, komplexen Fügeprozessen und der Organisation von Montageaufgaben. Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit sind solche Herausforderungen sowie die Einhaltung geringer Toleranzen und kleiner Losgrößen oft schwierig zu bewältigen. [10] Deshalb sind viele Montageprozesse in der Flugzeugproduktion noch nicht automatisiert und erscheinen aufgrund ihrer Komplexität, der geringen Stückzahlen und großen Investitionen nicht wirtschaftlich automatisierbar.

2019 lieferte AIRBUS ca. 890 Flugzeuge an seine Kunden aus, zudem ist eine steigende Nachfrage zu verzeichnen. Um dies bei gleichzeitig steigender Variantenvielfalt und Komplexität der Flugzeugproduktion zu bewältigen, verfolgt AIRBUS eine zunehmende Automatisierung als Lösungsansatz für mehr Effizienz. [11]

Neben den zuvor genannten Aspekten, die die Flugzeugproduktion im Allgemeinen betreffen, existieren speziell in der Flugzeugstrukturmontage zusätzliche Herausforderungen: Große Bauteildimensionen treffen auf limitierte und oftmals schwer zugängliche Arbeitsräume. Dies stellt zusätzliche Anforderungen an die verwendeten Betriebsmittel sowie die ergonomische Haltung der Werker, da diese oftmals monotone Tätigkeiten über Kopf oder ohne direkten Sichtkontakt durchführen – beispielsweise während der Ausführung von Nietprozessen. Es gilt, die Mitarbeiter hinsichtlich repetitiver und unergonomischer Tätigkeiten zu entlasten [11].

Mit Blick auf die Steuerung von Produktionsanlagen, die Informationsbereitstellung und die Logistik verfolgt AIRBUS außerdem eine radikale Digitalisierungsstrategie. Auch dies dient der Effizienzsteigerung. [11] Mit der stetig sich vollziehenden Transformation, der Umsetzung der vierten industriellen Revolution zur Einführung von cyberphysischen Systemen und neuen wegweisenden Technologien halten die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), Künstliche Intelligenz (KI) und Distributed-Ledger-Technologien vermehrt Einzug in die Industrie. [12] [13]

Die MRK ist eine Schlüsseltechnologie zur fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter. Sie erlaubt eine effiziente Teilautomatisierung von zuvor als unergonomisch eingestuften Prozessen. Die größte Hürde dieser Anwendung ist ihre Integration, da diese eine hohe Komplexität aufweist und hohe Sicherheitsanforderungen voraussetzt. [5] Als teilautomatisierter Ansatz stellt die MRK einen effektiven Weg zur

Montageoptimierung dar. In der Flugzeugproduktion kann eine Optimierung durch einen teilautomatisierten Nietprozess in Kombination mit einem intuitiven Bedienkonzept erreicht werden. [10]

Die Flugzeugproduktion ist bekannt für ihre hohen Sicherheitsstandards und aufwendigen Prüfungen der durchgeführten Montageprozesse. Ein Großteil dieser Prüfungen wird immer noch in manuellen und aufwändigen Arbeitsschritten durchgeführt. Unter Verwendung von Inspektionsdokumenten werden sicherheitskritische Verbindungen in einem separaten Prozess durch Werker mittels einer Sichtprüfung, teilweise auch mittels einer auditiven Klangprüfung oder hinsichtlich ihrer Abmessungen entsprechend der Spezifikation bewertet. Aufgrund der monotonen Tätigkeiten, teilweise schlechten Zugänglichkeiten und somit unergonomischen Körperhaltungen sind menschliche Fehler nicht auszuschließen. Assistenzsysteme können den Menschen bei der Qualitätssicherung entlasten, indem Sensordaten und Künstliche Intelligenz zur Klassifikation der Qualität verwendet werden.

Die von Menschen durchgeführten Tätigkeiten in der Produktion von Flugzeugen werden zur Dokumentation in einem manuellen Schritt signiert oder gestempelt. Im Fehlerfall können Ursache als auch damit in Verbindung stehenden Personen identifiziert werden.

Mit der Einführung der Automation und Digitalisierung besteht ein Bedarf, ebenfalls Maschinen und prozessspezifische Daten aus der Qualitätssicherung in den Signier-/ Stempelprozess der abgeschlossenen Arbeitsschritte einzubinden. Mensch und Maschine können bspw. ein digitales Belegbuch unter Verwendung einer Blockchain-basierten Technologie führen. Dies ermöglicht einen integeren Datenaustausch zwischen Original Equipment Manufacturer (OEM), Zulieferer oder den Behörden über die Unternehmensgrenzen hinaus. [14]

Darüber hinaus soll die Umsetzung der natürlichen und intuitiven Mensch-Technik-Interaktion (MTI) im Bereich der teilautomatisierten Systeme zu einer Verschiebung in der Wahrnehmung der Roboterbediengeräte führen, so dass sie vielmehr als *Partner* des Menschen im Montageprozess und weniger als bloßes *Instrument* betrachtet werden. Aus diesen Gründen ist es notwendig, hochwertige Schnittstellen zu schaffen und Smart Devices als Assistenz- und Interaktionssysteme intuitiv zu integrieren.

Basierend auf einer Planungsmethode sowie einem zugeschnittenen Steuerungs- und Interaktionskonzept entsteht ein rekonfigurierbares und intuitiv zu bedienendes Robotersystem unter Anwendung der MRK für Großbauteile in der Flugzeugstrukturmontage.

KI-Algorithmen unterstützen den Menschen bei der Qualitätssicherung, und eine abschließende Qualitätsdokumentation kann mithilfe von Blockchain-basierten Technologien durchgeführt werden. [14] Durch den Einsatz modernster Technologien wie neuronalen Netzen, Augmented Reality und kollaborativen Robotern können die Anforderungen der Flugzeugbranche abgedeckt werden. Ermöglicht wird dies mittels Modellhologrammen, die den realen Installationszustand überlappen, der Integration weiterer Sensoren sowie Bildklassifikatoren.

1.1 Zielsetzung und These der Arbeit

Ziel dieser Dissertation ist es, aufzuzeigen, mit welchen Subsystemen ein Mensch-Roboter-kollaborationsfähiges System (MRK-fähiges System) Arbeitsplätze in der Montage von Großbauteilen ergonomisch aufwerten sowie die Effizienz und Prozessnachverfolgbarkeit steigern kann. Die Komplexität von Montageprozessen in der Flugzeugproduktion manifestiert sich in technologischen und organisatorischen Herausforderungen wie bspw. großen Produktdimensionen bei geringen Toleranzen, die vom Montagesystem eingehalten werden müssen. Weiterhin sind Arbeitsräume in der Flugzeugsektionsmontage oftmals schwer zugänglich und limitiert. Dies gilt für Nietverbindungen, die zumeist manuell von einem oder zwei Werkern im Team gesetzt werden. Wirtschaftliche und technologische Einflüsse, aber auch die Variantenvielfalt, geringe Stückzahlen sowie prozessspezifische Eigenschaften stellen weitere Anforderungen an das zu entwickelnde System dar. Dazu gehören schnelle und intuitive Einmessmethoden, Rekonfigurierbarkeit, ein modulares Steuerungssystem oder aber auch die natürliche Interaktion zwischen Mensch und Maschine während der Prozessausführung. Algorithmen der Künstlichen Intelligenz können den Menschen bei der Qualitätssicherung unterstützen, indem prozessspezifische Sensordaten zur Bewertung der Qualität verwendet werden. Die anschließende Qualitätsdokumentation kann mithilfe von Blockchain-basierten Technologien unveränderlich und integer durchgeführt werden. Erarbeitete Methoden und Entwicklungen sollen unter Randbedingungen der Flugzeugstrukturmontage validiert werden - der gewählte Lösungsansatz ist abschließend allgemein anwendbar und somit auf unterschiedliche Produkte und Applikationen übertragbar.

Aus der zugrundeliegenden Zielsetzung kann die nachfolgende Forschungsfrage abgeleitet werden:

Mit welchen Subsystemen muss ein Mensch-Roboter-kollaborationsfähiges Robotersystem ausgestattet sein, um einen teilautomatisierten Prozess im hybriden Team unter Randbedingungen der Flugzeugstrukturmontage zu ermöglichen?

Die Forschungsfrage kann in folgende Thesen untergliedert werden:

1. Ein Robotersystem muss mit zusätzlichen Komponenten ausgestattet werden, um einen Nietprozess kollaborativ abzubilden.
2. Die MRK erfordert eine intuitive Mensch-Technik-Interaktion.
3. Algorithmen der Künstlichen Intelligenz sind fähig, die Nietprozessqualität zu bewerten.
4. Blockchain-basierte Technologien können für eine integere Qualitätsdokumentation eingesetzt werden.

Die aufgestellten Thesen forcieren die Umsetzung eines kollaborativen Nietprozesses zwischen Mensch und Roboter, der zuvor manuell in einer unergonomischen Haltung von zwei Werkern ausgeführt wurde. Grundlage für den Aufbau eines teilautomatisierten Nietsystems ist die Integration eines MRK-fähigen Robotersystems, einer Arbeitsraumerweiterung und der entsprechenden Absicherung aller Komponenten.

Die Fähigkeit, auf neue Varianten zu reagieren, neue Technologien zu integrieren oder entwickelte Lösungskonzepte auf weitere Anwendungsszenarien zu übertragen, ergibt sich aus der Implementierung eines modularen Steuerungskonzeptes. Dessen Einsatz erlaubt zudem virtuelle Planungen und Inbetriebnahmen sowie die reale Ansteuerung der Kinematiken.

Die Integration zusätzlicher Messtechnik ermöglicht eine hybride Programmierung der gesamten Station. Des Weiteren erlaubt dies erstmals das Aufzeichnen des Fügeprozesses und damit einen Einblick in den Nietprozess, sodass hinsichtlich der Prozessnachverfolgbarkeit eine Inspektion der Niet basierend auf Sensordaten durchgeführt werden kann. Die gesammelten Daten werden mithilfe von Algorithmen Künstlicher Intelligenz und eines neuronalen Netzes analysiert und bewertet, sodass eine Aussage über die Nietqualität getroffen werden kann. Dies ermöglicht die Erfüllung der hohen Sicherheitsanforderungen der Flugzeugproduktion sowie die Optimierung der manuellen und aufwendigen Prüfung.

Eingebundene Smart Devices und unterschiedlichste Visualisierungsmöglichkeiten erlauben eine natürliche und intuitive Interaktion mit dem Roboter und dem übergeordneten Steuerungssystem. Weiterhin soll das serviceorientierte Steuerungskonzept aufwendige Programmierungen und damit zusammenhängende Stillstandszeiten auf dem produzierenden Shopfloor vermeiden. Durch die Verwendung gänzlich vorprogrammierter Module bzw. Services ist lediglich eine (Re-)Konfiguration vor dem Start der Anwendung notwendig.

Technische Spezifikationen, z. B. die TS200, listen Teile mit sicherheitskritischen Leistungsanforderungen auf, die zum Fügen von Flugzeugteilen verwendet werden. Dazu gehören bestimmte Muttern und Schrauben, Dichtmittel, Gewindeeinsätze, Nieten und weitere Bauteile. Einerseits müssen Zulieferer die Zertifikate in Form von Papierdokumenten oder PDF-Dateien erwerben, um ihre Qualifizierung nachzuweisen. Andererseits müssen die von Mitarbeitern ausgeführten Arbeitsschritte zur Dokumentation signiert oder gestempelt werden. [15] [14] Abhilfe soll eine Blockchain-basierte Technologie schaffen, um die Datenintegrität und das Vertrauen über Unternehmensgrenzen hinweg zu erhöhen und sicherheitskritische Informationen zwischen Zulieferern, Behörden und den OEMs auszutauschen.

Zusammenfassend sind die gesetzten Ziele der Entwicklungen:

1. Das Reduzieren von Fehlern aufgrund manueller Tätigkeiten.
2. Die Verbesserung der Ergonomie für die Werker.
3. Die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch Senkung der Produktionskosten, die durch die Reduzierung der Prozesszeiten und Optimierungen der Montageabläufe erzielt werden.
4. Der papierlose Ansatz der Arbeitsdokumentation.
5. Der Einsatz von Künstlicher Intelligenz zur automatischen Qualitätskontrolle mit der Absicht, den Aufwand für die Qualitätskontrolle zu reduzieren oder zu eliminieren und die Sicherheit zu gewährleisten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation besteht aus sieben Kapiteln. Nach der Einleitung in die Thematik stellt Kapitel 2 den Stand der Technik in der Industrie und Forschung dar und vermittelt relevante Grundlagen und Begriffe aus den Bereichen der Montage und Robotik. Es folgt eine Einführung in die Definitionen der MRK und MTI. Zudem wird grundlegendes Wissen zur implementierten Künstlichen Intelligenz und der Blockchain-Technologie vermittelt. Weiterhin wird das für die Anwendung ausgewählte Szenario beschrieben. Dabei wird im Rahmen der Analyse nacheinander auf das Produkt, den aktuell vorzufindenden Prozess und die verwendeten Betriebsmittel eingegangen.

Basierend auf der Forschungsfrage und den gestellten Thesen wird ein Konzept für die Teilautomatisierung des Prozesses unter Verwendung der Mensch-Roboter-Kollaboration

(MRK) entwickelt. Die nötigen Voraussetzungen ergeben sich aus einer vorgelagerten Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelanalyse.

Die Entwicklungsfortschritte im Forschungsdemonstrator werden entlang eines Vorgehensmodells in Kapitel 3 dokumentiert und stetig in Testphasen abgesichert.

Kapitel 4 beschreibt Methoden und Vorgehensmodelle. Eine intuitive Bedienmethode bildet die Basis für die teilautomatisierte Nietstation. Neben der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter werden angepasste Messstrategien benötigt. Mittels grafischer Oberflächen hat der Werker zu jeder Zeit die volle Kontrolle über die Station und kann diese bedienen oder - im Fall von variantenreichen Produkten - einfach neu konfigurieren, ohne Programmierkenntnisse vorweisen zu müssen. Das Zusammenspiel von allen Komponenten wird durch ein standardisiertes Steuerungssystem und Vorgehen zur Integration von Sensoren und Algorithmen sichergestellt. Letzteres wird um Blockchain-basierte Technologien zur Gewährleistung von Datenintegrität und Vertrauen erweitert.

Kapitel 5 setzt sich mit den einzelnen Konzepten auseinander, die für den Betrieb der teilautomatisierten Nietstation nötig sind. Neben dem zuvor erwähnten Steuerungssystem werden Messstrategien für die Referenzierung des Robotersystems am Bauteil sowie Merkmalserkennung vorgestellt. Zur Sicherung der Prozessfähigkeit und Einhaltung der Toleranzen folgen Konzepte aus dem Toleranzmanagement zur Prozessabsicherung. Der Übergang von einer manuell ausgeführten Tätigkeit zu einem teilautomatisierten Prozess erfordert die Entwicklung von prozessspezifischen Werkzeugen für das Robotersystem. Das entwickelte Werkzeug wird mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet, die das Sammeln von Prozessdaten ermöglichen, sodass diese mithilfe von Künstlicher Intelligenz analysiert und zur Qualitätssicherung eingesetzt werden können. Die Qualitätsdokumentation wird von einem manuellen Signierprozess in ein digitales Belegbuch überführt. Abgerundet wird die konzipierte Anwendung mithilfe von natürlichen und intuitiven Möglichkeiten der MTI.

Die praktische Validierung der Konzepte erfolgt in Kapitel 6 am Beispiel eines Nietprozesses in der Sektionsmontage von Flugzeugen. Die vorgestellten Methoden, Vorgehensmodelle und Konzepte werden im realen Forschungsdemonstrator implementiert und validiert. Abschließend erfolgt mit der Beantwortung der Forschungsfragen und der Reflexion der Arbeit ein Fazit, gefolgt von einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

Die präsentierten Ergebnisse sind in dem Forschungsprojekt "Modularity, Safety, Usability, Efficiency by Human-Robot-Collaboration – FourByThree", das durch Mittel der Europäischen Kommission im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogrammes Horizon 2020 (Nr. 637095) gefördert wurde, entstanden. Darüber hinaus wurde

die Forschung durch das Interreg-Programm V A Großregion im Rahmen des Projekts Robotix-Academy (Nr. 002-4-09-09-001) und das vom BMWi geförderte Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum finanziert. Erarbeitete Grundlagen aus den Bereichen der Mensch-Roboter-Kollaboration, der Mensch-Technik-Interaktion, der Künstlichen Intelligenz und der Blockchain Technologie konnten in Form von Vorlesungen, Workshops und Präsentationen im Forschungsprojekt Robotix-Academy in die Industrie transferiert, aber auch in Veranstaltungen und Umsetzungsprojekten des Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums Saarbrücken eingebunden werden.

1.3 Forschungsdemonstrator

Im Rahmen der Dissertation wurde ein Forschungsdemonstrator aufgebaut, der eine Nachbildung der Sektion 19, dem letzten Abschnitt eines Flugzeuges darstellt. Die Aluminium-Teilschalenelemente sind Originalteile aus der Strukturmontage. Die Druckkalotte wurde mithilfe eines Stahlbaus und Holzplattenelementen, der Ringspant mittels geformten Aluminiums nachgebildet, damit der Arbeitsbereich für das Robotersystem originalgetreu umgesetzt ist. Die Sektion 19 entspricht somit dem Original mit einer Höhe von $4m$ und einem Durchmesser von $3m$. Zusammen mit den begehbaren Racks, die der Zugänglichkeit des Arbeitsbereiches für den Werker dienen, liegt die Gesamtfläche des Demonstrators somit bei ca. $6m$ x $6,5m$. Abbildung 1.1 zeigt den finalen Forschungsdemonstrator, der während der Dissertation entstanden ist. Der Arbeitsraum des MRK-fähigen Robotersystems ist mit einer Hubeinheit erweitert.

Für die Ausführung des kollaborativen Nietprozesses wird der Roboter in der Sektion positioniert. Der Werkzeugarbeitsraum liegt im orange markierten Bereich in Abbildung 1.2 im überlappenden Raum von Druckkalotte und Ringspant der Sektion 19. Damit die Erreichbarkeit aller zu bearbeitenden Nietpunkte garantiert werden kann, wurde eine Arbeitsraumanalyse durchgeführt. Die Anforderungen stammen aus einer Produkt-Prozess-Betriebsmittelanalyse. Basierend auf dieser Analyse gilt es, den gesamten Arbeitsraum mithilfe einer Simulationssoftware zu modellieren (vgl. Abbildung 1.2). Weiterhin erfolgt eine Arbeits- und Werkzeugarbeitsraumanalyse des Roboters. Aus diesen Ergebnissen kann die Dimensionierung der Hubeinheit abgeleitet sowie ein für die Anwendung passendes Robotersystem identifiziert werden.

Die Hubeinheit besitzt einerseits eine Drehachse, um den Roboter entlang des gesamten Kreisrings zu positionieren, andererseits ist die Hubeinheit mit einer translatorischen Achse sowie einem Auslegerarm ausgestattet, die den Roboter im Arbeitsraum vorpositioniert.

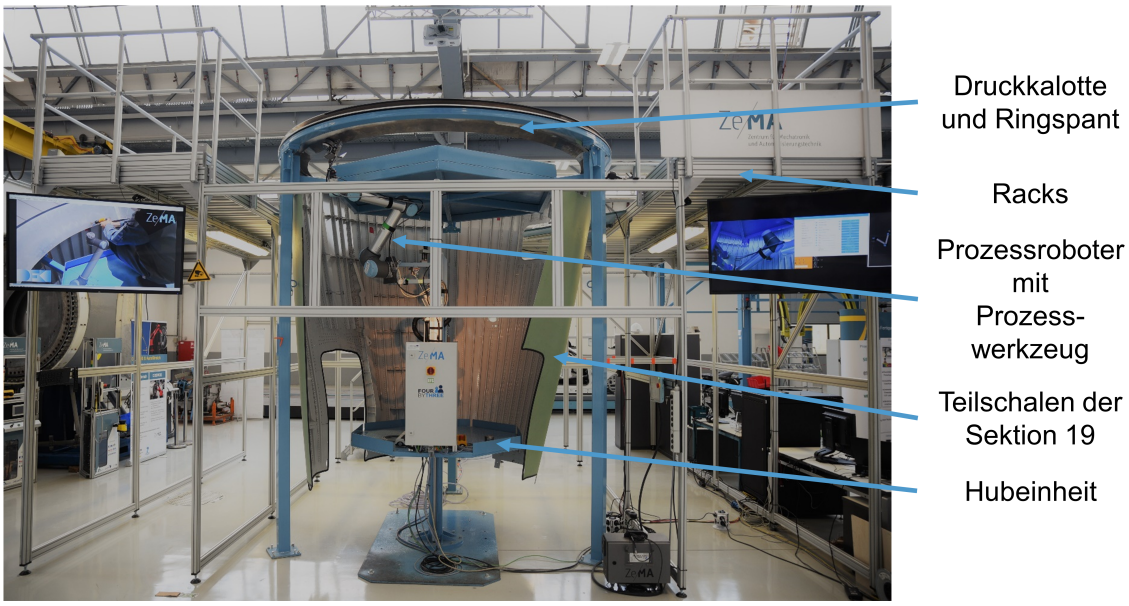


Abbildung 1.1: Die Abbildung zeigt alle Kernkomponenten des Demonstrators zur Validierung des kollaborativen Nietprozesses in der Flugzeugsektionsmontage.

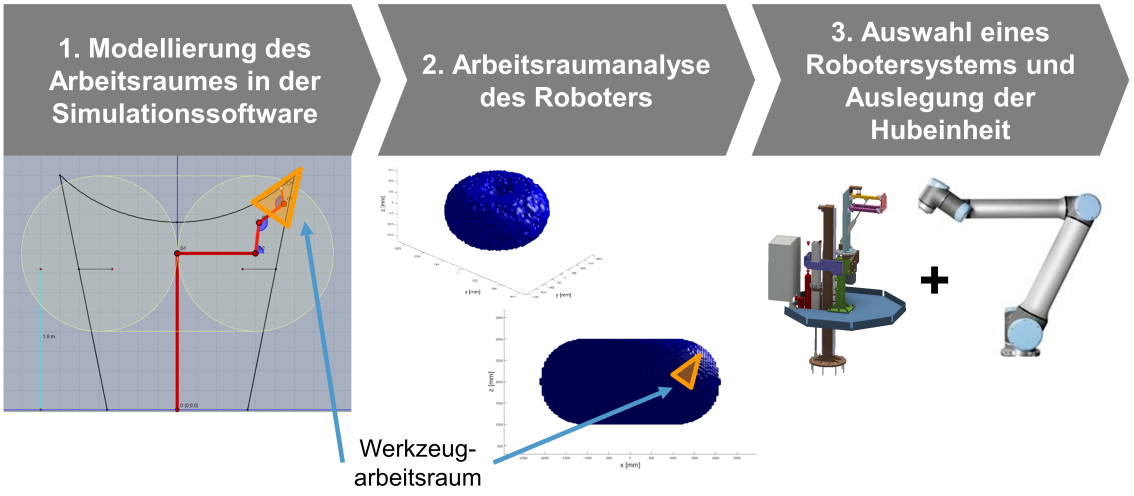


Abbildung 1.2: Arbeitsraumanalyse für den Roboter in der Sektion 19

Das prozessspezifische Werkzeug, hier ein Nietamboss mit integriertem Laserliniensensor, einer Kamera sowie einem Kraft-Momenten-Sensor, wird für den Nietprozess im Arbeitsraum positioniert. Der mit einer Smartwatch und Mixed Reality Brille ausgestattete Werker befindet sich mit der Niet und dem Niethammer auf dem Bauteil. Mittels der service- und broker-basierten Steuerungsarchitektur hat der Werker zu jeder Zeit die Kontrolle über die Station und kann einzelne Module ansteuern.

Kapitel 2

Stand der Technik in Forschung und Industrie

Nachfolgend werden die für das entwickelte teilautomatisierte MRK-Nietsystem relevanten Begriffe und Definitionen erklärt, die für das Verständnis dieser Arbeit wichtig sind. Beginnend mit Definitionen der Montage werden die Grundlagen der Robotik, Besonderheiten der Mensch-Roboter-Kollaboration, der Künstlichen Intelligenz und der Blockchain-Technologie erarbeitet. Im Anschluss wird der Stand der Technik in der Flugzeugproduktion mit einer Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelanalyse dargestellt.

Diese Arbeit entstand am ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH - und am Lehrstuhl für Montagesysteme der Universität des Saarlandes von Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller. Die Begrifflichkeiten sind deshalb aus Definitionen des Lehrstuhls und der Literatur übernommen [16].

2.1 Grundlagen der Montagetechnik

Die Normen, Richtlinien und die Literatur liefern keine eindeutige Definition des Begriffs Montage. Entsprechend VDI 2860 und 2851 wird die Montage als Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern bezeichnet sowie als Zusammenbau von Teilen oder Baugruppen zu einer höheren Erzeugnisebene. [17] [18] [19]

Während der Montage ergibt sich eine Vielzahl an Tätigkeiten, die seitens des Montagesystems abgedeckt werden müssen und daher die Basisprozesse der Montage bilden. In der Praxis kann die Montage entsprechend DIN 2003 in folgende Aufgaben unterteilt werden: das Handhaben, das Fügen, die Inbetriebnahme sowie verschiedene Hilfsprozesse und Sonderoperationen (vgl. Abbildung 2.1). [20]

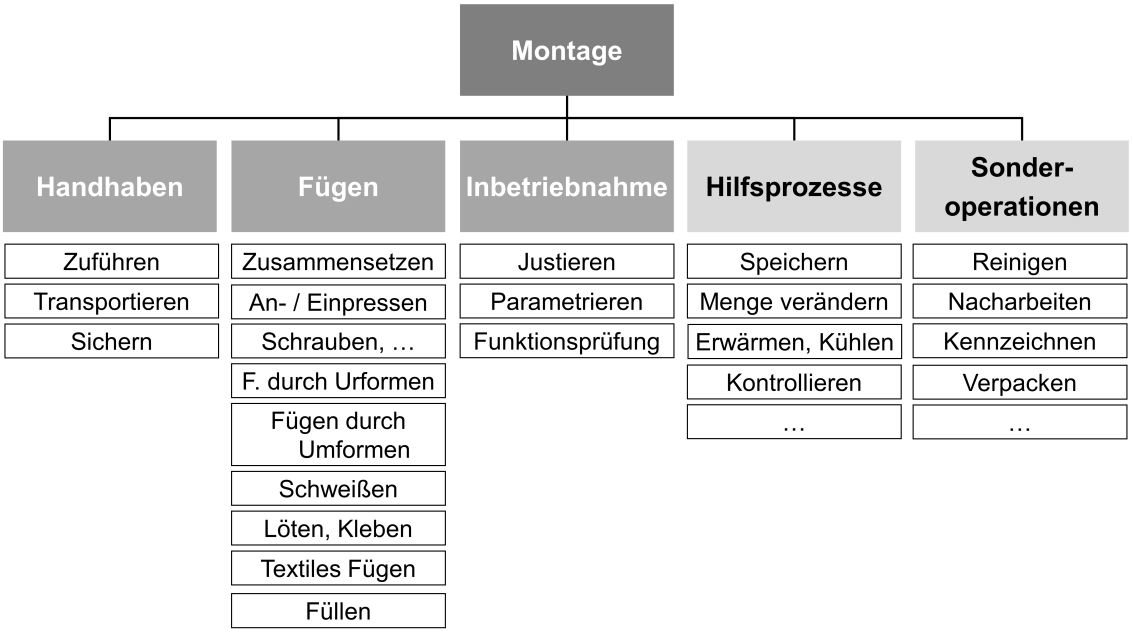


Abbildung 2.1: Aufgaben der Montage [21]

Handhaben Das Handhaben ist eine grundlegende Aufgabe in der Montage und eine Funktion des Materialflusses. Handhaben konzentriert sich auf die Anordnung eines Bauteils und beschreibt das Schaffen, Verändern oder temporäre Aufrechthalten dieser Ordnung. Jedes Bauteil hat sechs Freiheitsgrade, die sich in kartesischen Koordinaten aus der Position (x, y, z) und der Orientierung, den rotatorischen Freiheitsgraden (rx, ry, rz), zusammensetzen. Das Handhaben kann in die Teilaufgaben Zuführen, Transportieren und Sichern untergliedert werden. Während der Teilaufgaben gilt es, einen definierten Ordnungszustand (OZ) und Orientierungsgrad (OG) des Bauteils zu garantieren. Beim Zuführen werden Bauteile aus einem eventuell noch ungeordneten Speicherzustand am Ort der Montageoperation bereitgestellt. Die Montageoperation gibt den Ordnungszustand hinsichtlich Position und Orientierung vor, damit das Bauteil anschließend verbaut werden kann. Das Bewegen der Bauteile oder einer wachsenden Baugruppe zwischen den einzelnen Arbeitsplätzen von Montagestationen wird als Transportieren bezeichnet. Es kommen flurgebundene, flurfreie oder aufgeständerte Transportsysteme zum Einsatz. Der Transport, die Zuführung, aber auch prozessspezifische Fügeoperationen sind oftmals nicht ohne begleitendes oder abschließendes Sichern möglich. Der Sicherungsprozess kann in Halten, Lösen, Spannen und Entspannen untergliedert werden. Sichern mittels Kraft-, Stoff- oder Formschluss dient dem Erhalt einer definierten räumlichen Anordnung und kann temporär während des Handhabens oder dauerhaft im Rahmen einer Fügeoperation zum Einsatz kommen. [17] [21]

Fügen Das Fügen als dauerhaftes Verbinden oder Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Formen gilt nach DIN 8580 als eine der Hautpgruppen der Fertigungsverfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, kann das Fügen unter anderem wie folgt charakterisiert werden: Zusammensetzen, An- oder Einpressen, Fügen durch Ur- oder Umformen oder Stoffverbindungen wie z. B. Schweißen oder Kleben. [20] [22] Ein verbreitetes Fügeverfahren in der Herstellung von Großbauteilen wie z. B. Flugzeugstrukturen sind Klebe- oder Nietprozesse. Letztere sind als Untergruppe des Fügens durch Umformen gelistet.

Fügen durch Umformen Das Fügen durch Umformen erfolgt laut Norm durch Schädigung oder Zerstörung der Fügeteile, bspw. beim Eintreiben einer Niet durch den Formschluss einer z. B. kalt verformten Universalniet. Vollschaftniete sind die am häufigsten verwendeten Niete in der Flugzeugstrukturmontage. Sie bestehen aus einem Nietkopf, einem Schaft und einem verformten Nietkopf. Der Nietkopf, auch Stauchkopf genannt, wird durch das Stauchen des Schaftes mit einem Niethammer kaltverformt. Der Schaft dehnt sich beim Eintreiben leicht aus, sodass der Niet fest in das Bohrloch passt, und führt somit zu einer nicht lösbaren Verbindung. [23] [19]

Inbetriebnahme Inbetriebnahmeprozesse werden in das Justieren, Parametrieren und die Funktionsprüfung untergliedert und beinhalten abschließende Tätigkeiten. Während der Inbetriebnahme wird das zusammengebaute Produkt, wie von den Vorgaben gefordert, in einen betriebsfähigen Zustand versetzt. Besonders für mechatronische Produkte ist das Zusammenspiel von Mechanik, Elektrotechnik und Software und somit der Inbetriebnahmeprozess wichtig. Die Justage dient dem Einstellen von Produktfunktionen und kann in die passive Justage durch z. B. Schablonen oder die aktive Justage basierend auf Messungen unterteilt werden. Sie ist im Gegensatz zur Nacharbeit ein geplanter Prozess. Während der Parametrierung erfolgt die softwareseitige Inbetriebnahme von Steuerungen durch das Einspielen oder Flashen von Konfigurationswerten, die ein definiertes Betriebsverhalten veranlassen. Den Produktspezifikationen entsprechend erfolgt abschließend eine Funktionsprüfung der vorgegebenen Funktionen zur Qualitätssicherung. Je nach Produktkomplexität werden Prüfungen von Teilfunktionen oder komplette Überprüfungen automatisiert abgebildet. [21]

Hilfsprozesse Zusätzliche Montageprozesse sind bspw. das Speichern bzw. Verändern einer Menge oder Kontroll- bzw. Prüfprozesse, die unter den Hilfsprozessen zusammengefasst werden. Diese sind während der Montage notwendig, erzielen jedoch keinen direkten Montagefortschritt. [21]

Prüfen Ein wichtiger Hilfsprozess ist das Prüfen bzw. Inspizieren von Produktmerkmalen oder Zuständen zur qualitativen oder quantitativen Ermittlung einer Eigenschaft. Dabei gilt es, Informationen mittels Sensorik aufzuzeichnen, die Eigenschaften mit spezifischen Fertigungstoleranzen zu vergleichen und abschließend die Montagequalität zu bewerten. Kontrollprozesse, z. B. die Prüfung einer Anwesenheit, Position oder Orientierung, treten in vielen Montageschritten auf. Die Sicherung der Montagequalität mittels einer Inspektion unterscheidet sich von klassichen Prüfaufgaben und wird daher oftmals in einem separaten und nachgelagerten Prozessschritt abgebildet. [17] [21]

Sonderoperationen Neben den Hilfsprozessen bilden die im Vergleich wertsteigernden Sonderoperationen die letzte Kategorie der Montageaufgaben. Sonderoperationen wie das Reinigen, Verpacken oder Nachbearbeiten von bzw. an Produkten sind zwar nicht den Grundfunktionen des Handhabens, Fügens oder der Inbetriebnahme zugeordnet, aber sie sind dennoch wichtige Komponenten in der Montage. Diese Operationen sollten trotz ihrer Wertsteigerung minimal gehalten werden. [21]

Flexibilität Um auf kurzfristig auftretende Produktionsprobleme aufgrund von bspw. Maschinenstörungen, Personalausfall, Lieferproblemen, Kostenschwankungen oder Qualitätsproblemen reagieren zu können, wird eine grundlegende und notwendige Flexibilitätsanforderung an die Produktionssysteme gestellt [24]. Anforderung an das Produktionssystem ist somit die Fähigkeit, sich auf geänderte Einflussfaktoren auch mit geringem finanziellen Aufwand anzupassen. Des Weiteren kann Flexibilität durch Standardisierung von einzelnen Modulen und Funktionsblöcken zur Abdeckung von Produktvarianten erreicht werden. [25] [26]

Wandlungsfähigkeit Reinhart und Zäh betrachten die Wandlungsfähigkeit als Potenzial, Produktionssysteme schnell und mit geringen Kosten auch an nicht geplante Veränderungen bezüglich Technik und Organisation anzupassen [26]. Somit ist eine grundlegende Eigenschaft von wandlungsfähigen Systemen, keine expliziten Grenzen zu besitzen sowie ungerichtete und lösungsneutrale Ansätze abzubilden. [27] [26] Wandlungsbefähiger von Produktionsystemen sind nach Nyhuis Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität [25].

Rekonfigurierbarkeit Rekonfigurierbare Produktionssysteme besitzen die Fähigkeit, anpassungsfähig zu sein. Anpassungen dieser Systeme erfolgen z. B. durch das manuelle oder automatisierte Umrüsten von Betriebsmitteln, wie bspw. einzelnen hardware- oder softwareseitigen Funktionselementen [28]. Plug-and-Play-Module erlauben somit

aufgrund ihrer Schnittstellenkompatibilität die Funktionserweiterung und dadurch die Durchführung unterschiedlicher Produktionsvorgänge. [25]

Modularität Ein Produktionssystem, das mit standardisierten Elementen ausgestattet ist, die aufgrund ihrer Schnittstellen einfach austauschbar sind, besitzt die Fähigkeit der Modularität. Bezüglich eines Robotersystems kann dies bspw. das Ersetzten eines Roboterarms sein, um neue Reichweitenanforderungen abzudecken. Seitens der Softwareentwicklung gilt der Ansatz der objektorientierten Programmierung hinsichtlich der Modularisierung. [25]

2.2 Grundlagen der Robotik

Als universell einsetzbare Handhabungsgeräte sind Robotersysteme ein wesentlicher Bestandteil der industriellen Produktion. Robotersysteme können frei programmiert werden und ausgestattet mit Werkzeugen oder Greifern automatisiert Aufgaben durchführen. [17] Im Rahmen der Automatisierungstechnik sind die Manipulatoren ortsfest oder beweglich angeordnet. [31] Sind zusätzlich interne bzw. externe Sensoren zum Aufnehmen von physikalischen Größen vorhanden, kann das System in seiner Gesamtheit als mechatronisches System bezeichnet werden. [32] Anwendung finden Industrieroboter heutzutage in den unterschiedlichsten Bereichen wie bspw. bei der Handhabung von Objekten (Pick-and-Place-Aufgaben) oder der Montage von Produkten (Schweiß-, Klebe- und Lackier-Aufgaben). Robotersysteme setzen sich aus einem mechanischen Manipulator, einem Endeffektor, einer Robotersteuerung sowie Sensorik und Aktorik zusammen. Die mechanische Struktur, beginnend mit einer Roboterbasis, wird mittels Verbindungsgliedern und Gelenkmodulen aufgebaut. Je nach Konfiguration der Gelenkstruktur werden Schub- oder Drehgelenke verbaut, die in Abhängigkeit von der Dimensionierung der Gliedlänge, der Anzahl der Gelenke und der Freiheitsgrade die Ausbildung des Arbeitsraums beeinflussen. Charakteristische Systemeigenschaften von Robotern sind demzufolge die Anzahl der Freiheitsgrade, die Reichweite sowie die Traglast. [31]

Kinematische Strukturen von Robotersystemen Roboterstrukturen werden anhand des Aufbaus ihrer kinematischen Kette unterschieden. Parallelroboter besitzen kinematische Strukturen, die auf geschlossenen Ketten basieren. Im Gegensatz dazu weisen Roboter mit einer seriellen Struktur eine offene kinematische Kette auf. Eine Kombination beider Strukturen wird als hybride kinematische Struktur bezeichnet. Parallelkinematiken werden nachfolgend nicht näher betrachtet, da diese aufgrund ihres Aufbaus nicht für das ausgewählte Szenario infrage kommen.

Der Arbeitsraum eines Roboters mit einer seriellen kinematischen Struktur kann in einen Haupt- und Nebenarbeitsraum untergliedert werden. Differenziert wird hier anhand der einzelnen Achsen des Roboters. Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, werden die ersten drei Achsen (A, B, C), beginnend bei der Roboterbasis, als Hauptachsen definiert und dienen der Positionierung des Endeffektors im Raum. Die drei Nebenachsen (C, D, E), auch als Handgelenk des Roboters bezeichnet, dienen der Orientierungseinstellung des Endeffektors. [33] Die Stellungen der Haupt- und Nebenachsen werden als Pose bezeichnet und mithilfe von Positionsangaben und Orientierungswinkeln beschrieben.

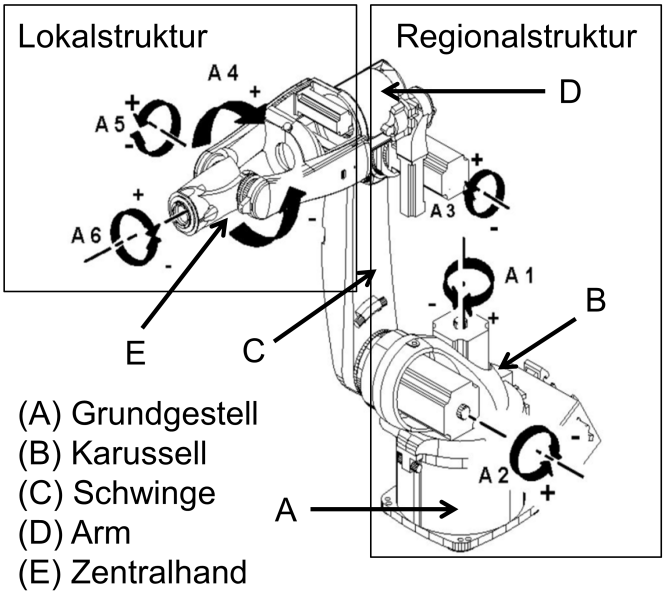


Abbildung 2.2: Haupt- und Nebenachsen eines seriellen Knickarmroboters [34]

Wie zuvor erwähnt ist der Arbeitsraum des Roboters abhängig von der kinematischen Struktur. Letztere ist wiederum abhängig von den Dimensionen der Verbindungselemente sowie von den Gelenkarten selbst. Die Kombination verschiedener Gelenke, bspw. translatorischer Schubgelenke (T) mit rotatorischen Drehgelenken (R), führt zur Ausbildung unterschiedlicher Roboterstrukturen und zu damit einhergehenden unterschiedlichen Arbeitsräumen. Typische Strukturen und Arbeitsräume industrieller Roboter, vgl. Abbildung 2.3, bestehen aus linearen, rotatorischen oder hybriden Antriebsstrukturen. [31]

Die lokale Struktur des Roboters, auch als Handgelenk bezeichnet, kann in Winkel- und Zentralhand untergliedert werden. Die unterschiedlichen Bauformen der Handgelenke sind durch die Markteinführung der Leichtbauroboter im Rahmen der Mensch-Roboter-Kooperation populärer geworden. Wie in Abbildung 2.4 erkennbar ist, werden die Kräfte und Momente der Antriebe bei der Zentralhand mittels Übertragungsgetrieben in das Handgelenk des Roboters überführt. Der Einsatz von Servomotoren und kompakten

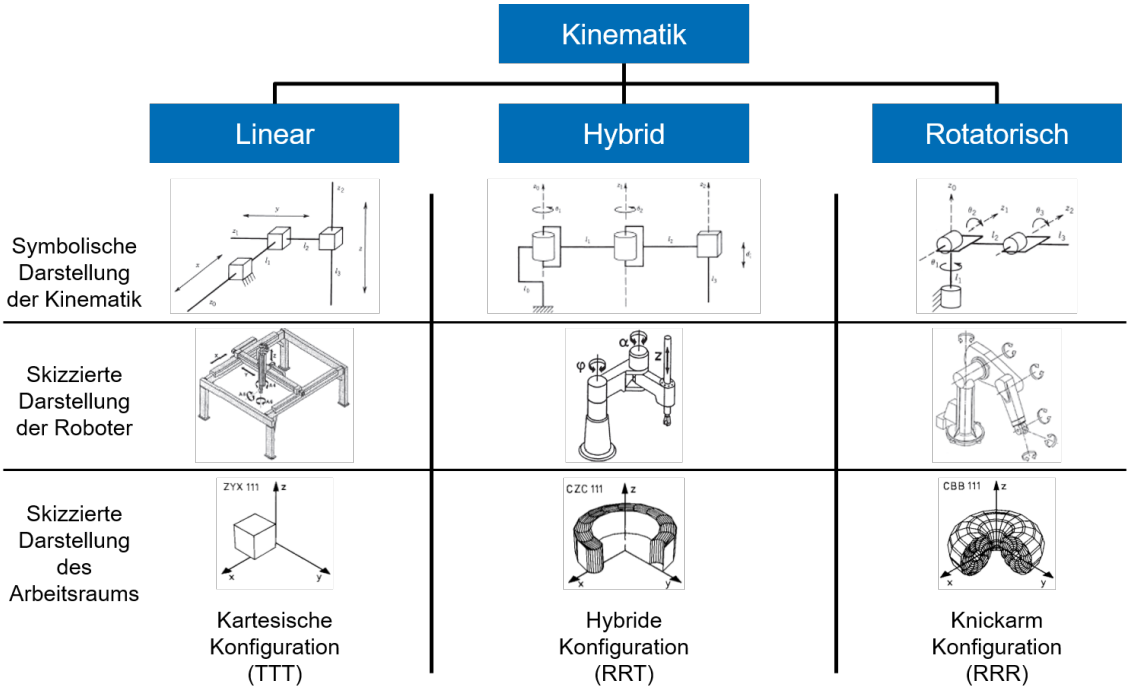


Abbildung 2.3: Bauarten und Arbeitsräume von Industrierobotern in Anlehnung an [29] [30]

Getrieben erlaubt die Konstruktion einer Winkelhand, wie sie z. B. oftmals in Leichtbaurobotern zum Einsatz kommt. [35]

Bei der Zentralhand schneiden sich drei orthogonale Achsen im Wurzelpunkt des Handgelenkes. Dies ermöglicht eine einfachere Koordinatentransformation und gleichzeitig eine geschlossene kinematische Lösung. Die Winkelhand besitzt im Gegensatz dazu keine sich kreuzenden Achsen, sodass hier keine geschlossene kinematische Lösung möglich ist. Ein Manipulator mit einer Winkelhand erfordert daher eine iterative kinematische Lösung.

Beschreibungsmöglichkeiten einer Roboterstellung Zur Beschreibung der mathematischen Grundlagen von Robotersystemen wird nachfolgend auf die Modellierung der kinematischen Kette von Robotern sowie die Darstellung einer Roboterpose im Raum mittels der Roll-Pitch-Yaw-Notation (bzw. der Winkel α, β, und γ) eingegangen.

Im kartesischen Koordinatensystem hat ein frei beweglicher Körper sechs Freiheitsgrade, die dessen Position und Orientierung mittels drei translatorischer Verschiebungen, X, Y und Z, sowie drei rotatorischer Bewegungsmöglichkeiten, A, B, C, beschreiben. Unterschieden wird zwischen dem Bezugskoordinatensystem und einem körpereigenem Koordinatensystem. [38]

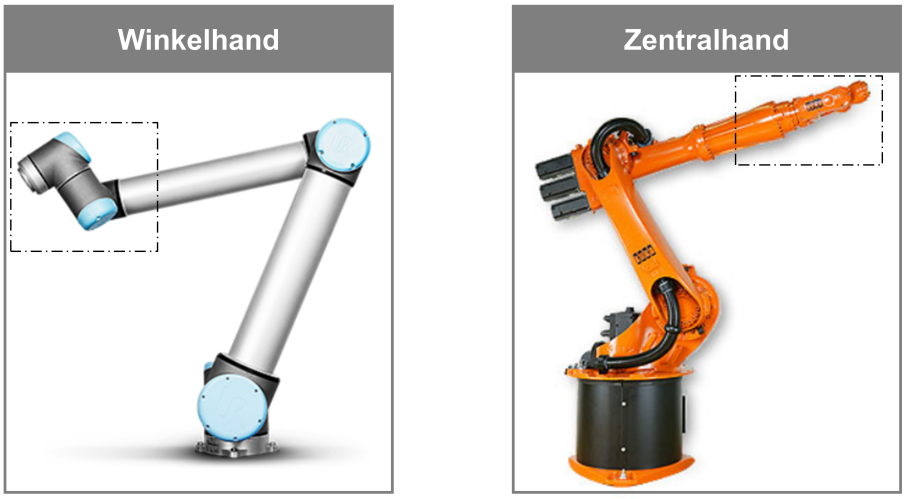


Abbildung 2.4: Bauarten von Roboterhandgelenken - Winkelhand (links) und Zentralhand (rechts) [36] [37] [34]

Im kartesischen Koordinatensystem beschreiben Ortsvektoren die Position eines Punktes relativ zum Ursprung des Bezugskoordinatensystems. Ortsvektoren beginnen im Ursprung eines ortsfesten Koordinatensystems und enden im körpereigenen Koordinatensystem, vgl. dazu Gleichung 2.1 und 2.2 sowie Abbildung 2.5. [39] [40] Der Ortsvektor bzw. Koordinatenursprungsvektor zwischen dem Koordinatensystem O_i und dem körpereigenen Koordinatensystem O_j wird entsprechend Gleichung 2.3 durch kartesische Koordinaten in Abbildung 2.5 beschrieben.

$$ {}^{j}\underline{r}_p = ({}^{j}x_p\ {}^{j}y_p\ {}^{j}z_p)^T \tag{2.1} $$

$$ {}^{i}\underline{r}_p = ({}^{i}x_p\ {}^{i}y_p\ {}^{i}z_p)^T \tag{2.2} $$

$$ {}^{i}\underline{r}_{O_j,O_i} = ({}^{i}x_{O_j,O_i}\ {}^{i}y_{O_j,O_i}\ {}^{i}z_{O_j,O_i})^T \tag{2.3} $$

Eine Orientierung wird mithilfe einer Drehmatrix ${}^{i}\mathbf{D}_j$ beschrieben. Diese überführt einen zuvor definierten Vektor in ein Bezugskoordinatensystem. Gleichung 2.4 zeigt eine Drehmatrix, die einen Vektor vom j-Koordinatensystem in das i-Koordinatensystem transformiert. [41]

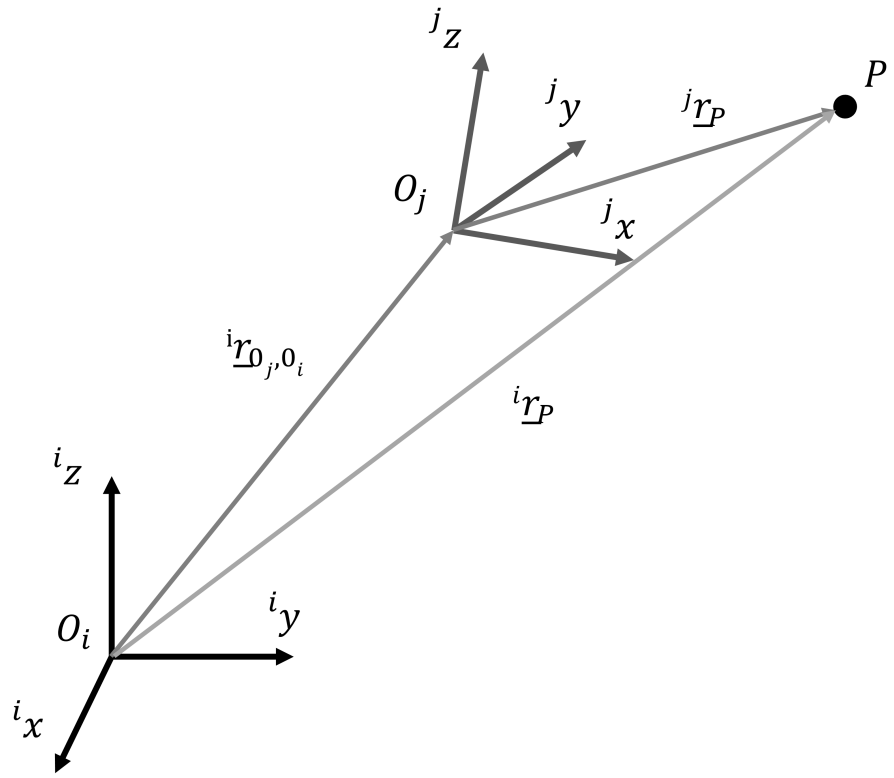


Abbildung 2.5: Beschreibung eines Körpers/Punktes im Raum durch einen Vektor [36]

$$^{i}\mathbf{D}_j = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

Für die Beschreibung einer Pose des Roboters werden die Position und Orientierung in einer Transformationsmatrix zusammengeführt. Dazu wird der Ortsvektor, der die Translation beschreibt, und die Drehmatrix, die die Orientierung beschreibt, in einer homogenen Matrix $^{i}\mathbf{T}_j$ vereint (vgl. Gleichung 2.5). [40]

Die Drehmatrix gestaltet sich als 3x3-Matrix, der Translationsvektor dagegen als 3x1-Spaltenvektor. Die daraus entstehende Matrix ist zunächst nicht quadratisch und hat keine Inverse. Dies kann durch das Hinzufügen einer vierten Zeile behoben werden, damit eine 4x4-Matrix bzw. eine homogenisierte Transformationsmatrix entsteht. Wie in Gleichung 2.5 dargestellt, erhalten die ersten drei Spaltenvektoren den Wert 0 und der vierte den Wert 1. [42]

Die Transformationsmatrix, die das Koordinatensystem O_j in den Koordinaten von O_i in Abbildung 2.5 beschreibt, lautet entsprechend Gleichung 2.5:

$$ {}^{i}\mathbf{T}_j = \begin{pmatrix} {}^{i}\mathbf{D}_j & {}^{i}\underline{r}_{O_j,O_i} \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \tag{2.5} $$

Die inverse Transformationsmatrix ${}^{j}\mathbf{T}_i$, die das Koordinatensystem O_i in den Koordinaten von O_j ausdrückt, kann entsprechend Gleichung 2.6 und 2.7 aufgestellt werden.

$$ {}^{j}\mathbf{T}_i = \begin{pmatrix} ({}^{i}\mathbf{D}_j)^T & -({}^{i}\mathbf{D}_j)^T \, {}^{i}\underline{r}_{O_j,O_i} \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \tag{2.6} $$

$$ {}^{j}\mathbf{T}_i = ({}^{i}\mathbf{T}_j)^{-1} = \begin{pmatrix} {}^{j}\mathbf{D}_i & {}^{j}\underline{r}_{O_i,O_j} \\ \underline{0}^T & 1 \end{pmatrix} \tag{2.7} $$

Unter Verwendung der Transformationsmatrix 2.5 wird, wie in Gleichung 2.8 aufgezeigt, ein Vektor vom Koordinatensystem j in das Koordinatensystem i überführt.

$$ {}^{i}\underline{r}_p = {}^{i}\mathbf{T}_j \cdot {}^{j}\underline{r}_p \tag{2.8} $$

Die homogenen Koordinatentransformationen zwischen den Koordinatensystemen $\mathbf{O}_i$, $\mathbf{O}_j$ und $\mathbf{O}_k$ bzw. ${}^{i}\mathbf{T}_k = {}^{i}\mathbf{T}_j \cdot {}^{j}\mathbf{T}_k$ können graphisch entsprechend Abbildung 2.6 dargestellt werden.

In der Literatur und Praxis existieren mehrere Beschreibungsnotationen für die Orientierung, bspw. verschiedene Formen der Euler-Winkel, Quaternionen oder die Roll-Pitch-Yaw-Notation. [40] Das implementierte Robotersystem verwendet die Roll-Pitch-Yaw-Notation, kurz RPY-Notation, weshalb diese nachfolgend beschrieben wird. Der Begriff *Roll-Pitch-Yaw* heißt zu Deutsch Roll-Gier-Nick, kommt aus der Schifffahrt und findet ebenfalls Verwendung in der Luftfahrt, vgl. Abbildung 2.7. [42]

Bei der RPY-Notation sind die drei aufeinanderfolgenden Drehungen $ZY'X''$ um die Achsen eines jeweiligen Hilfskoordinatensystems eine Besonderheit, bei der die Reihenfolge eingehalten werden muss. [36]

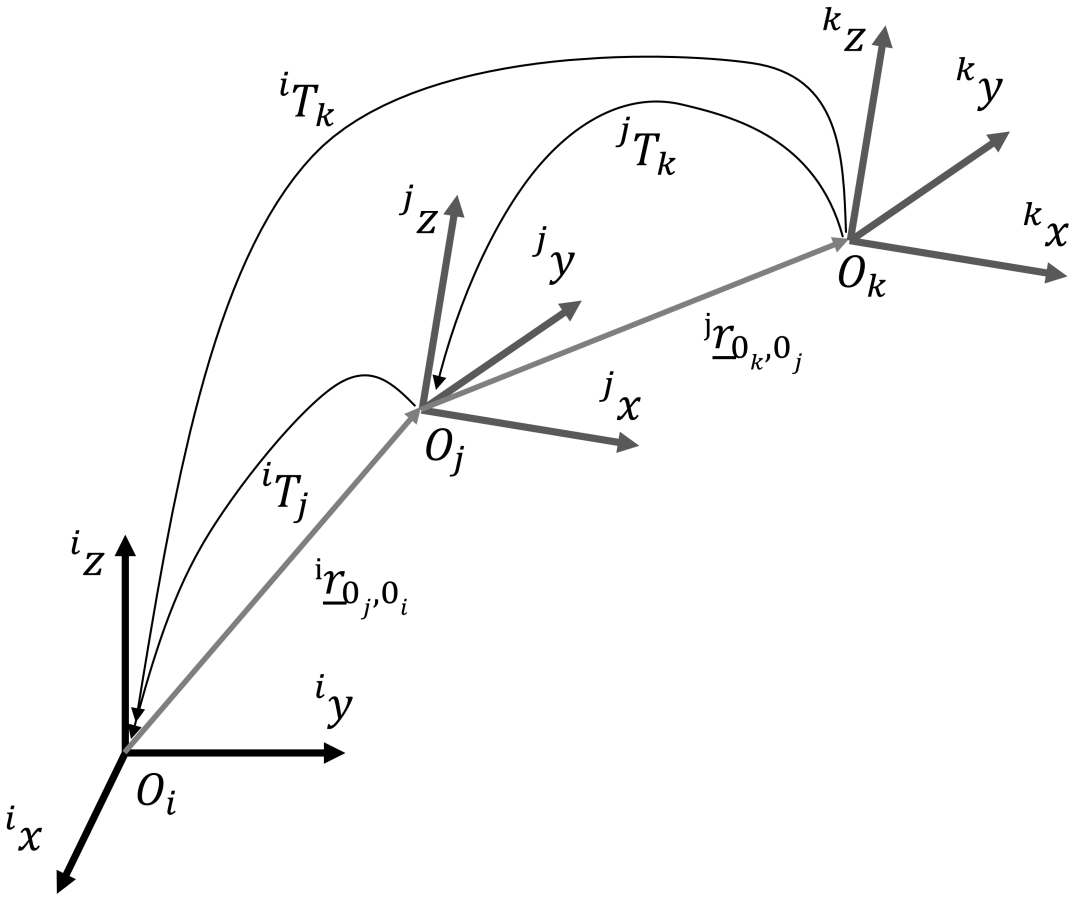


Abbildung 2.6: Koordinatentransformationen zwischen den Koordinatensystemen, $\mathbf{O}_i$, $\mathbf{O}_j$ und $\mathbf{O}_k$

1. Drehung (Rollwinkel) um die z-Achse mit dem Winkel α
2. Drehung (Gierwinkel) um die y-Achse mit dem Winkel β
3. Drehung (Nickwinkel) um die x-Achse mit dem Winkel γ

Als Rotations- bzw. Drehmatrizen (vgl. Gleichungen 2.9 und 2.10) werden die Winkel in Gleichung 2.11 beschrieben. [42]

$$\mathbf{D}(\alpha, \beta, \gamma) = \mathbf{D}(z, \alpha) \cdot \mathbf{D}(y', \beta) \cdot \mathbf{D}(x'', \gamma) \tag{2.9}$$

$$\mathbf{D}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} cos\,\alpha & -sin\,\alpha & 0 \\ sin\,\alpha & cos\,\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\,\beta & 0 & sin\,\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\,\beta & 0 & cos\,\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\,\gamma & -sin\,\gamma \\ 0 & sin\,\gamma & cos\,\gamma \end{pmatrix} \tag{2.10}$$

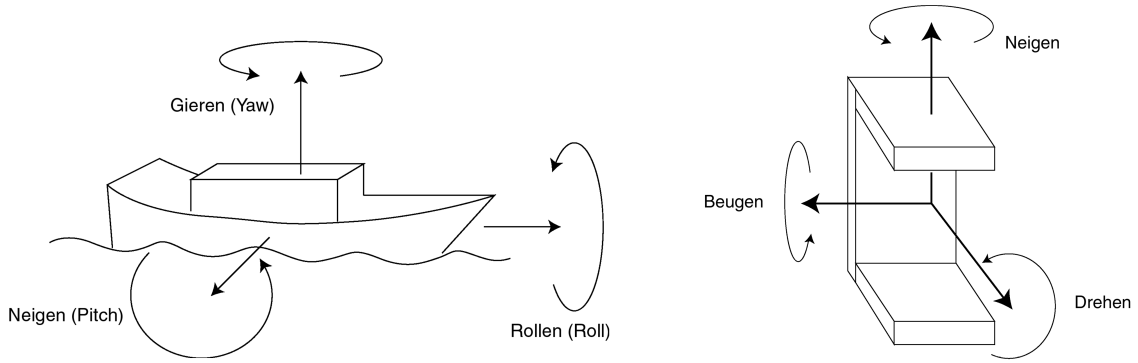


Abbildung 2.7: Roll-Pitch-Yaw-Notation eines körperfesten Koordinatensystems in der Schifffahrt (links) und an einer Roboterhand (rechts) [39]

$$\mathbf{D}(\alpha,\beta,\gamma) = \begin{pmatrix} cos\,\alpha\,cos\,\beta & cos\,\alpha\,sin\,\beta\,sin\,\gamma - sin\,\alpha\,cos\,\gamma & cos\,\alpha\,sin\,\beta\,cos\,\gamma + sin\,\alpha\,sin\,\gamma \\ sin\,\alpha\,cos\,\beta & sin\,\alpha\,sin\,\beta\,sin\,\gamma + cos\,\alpha\,cos\,\gamma & sin\,\alpha\,sin\,\beta\,cos\,\gamma - cos\,\alpha\,sin\,\gamma \\ -sin\,\beta & cos\,\beta\,sin\,\gamma & cos\,\beta\,cos\,\gamma \end{pmatrix} \tag{2.11}$$

Modellierung einer kinematischen Kette mit der DH-Notation Bei der Modellierung einer kinematischen Kette unter Verwendung der Denavit-Hartenberg-Notation (DH-Notation) werden die Beziehungen zwischen den Robotergliedern mittels vier Parameter beschrieben. Die reduzierte Anzahl der vier DH-Paramter ist auf eine festgelegte Vorgehensweise in der Definition von Koordinatensystemen und Gelenken von Denavit und Hartenberg zurückzuführen. [43] [42]

Das Vorgehen bei der Modellierung nach der DH-Notation gestaltet sich wie folgt [41] [35] [42]:

1. Durchnummerierung aller Glieder: Beginnend bei der Basis wird dieser die Nummer *0* zugewiesen. Der Endeffektor bildet das letzte Glied in der seriellen Kette und erhält den Wert n.

2. Durchnummerierung aller Gelenke: Im zweiten Schritt werden alle Gelenke nummeriert. Beginnend bei der Basis mit dem Wert *1* bis zum letzten Gelenk mit dem Wert n.

3. Identifizieren der Drehrichtung der Gelenke: Entsprechend der *rechten Hand-Regel* ergibt sich bei rotatorischen Gelenken die Drehrichtung und gleichzeitig die positive Richtung der z-Achse. Für prismatische Achsen wird die z-Achse in die translatorische Bewegungsrichtung gelegt.

4. Definition eines gliedfesten Koordinatensystems: Nachfolgend wird jedes Glied, inklusive der Basis, mit einem Koordinatensystem belegt.

5. Koordinatentransformation beschreiben: Abschließend wird die Koordinatentransformation beschrieben.

Die vier DH-Parameter lassen sich unter Bezug auf Abbildung 2.8 wie folgt definieren [42] [40] [36]:

- $\delta_{j,i}$: Drehwinkel um die Gelenkachse ${}^{i}z$, bis ${}^{i}x$ die gleiche Ausrichtung mit der ${}^{j}x$-Achse hat.
- $d_{j,i}$: Die Translation entlang der ${}^{i}z$-Achse zwischen ${}^{i}x$ und ${}^{j}x$ wird durch den Parameter $d_{j,i}$ vorzeichenbehaftet beschrieben. Die Schubstrecke $d_{j,i}$ wird auch als Achslänge bezeichnet.
- $l_{j,i}$: Der Kreuzungsabstand $l_{j,i}$ beschreibt den kürzesten Abstand zwischen der ${}^{i}z$- und der ${}^{j}z$-Achse. Dieser wird entlang der gemeinsamen Normale in Richtung der ${}^{j}x$-Achse vorzeichenbehaftet gemessen.
- $\gamma_{j,i}$: Der Kreuzungswinkel $\gamma_{j,i}$ beschreibt den Winkel um ${}^{j}x$ zwischen der ${}^{i}z$- und der ${}^{j}z$-Achse.

Die identifizierten DH-Paramter können in Tabellenform zusammengetragen und anschließend in Form einer Transformation ausgedrückt werden. Abbildung 2.9 zeigt bspw. die DH-Parameter eines 6-Achs-Roboters in der Home Position.

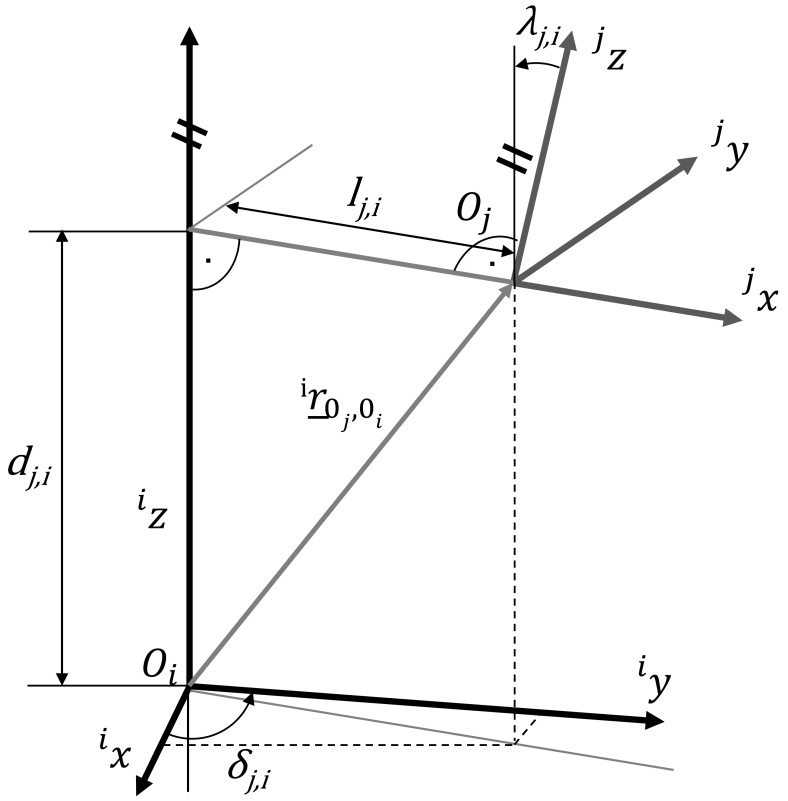
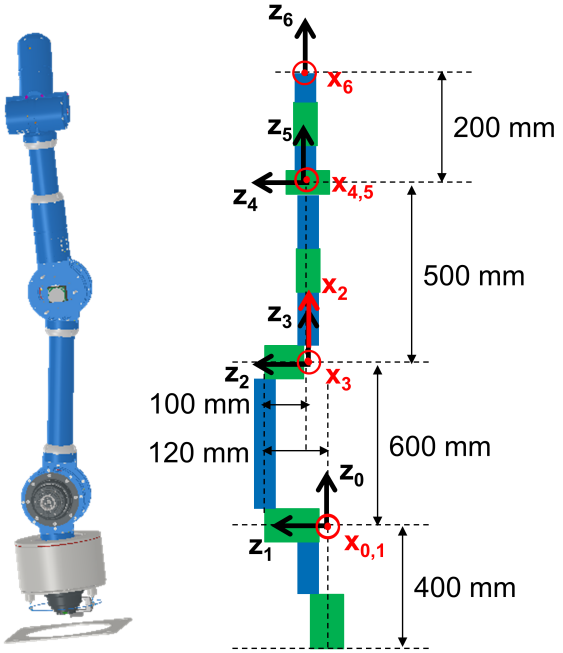


Abbildung 2.8: Transformationen nach Denavit Hartenberg in Anlehnung an [36]



i	θ_i [°]	d_i [mm]	l_i [mm]	α_i [°]
1	$0+\theta_1$	0	0	90
2	$90+\theta_2$	20	600	0
3	$-90+\theta_3$	0	0	-90
4	$0+\theta_4$	500	0	90
5	$0+\theta_5$	0	0	-90
6	$0+\theta_6$	200	0	0

Für die Home Position gilt:
$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 0°$

Abbildung 2.9: Transformationen nach Denavit Hartenberg für ein Robotersystem mit sechs Freiheitsgraden in der Home Position.

Nachfolgend ist in Gleichung 2.12 die Drehung um die ${}^{i}z$-Achse mit dem Drehwinkel $\delta_{j,i}$ dargestellt. Gleichung 2.13 beschreibt die translatorische Verschiebung in ${}^{i}z$-Achsenrichtung um den Parameter $d_{j,i}$. Die Verschiebung um den Kreuzungsabstand $l_{j,i}$ in ${}^{j}x$-Achsenrichtung ist in Gleichung 2.14 dargestellt. Abschließend erfolgt in Gleichung 2.15 die Drehung um die ${}^{j}x$-Achse mit dem Kreuzungswinkel $\gamma_{j,i}$. [36] [42]

$$\mathbf{D}({}^{i}z, \delta_{j,i}) = \begin{pmatrix} cos\,\delta_{j,i} & -sin\,\delta_{j,i} & 0 & 0 \\ sin\,\delta_{j,i} & cos\,\delta_{j,i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.12}$$

$$\mathbf{S}({}^{i}z, d_{j,i}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{j,i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.13}$$

$$\mathbf{S}({}^{j}x, l_{j,i}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{j,i} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.14}$$

$$\mathbf{D}({}^{j}x, \gamma_{j,i}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos\,\gamma_{j,i} & -sin\,\gamma_{j,i} & 0 \\ 0 & sin\,\gamma_{j,i} & cos\,\gamma_{j,i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.15}$$

Die gesamte Struktur als homogene Matrix ${}^{i}\mathbf{T}_{j}$ kann in Gleichung 2.16 dargestellt und als sogenannte Denavit-Hartenberg-Matrix in Gleichung 2.17 zusammengefasst werden. [36] [42]

$${}^{i}\mathbf{T}_{j} = \mathbf{D}({}^{i}z, \delta_{j,i})\mathbf{S}({}^{i}z, d_{j,i})\mathbf{S}({}^{j}x, l_{j,i})\mathbf{D}({}^{j}x, \gamma_{j,i}) \tag{2.16}$$

$$
{}^{i}\mathbf{T}_{j} = \begin{pmatrix} cos\,\delta_{j,i} & -sin\,\delta_{j,i}\,cos\,\gamma_{j,i} & sin\,\delta_{j,i}\,sin\,\gamma_{j,i} & l_{j,i}\,cos\,\delta_{j,i} \\ sin\,\delta_{j,i} & cos\,\delta_{j,i}\,cos\gamma_{j,i} & -cos\,\delta_{j,i}\,sin\gamma_{j,i} & l_{j,i}\,sin\delta_{j,i} \\ 0 & sin\,\gamma_{j,i} & cos\,\gamma_{j,i} & d_{j,i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.17}
$$

Werden abschließend alle Transformationen von der Roboterbasis bis zum Roboterendeffektor multipliziert, wird die Gesamttransformation ${}^{0}\mathbf{T}_{6}$ in Gleichung 2.18 aufgestellt. [36] [35]

$$
{}^{0}\mathbf{T}_{6} = {}^{0}\mathbf{T}_{1} \cdot {}^{1}\mathbf{T}_{2} \cdot {}^{2}\mathbf{T}_{3} \cdot {}^{3}\mathbf{T}_{4} \cdot {}^{4}\mathbf{T}_{5} \cdot {}^{5}\mathbf{T}_{6} \tag{2.18}
$$

Damit Robotersysteme Aufgaben wie das Handhaben, Greifen, Ablegen oder Positionieren durchführen können, werden dem System Bahnen und Punkte im Weltkoordinatensystem vorgegeben. Ist die Roboterpose als Position und Orientierung des Tool Center Points (TCP) beschrieben, werden mithilfe der Rückwärtstransformation, auch inverse Kinematik genannt, die Gelenkkoordinaten berechnet. Liegt die aktuelle Position und Orientierung des Endeffektors nicht vor, wird diese durch das Messen der Gelenkkoordinaten unter Anwendung der Vorwärtstransformation bestimmt. (Vgl. dazu Abbildung 2.10.) [40] Für weiterführende Literatur wird an dieser Stelle auf Weber [40], Weck [44] und Müller [36] verwiesen.

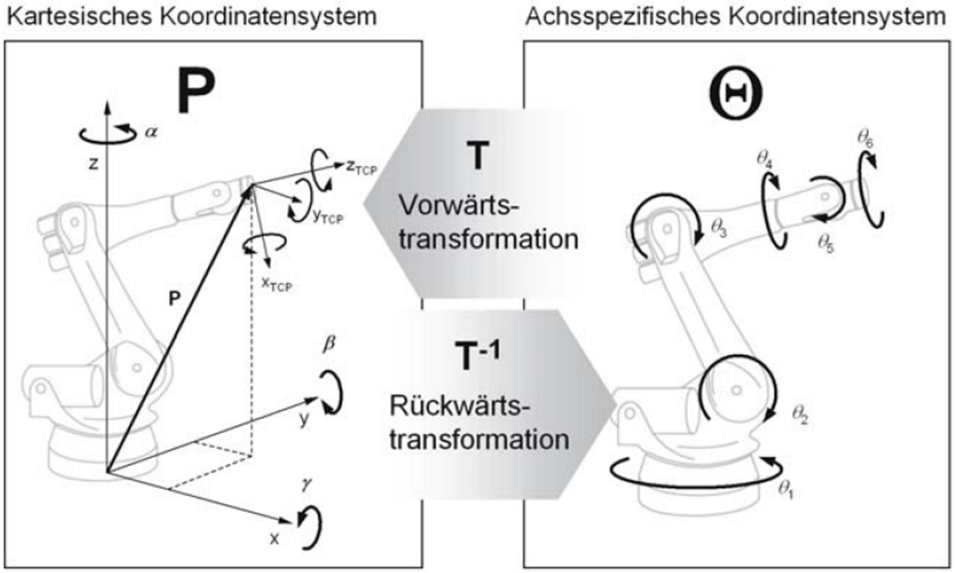


Abbildung 2.10: Vorwärts- und Rückwärtstransformation zwischen Kartesischen und Achsspezifischen Koordinatensystemen [44]

Roboterprogrammierverfahren Nach Weber [40]: „Unter einem Roboterprogramm versteht man eine Folge von Steuerbefehlen, die den Industrieroboter veranlasst, eine Aufgabe auszuführen." Je nach Anwendung hat der Bediener verschiedene Arten der Programmierverfahren, die sich in eine Online- und Offline-Programmierung untergliedern lassen (vgl. Abbildung 2.11).

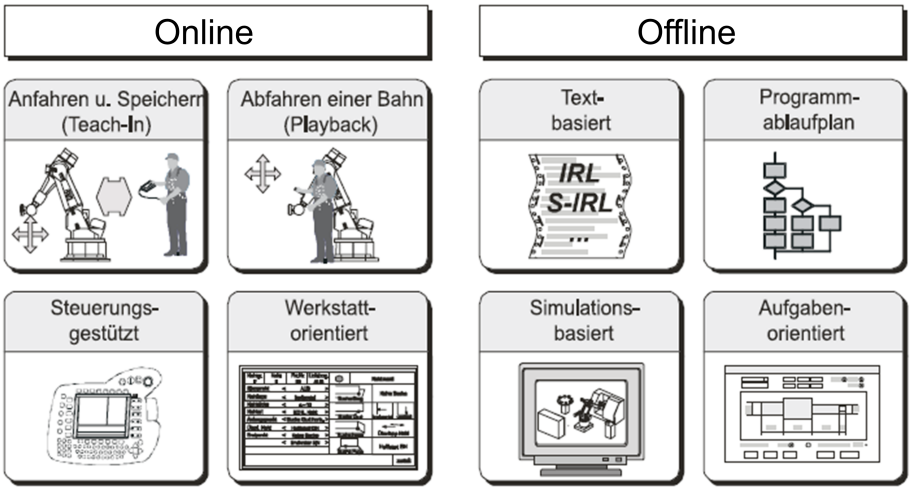


Abbildung 2.11: Online- und Offline-Programmierverfahren für Industrieroboter [44]

Während der Online-Programmierung wird das Robotersystem direkt am Einsatzort zu markanten Stützpunkten der Roboterbahn bewegt und vor Ort eingerichtet. D.h. während dem Play-Back-, Teach-In- oder Master-Slave-Verfahren werden die Punkte

und Bahnen der Roboter manuell im Einrichtbetrieb direkt in der Anwendung erstellt. Im anschließenden Roboterbetrieb gibt das System das zuvor erstellte Programm wieder. Bei der Play-Back-Programmierung wird der Roboter manuell entlang einer Bahn geführt, die im Anschluss vom Roboter wiedergegeben wird. Im Gegensatz dazu wird der Roboter beim Teach-In-Verfahren über das sogenannte Teach-Panel, ein Programmierhandgerät, zu gewünschten Positionen und Orientierungen gesteuert. Über das Teach-Panel werden einzelne Gelenkachsen angesteuert oder eine kartesische Pose angegeben. Bei dem Master-Slave-Programmierverfahren handelt es sich um einen Telemanipulator. Dabei folgt der als Slave definierte Roboter den Bewegungsvorgaben eines Bedienarms, dem sogenannten Master. Diese Verfahren sind der Telerobotik zugeordnet und finden in der Industrieautomation geringere Verwendung. Während Online-Programmierverfahren weniger Anforderungen an die Programmierkenntnisse des Bedieners stellen, besteht die Schwierigkeit der Anbindung von zusätzlicher Peripherie, wie bspw. der Einbindung von externen Sensoren. Weiterhin entstehen während der Programmierung der Systeme Stillstandszeiten, sodass diese während der Programmierphase nicht für die Produktion verfügbar sind. [40]

Abhilfe können an dieser Stelle Systeme schaffen, die offline in einem computerbasierten Programm erstellt werden. Roboterprogramme können bspw. text- oder simulationsbasiert erstellt werden. Durch die Verwendung einer Hochsprache können Roboterprogramme mittels textueller Eingaben von Befehlen mit spezifischen Parametern in einer Entwicklungsumgebung erstellt werden. Meistens ist an die Entwicklungsumgebung eine Robotersimulation angebunden, die den Roboter als virtuelle Einheit einbindet und so Hilfsmittel aus der Produktionsumgebung bereitstellt. Bei dem Übertragen der offline-erstellten Programme in die reale Umgebung kann es aufgrund von Abweichungen zwischen realem und virtuellem Modell zu Verzögerungen in der Inbetriebnahme kommen. [40]

Die bisher vorgestellten Programmierverfahren weisen je nach Anwendung spezifische Vor- und Nachteile auf. Online generierte Roboterprogramme sind in ihrer Bedienung einfach, weisen jedoch Nachteile bei der Anbindung von zusätzlichen Modulen auf. Offline erstellte Roboterporgramme vermeiden zwar Stillstandszeiten während ihrer Programmierung in virtuellen Umgebungen, benötigen allerdings Anpassung bei der Übertragung in die reale Station. Gemein ist ihnen die explizite oder roboterorientierte Programmierung, die keine flexiblen Änderungen oder Anpassungen während des Roboterbetriebs zulassen. [40]

Das als *hybride Programmierung* bezeichnete Verfahren kombiniert Vorteile der Online- und Offline-Programmierung. Abweichungen zwischen dem offline programmierten und dem realen Roboterprogramm werden in der Roboterzelle mittels einteachen angepasst.

Ein Beispiel für die hybride Programmierung kann wie folgt gestaltet werden: Die grundlegende Aufgaben- und Bewegungsplanung des Roboters wird vorweg als text-basiertes Roboterprogramm offline durch den Bediener erzeugt. Anschließend erfolgt eine manuelle Online-Anpassung des Roboterprogramms in der Zelle durch einen Werker. Basierend auf aktualisierten Informationen über ein Objekt wird im Anschluss bspw. eine offlineprogrammierte Pick-&-Place Aufgabe durchgeführt.

2.3 Grundlagen Mensch-Roboter-Kollaboration

Neben klassischen Industrierobotern existiert eine Generation von sensitiven Robotersystemen, die für die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) und Kooperation entwickelt wurde. Typische Eigenschaften der MRK-fähigen Robotersysteme sind neben der Mobilität und der schnellen Inbetriebnahme die intuitive Bedienung, zusätzliche Sensorik sowie der sichere Einsatz der Systeme in kollaborierenden Arbeitsräumen mit dem Menschen. Der flexible und große Einsatzbereich der MRK-fähigen Robotersysteme erlaubt die Teilautomatisierung und Unterstützung von komplexen Montagevorgängen, die bisher manuell durch geschulte Fachkräfte durchgeführt werden mussten. Neben steigenden Qualitätsanforderungen und dem schnellen Reagieren auf schwankende Marktveränderungen kann der Einsatz der neuen Technologie Verbesserungen in der Ergonomie sowie der Beherrschung der Variantenvielfalt bieten. Dies resultiert wiederum in dem Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der produzierenden Unternehmen an Hochlohnstandorten. [45] Gemeinsame Eigenschaften der Systeme sind weiterhin flexible Einsatzmöglichkeiten und der sichere kooperierende bzw. kollaborierende Betrieb zusammen mit dem Menschen.

Betriebsmodi in der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter Entsprechend Abbildung 2.12 ergeben sich nach Thiemermann [46] vier unterschiedliche Betriebsmodi für sich überlappende Arbeitsräume zwischen Mensch und Roboter abhängig der Variation von örtlicher und zeitlicher Trennung: Der Stand der Technik, autark, synchronisiert und kooperierend. Diesen grundlegenden Betriebsmodi wird zusätzlich die höchste Form, die Kollaboration, hinzugefügt.

Betriebsmodispektrum - Stand der Technik Entsprechend Abbildung 2.12 beschreibt der Stand der Technik eine strikte zeitliche und örtliche Trennung von Mensch und Roboter. Durch das Aufheben von Barrieren sowie durch zeitlich aufeinander abgestimmtes Arbeiten rücken Mensch und Roboter bei der Ausführung von Aufgaben näher

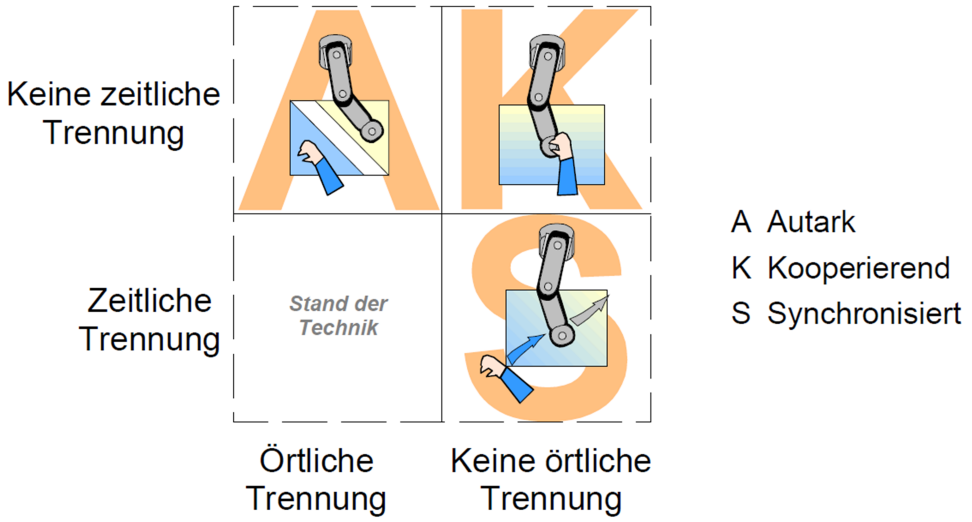


Abbildung 2.12: Betriebsmodispektrum vom Stand der Technik bis zur Mensch-Roboter-Kollaboration [46]

zusammen. Die Intensität der Zusammenarbeit steigert sich über die Betriebsmodi autark, synchronisiert, kooperierend bis hin zu kollaborierend.

Betriebsmodispektrum - Autark Während der autarken Kooperationsform hält sich der Mensch nur sporadisch in der Roboterzelle auf. Zwischen Mensch und Robotersystem erfolgt keine Arbeitsteilung, und der Werker geht keiner regelmäßigen Tätigkeit in der Roboterzelle nach. Lediglich zu Kontrollzwecken bzw. im Prozessfehlerfall betritt der Werker die Zelle. [46] Beispielsweise entnimmt der Roboter Bauteile von einer Materialbereitstellung und führt diese verschiedenen Produktionsautomaten zu.

Betriebsmodispektrum - Synchronisiert In der synchronisierten Kooperationsform teilen sich Mensch und Roboter den Arbeitsraum. Ihre Tätigkeiten haben jedoch eine zeitliche Abfolge. Mithilfe einer sensorischen Trennung der Arbeitsräume können die einzelnen Sektoren je nach Tätigkeit zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt werden. Dennoch gilt, Mensch und Roboter werden niemals zur gleichen Zeit an der gleichen Stelle einer gemeinsamen Aufgabe nachgehen. Im Falle einer Überschreitung der sensorisch abgesicherten Sektoren wird das Robotersystem in einen sicherheitsgerichteten Halt-Zustand versetzt. [46]

Das Fraunhofer IPA stellt bspw. eine Batteriemontage vor, in der das Robotersystem die einzelnen Zellen zusammenfügt, das Handling der Batterie übernimmt und der Werker in einem weiteren Bereich das Verbinden der einzelnen Zellen durchführt. Sowohl Mensch als auch Roboter arbeiten in durch Lichtschranken abgesicherten Arbeitsbereichen getrennt voneinander. [47]

Betriebsmodispektrum - Kooperation In der kooperativen Arbeitsform werden unterschiedliche Tätigkeiten von Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum zur gleichen Zeit ausgeführt. Mensch und Roboter verfolgen ein gemeinsames Ziel, führen jedoch unabhängige Teilaufgaben aus. Im Rahmen der Mensch-Technik-Interaktion und der menschzentrierten Zusammenarbeit sollte der Mensch der aktive und der Roboter der passive Interaktionspartner sein. [46] [48] Beispielsweise kann dem Robotersystem eine monotone Fügeaufgabe zugeordnet werden. Der Werker befindet sich zur gleichen Zeit im gleichen Arbeitsraum und führt parallel dazu eine komplexere Aufgabe aus, wie z. B. das Fügen von biegeschlaffen Elementen.

Betriebsmodispektrum - Kollaboration Die kollaborative Arbeitsform ist die anspruchsvollste Stufe der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter. Mensch und Roboter gehen zur gleichen Zeit im gleichen Arbeitsraum einer gemeinsamen Tätigkeit am gleichen Bauteil nach und verfolgen eine gemeinsame Zielstellung. In der kollaborativen Arbeitsform gilt es, Synergien bzw. Fähigkeiten des hybriden Teams optimal auszunutzen. Eine natürliche und intuitive Interaktion zwischen Mensch und Maschine ist besonders wichtig, da es aufgrund der engen Zusammenarbeit zu Koordinationserfordernissen kommt. [46] [48] Als Beispiel einer Mensch-Roboter-Kollaboration kann das Anreichen bzw. Präsentieren eines Bauteils durch einen Roboter, in einer für den Menschen ergonomisch positiven und prozessoptimalen Pose, bezeichnet werden. In dieser Arbeitsform führen beide Interaktionspartner gemeinsam Tätigkeiten an einem Bauteil aus.

Stand der Technik bei der Sicherheit von kollaborierenden Systemen Bei der Implementierung bzw. Integration von kollaborativen Robotersystemen gelten die rechtlichen Grundlagen entsprechend den Normen DIN EN ISO 10218-1, DIN EN ISO 10218-2 sowie der technischen Spezifikation ISO/TS 15066:2016. Bei der Inbetriebnahme von kollaborativen Robotern gilt es mittels einer Risikoanalyse Gefahren zu ermitteln und entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Unterschieden wird hier zwischen präventiven Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung (Abstandsüberwachung) und Möglichkeiten zur Reduzierung der Kräfte bei einer stattfindenden Kollision. [49] [50] [51] [53]

Weitere Grundlagen zum Thema Sicherheit von kollaborativen Systemen sind z. B. den Unterlagen zur Vorlesung *Mensch-Roboter-Kooperation in der industriellen Produktion* von Prof. Müller oder in Anwendungsform dem Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration [54] zu entnehmen.

2.4 Grundlagen Mensch-Technik-Interaktion

Mit der Zunahme von Mensch-Roboter-Kooperations- bzw. Kollaborationsanwendungen in Forschung und Industrie nehmen die Möglichkeiten der Interaktion zwischen Mensch und Technik eine wichtige Rolle ein.

In der Mensch-Roboter-Kollaboration gilt es, hybride Teams aus Mensch und Roboter zu bilden, die effizient und effektiv die Fähigkeiten jedes Teammitglieds optimal einsetzen. Ein Teilziel ist die Steigerung der Anzahl der Robotersysteme oder allgemein Maschinen, die von Einzelpersonen bedient werden können.

Ziel der Mensch-Technik-Interaktion (MTI) ist es, dem Werker während der Prozessausführung im Rahmen der Werkerassistenz richtige und geeignete Informationen zu liefern und diesen so durch den Prozess zu führen oder zu begleiten. Dadurch wird eine natürliche und intuitive Form der Interaktion ermöglicht.

Über die Zeit wurden verschiedene Definitionen bzw. Taxonomien zum Thema Mensch-Technik-Interaktion verfasst, wie z. B. von Scholtz [55], Sheridan [56], Beer Fisk und Rogers [57] oder Yanco und Drury [58].

Wenige oder keine werden jedoch bisher allgemein akzeptiert oder angewandt. Einige dieser Taxonomien sollen nachfolgend aufgeführt werden und zusammen mit *Mensch-Roboter-Interaktion - Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle* von Onnasch die Komplexität der MTI darstellen und gleichzeitig einen Überblick liefern.

Während Scholtz [55] zunächst grundlegend *Human-Computer-Interaction* definierte, überarbeitete er 2002 sein Modell wie folgt:

1. Als Supervisor hat der Mensch die Rolle eines passiven Beobachters, der nicht direkt mit einem Prozess in Verbindung steht.
2. In der Rolle des Operateurs bedient der Mensch das System aktiv, um es zu teachen oder anderweitig zu steuern.
3. Der Mensch tritt als Mechaniker auf.
4. Im Rahmen der MRK agiert der Mensch als Teampartner, um eine Tätigkeit gemeinsam mit dem Roboter auszuführen.
5. Menschen, die nicht einem Prozess zugeordnet sind, werden als Nicht-Beteiligte bezeichnet.

Scholtz [59] lehnt sich bei der Definition seiner Rollenmodelle an Sheridan an. [56] Das nachfolgende Taxonomiemodell in Abbildung 2.13 basiert auf den Arbeiten von Onnasch [48], Scholtz [59] und Sheridan [56] und unterscheidet zwischen den drei Klassifikationen Interaktionsklassifikation, Roboterklassifikation und der Teamklassifikation. Das Taxonomiemodell wurde in Abbildung 2.13 um die Betriebsmodi nach Thiemermann [46] erweitert.

Interaktions-klassifikation	**(Teil-) automatisierte Konzeptbeschreibung des gesamten Systems** • Produkt • Prozess (Wie sieht der (teil-) automatisierte Prozess aus?) • Betriebsmittel (Welche Betriebsmittel bzw. konkret Robotersysteme kommen zum Einsatz?)		**Interaktionsform zwischen Mensch und Roboter** • Kollaboration • Kooperation • Synchronisiert • Autark	**Interaktionsrolle des Menschen** • Supervisor • Operateur • Kollaborateur • Kooperateur • Nicht-Beteiligter
Roboter-klassifikation	**Aufgabe des Roboters** • Informations-austausch • Präzision • Entlastung • Transport • Manipulation	**Einsatzgebiet des Roboters** • Industrie • (Kommerzieller Service) • (Persönlicher Service)	**Morphologie des Roboters** • Funktional • Humanoid • (Zoomorph)	**Autonomiegrad des Roboters (gering – hoch)** • Infoaufnahme • Infoverarbeitung • Entscheidungs-findung • Handlungsaus-führung

Teamklassifikation	**Kommunikationskanal**
	• Mensch zu Roboter
	  • Elektronisch
	  • Mechanisch
	  • Akustisch
	  • Optisch
	• Roboter zu Mensch
	  • Mechanisch
	  • Akustisch
	  • Visuell
		Räumliche Nähe
		• Berührend
		• Annähernd
		• Führend
		• Vorbeigehend
		• Vermeidend
		• Fernsteuernd
			Zeitliche Nähe
			• Synchron
			• Asynchron
				Teamzusammen-setzung/ Verhältnis Mensch zu Roboter
				• $N_M = N_R$
				• $N_M > N_R$
				• $N_M < N_R$

Abbildung 2.13: Darstellung der Mensch-Technik-Interaktion bzw. Mensch-Roboter-Interaktion-Taxonomie in Anlehnung an [48] und [59]

Mit verschiedenen Leitfragen gilt es die Mensch-Technik-Interaktion bzw. die Mensch-Roboter-Interaktion einzuordnen. Im Allgemeinen wird zwischen drei Klassifikationen unterschieden: 1. Interaktionsklassifikation, 2. Roboterklassifikation und 3. Teamklassifikation.

In der **Interaktionsklassifikation** wird entsprechend Thiemermann [46] die Form der Betriebsmodi der Mensch-Roboter-Kollaboration eingeordnet. Arbeiten Mensch und Roboter autark voneinander oder treten sie in einer kollaborativen Arbeitsform auf? Aus der Interaktionsform sowie einer Aufgabenbeschreibung kann die Interaktionsrolle des Menschen abgeleitet und beurteilt werden, in welchem Maße dieser eingreifen muss.

Im Rahmen der **Roboterklassifikation** werden die Arbeitsweisen und Gestaltungen des Robotersystems hinterfragt. Mit welchem Autonomiegrad führt das Robotersystem entsprechend einer fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter eine Tätigkeit aus? Ebenfalls werden konkrete Einsatzgebiete sowie die Morphologien abgefragt, wie bspw. ein funktionales Design oder ein humanoides bzw. zoomorphes Aussehen. Letztere sind im Rahmen von Industrieanwendungen im Vergleich zur Servicerobotik weniger relevant, werden aber der Vollständigkeit halber aufgelistet.

Die **Teamklassifikation** hinterfragt, wie die Teamzusammenarbeit ausgelegt ist und wie der Mensch mit der Maschine kommuniziert. Weiterhin gilt es das Massenverhältnis, in dem Mensch und Roboter zueinander stehen, zu hinterfragen. Möglichkeiten der Kommunikation sind nebst Abbildung 2.13 detailliert in Abbildung 2.14 dargestellt. [48] [59]

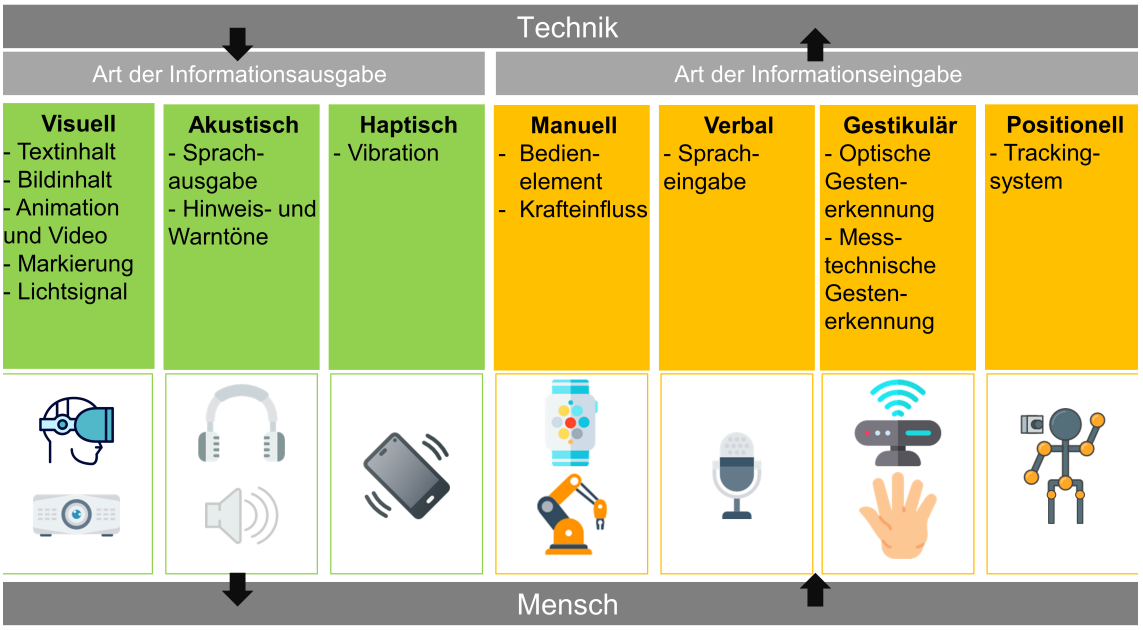


Abbildung 2.14: Möglichkeiten des Informationsaustausches zwischen Mensch und Technik über verschiedene Ein- und Ausgabeeinheiten

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass der Trend zu kooperativen/kollaborativen Mensch-Maschine-Systemen einen intensiveren Mensch-Technik-Dialog im hybriden Team fordert. [60] Eine natürlich und intuitive Umsetzung der Mensch-Technik-Interaktion im Bereich der (teil-) automatisierten Systeme gilt als Grundvoraussetzung und führt zu einer Verlagerung, die Betriebsmittel nicht als *Instrument*, sondern als *Partner* des Menschen anzusehen.

Dabei sollten Mensch und Maschine in der Kollaboration als Team agieren. Wie in einem guten Team aus Menschen verständigen sich alle Mitglieder über ihre Intention – sie stimmen sich ab, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Voraussetzung für die

Umsetzung solcher Szenarien sind qualitativ hochwertige Benutzungsschnittstellen, um das Vertrauen der Werker in die technische Umsetzung zu erhöhen, damit diese zu jeder Zeit die volle Kontrolle über das System haben. Mittels intuitiver Bedienkonzepte mit entsprechenden Schnittstellen sollen die Werker befähigt werden, eine Station zu konfigurieren, anstatt aufwendig zu programmieren.

Die Canvas-Darstellung in Abbildung 2.13 ermöglicht eine einfache Klassifikation der Mensch-Technik-Interaktion und fasst wesentliche Punkte übersichtlich zusammen.

Abschließend sei zu erwähnen, dass es sich bei der Mensch-Technik-Interaktion um reine Bedienfunktionen handelt. Die Systeme können daher keine Sicherheitsfunktionalitäten übernehmen. Die Systeme müssen auch ohne die Mensch-Technik-Interaktion inhärent sicher gestaltet sein.

2.5 Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

Dieses Kapitel dient dazu, einen Überblick über verschiedene Definitionen der KI zu geben und diese zusammenzuführen. Weiterhin werden Machine Learning und Deep Learning sowie ihre Methoden differenziert. Neben einem Vorgehensmodell zu Machine-Learning-Projekten werden die angewandten Methoden des maschinellen Lernens, Neuronale Netze, Convolutional Neural Networks und Gradient Tree Boosting vorgestellt.

Künstliche Intelligenz (KI, englisch: AI = Artificial Intelligence) beschreibt die Fähigkeit eines Computers, Aktionen auszuführen, die eine menschenähnliche Intelligenz erfordern. Obwohl es seit vielen Jahrzehnten Methoden zur Bildung einer Künstlichen Intelligenz gibt, hat das Thema in letzter Zeit viel Aufmerksamkeit erfahren. In der modernen und digitalen Welt türmen sich riesige Datenmengen auf. Der technologische Fortschritt und vor allem die Erhöhung der Geschwindigkeit von Computern ermöglicht es den Rechnern, immer komplexere Probleme zu lösen. [61] [62]

Der Begriff KI ist bisher nicht einheitlich definiert, da er sich in der Vergangenheit stets an die Fähigkeiten bzw. technischen Möglichkeiten angepasst hat [64]. Aus diesem Grund sind nachfolgend in Tabelle 2.1 die gängigsten Begriffsdefinitionen aufgeführt.

Autoren	Definitionen
Bellman	KI ist die Automatisierung von Aktivitäten, die wir mit dem menschlichen Denken verbinden, Tätigkeiten wie Entscheidungen, Problemlösung, Lernen, ... [66]
Haugeland	KI ist das spannende neue Bestreben, Computer zum Denken zu bringen ... Maschinen mit Verstand, im vollen und wörtlichen Sinne. [67]
Rich, Knight	KI ist die Erforschung, wie man Computer dazu bringt, Dinge zu tun, bei denen Menschen im Moment besser sind. [68]
Kurzweil	Die Kunst, Maschinen zu entwickeln, die wiederum Funktionen ausführen und im Falle menschlicher Interaktion eine Intelligenz erfordern. [69]
Poole, Mackworth, Goebel	Computergestützte Intelligenz ist die Studie über das Konstrukt intelligenter Agenten. [70]
Nilsson	KI befasst sich mit intelligentem Verhalten in Objekten. [71]
Charniak, McDermott	Das Studium der mentalen Fähigkeiten durch den Einsatz von Computermodellen. [72]
Winston	Das Studium der Berechnungen, die es ermöglichen, wahrzunehmen, zu begründen und zu handeln. [73]
McCarthy	KI ist die Wissenschaft und Technik zur Schaffung intelligenter Maschinen, insbesondere intelligenter Computerprogramme. Es steht im Zusammenhang mit der Aufgabe, menschliche Intelligenz mithilfe von Computern zu verstehen, aber die KI muss sich nicht auf Methoden beschränken, die biologisch beobachtbar sind. [61]
DFKI	„KI ist die Eigenschaft eines IT-Systems, *menschenähnliche*, intelligente Verhaltensweisen zu zeigen.“[64]
Europäische Kommission	Unter KI versteht man Maschinen oder Agenten, die in der Lage sind, ihre Umgebung zu beobachten, zu lernen und auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen intelligente Maßnahmen zu ergreifen oder Entscheidungen vorzuschlagen. [74]

Tabelle 2.1: Aufstellung unterschiedlicher KI Definitionen in Anlehnung an [65]

In Anlehnung an Russel und Norvig [65] kann eine Einteilung der Definitionen in *menschliches Denken*, *menschliches Handeln*, *rationales Handeln*, *rationales Denken* und generische Ansätze, die sich in der Praxis bewiesen haben, vorgenommen werden. Bellmans

und Haugelands Definitionen beziehen sich auf das menschliche Denken, während Rich und Kight sowie Kurzweil KI im Rahmen des menschlichen Handelns definieren. Poole, Mackworth, Goebel und Nilsson befassen sich mit rational handelnder KI und Charniak, McDermott und Winston wiederum mit rational denkender KI. [65] Die Definitionen von McCarthy, dem DFKI und der Europäischen Kommission lassen sich als generische KI-Definitionen aus der heutigen Praxis einstufen.

Gemein ist allen Definitionen, KI als eine Forschungsrichtung mit unterschiedlichen Vertiefungsrichtungen anzusehen. Die Definitionen unterscheiden sich nur geringfügig in ihren Kernaussagen. Grundsätzlich lassen sie sich aber in die drei Kategorien *menschenähnlich*, *Algorithmen* und *Intelligenz* einordnen.

- Menschenähnlich: Bezieht sich auf die menschlichen Fähigkeiten *Wahrnehmen*, *Schlussfolgern*, *Denken und Verstehen* und abschließendes *Handeln* - entsprechend Bellman; Haugeland; Rich, Knight; Kurzweil; DFKI; Europäische Kommission
- Algorithmen: Algorithmen oder Berechnungsmodelle lassen KI-Algorithmen rational denken oder rational handeln - entsprechend Poole, Mackworth, Goebel; Nilsson; Charniak, McDermott; Winston
- Intelligenz: Die Intelligenz der KI wird von den Autoren schwächer als die des Menschen eingestuft bzw. orientiert sich an der des Menschen. Lediglich McCarthy verweist darauf, dass die KI über das biologische Verhalten hinausgehen kann.

Nachfolgend soll der Begriff *Künstliche Intelligenz* basierend auf den zuvor vorgestellten Definitionen beschrieben werden:

Künstliche Intelligenz (KI) ist die Wissenschaft und Technik zur Herstellung intelligenter Maschinen, insbesondere intelligenter Computerprogramme. Die entwickelte KI weist Merkmale auf, die der Intelligenz des Menschen nahekommen, einschließlich Fähigkeiten des Denkens, Lernens, der Problemlösung und der Anpassungsfähigkeit. KI kann jedoch auch die Fähigkeiten des Menschen übertreffen, bspw. in der Verarbeitung und Berechnung von großen Datenmengen.

Machine Learning (ML) ist einer der Ansätze, die im Bereich der Künstlichen Intelligenz angewendet werden.

Samuel [75] definierte maschinelles Lernen als das Fachgebiet, das Computern die Möglichkeit gibt, ohne explizite Programmierung zu lernen. Der Grundgedanke war, dass die Programmierung von Computern aus ihrer eigenen Lernerfahrung hervorgeht. Das solle letztendlich die Notwendigkeit eines Großteils des detaillierten Programmieraufwandes beseitigen. [75]

Mitchell [76] definierte das maschinelle Lernen ingenieurorientierter: „Ein Computerprogramm soll aus der Erfahrung (Experience) E in Bezug auf eine Aufgabe (Task) T und eine Leistungskennzahl (Performance) P lernfähig sein, wenn sich seine Leistung auf T, gemessen an P, mit Erfahrung E verbessert.“ [76]

Algorithmen des Machine Learning haben die Funktion, Aufgaben auszuführen oder bspw. Muster zu erkennen, ohne explizit für die Aufgabe angewiesen zu werden, indem sie Maßnahmen aus (historischen) Daten erschließen. Dabei wird ML oftmals mit KI gleichgesetzt. Jedoch ist hier zu beachten, dass ML lediglich eine Methode bzw. ein Werkzeug in der KI darstellt. Die Anwendung von ML mithilfe von tiefen neuronalen Netzen wird als Deep Learning (DL) definiert. [65] [64] Aus dieser allgemeinen Definition kann Abbildung 2.15 abgeleitet werden, die die entsprechenden Begrifflichkeiten graphisch darstellt, die nachfolgend detaillierter beschrieben werden.

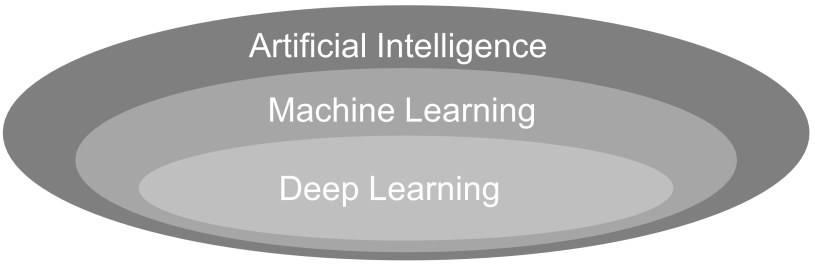


Abbildung 2.15: Graphische Einordnung der KI-Begrifflichkeiten

Machine Learning Die ML Algorithmen erkennen Muster und lernen, Vorhersagen und Empfehlungen zu treffen, indem sie Daten und Erfahrungen verarbeiten, anstatt explizite Programmieranweisungen zu erhalten. Die Algorithmen können sich auch als Folge neuer Daten und Erkenntnisse anpassen, um die Effizienz im Laufe der Zeit zu verbessern. Der Fokus bei ML liegt auf der Vorhersage (*Prediction*) und der Empfehlung (*Prescription*). [77]

Deep Learning Deep Learning (DL) ist eine Form des maschinellen Lernens, die eine größere Bandbreite an Datenmengen verarbeiten kann und eine geringere Datenvorverarbeitung durch den Menschen erfordert, wie bspw. das Beschriften von Datensätzen. Im Deep Learning bilden miteinander verbundene Schichten von softwarebasierten Berechnungseinheiten, die als Neuronen bekannt sind, ein neuronales Netzwerk. Der Aufbau ist dem menschlichen Gehirn nachempfunden. Das Netzwerk kann große Mengen an Eingabedaten aufnehmen und über mehrere Schichten verarbeiten. Die Komplexität der zu detektierenden Eigenschaften in den Daten nimmt mit der Anzahl der Schichten zu.

Abschließend kann das Netzwerk bspw. eine Klassifikation der Daten vornehmen oder Objekte basierend auf Charakteristika in einem Bild detektieren.[77]

Abhängig von den zu analysierenden Daten können verschiedene Methoden wie das Supervised Learning, Unsupervised Learning sowie das sogenannte Reinforcement Learning angewandt werden, die in Abbildung 2.16 dargestellt sind.

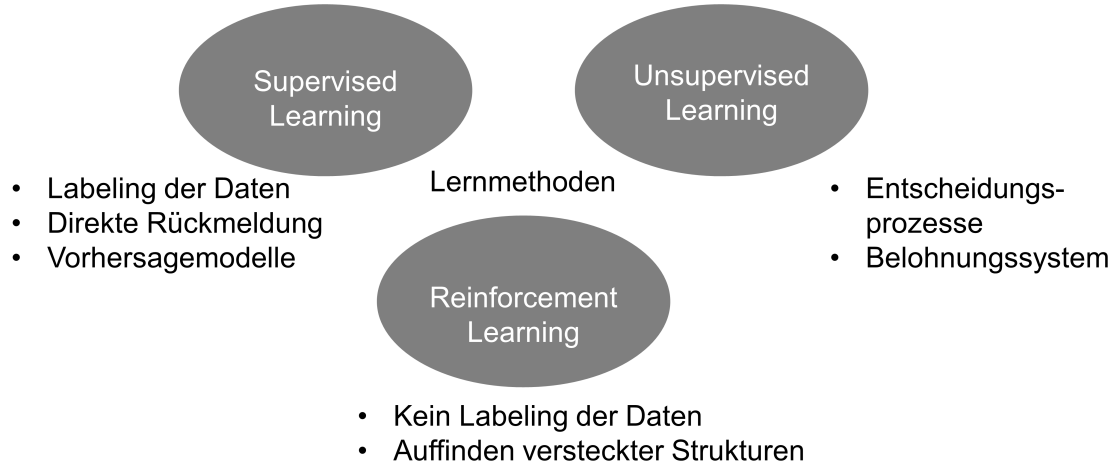


Abbildung 2.16: Darstellung der unterschiedlichen Machine-/Deep-Learning-Methoden

Supervised Learning Beim Supervised Learning, dem überwachten Lernen, lernt der Algorithmus, an einem beschrifteten (engl. Label) Datensatz die Beziehung von gegebenen Eingabedaten (Input) zu bestimmten Ausgabedaten (Output) zu erschließen. Die beschrifteten Daten können als Input von einem Menschen oder automatisiert durch Sensorik und/oder Computerprogramme erfolgen. Die Input-Daten werden als Trainingsdaten bezeichnet und haben ein bekanntes Label bzw. einen bekannten Output, bspw. in Ordnung (i.O.) oder nicht in Ordnung (n.i.O.). Ein Modell wird durch einen Trainingsprozess anhand dieser Daten und vorgegebenen Beziehungen erstellt. Der Trainingsprozess wird so lange durchgeführt, bis das Modell die gewünschte Genauigkeit erreicht hat. Eine Bewertung des Modelles erfolgt an einem Testdatensatz, der unabhängig von den Trainingsdaten ist. Supervised Learning findet Einsatz, wenn bekannt ist, wie die Eingabedaten zu klassifizieren sind, aber eine Vorhersage ermittelt werden soll und ein entsprechender Algorithmus benötigt wird. [77]

Unsupervised Learning Beim Unsupervised Learning, dem nicht überwachten Lernen, untersucht ein Algorithmus Eingabedaten, um Muster und Zusammenhänge zu identifizieren, ohne eine explizite Ausgabevariable zu erhalten. Die Input-Daten sind nicht mit einem Label versehen und haben kein bekanntes Ergebnis. Durch das Ableiten

von Strukturen, die in den Eingabedaten vorhanden sind, wird ein Modell abstrahiert. Ziel kann das Ableiten von allgemeinen Regeln, das Clustering von Daten, Klassifikationen, Anomaliedetektionen oder ähnliches sein. [77]

Reinforcement Learning Das Reinforcement Learning, zu Deutsch bestärkendes Lernen, ist eine Methode, bei der der Algorithmus durch die Interaktion mit seiner Aufgabe oder Umgebung lernt. Reinforcement Learning grenzt sich also stark vom Supervised und Unsupervised Learning ab. Der Algorithmus, hier als Agent bezeichnet, erhält Belohnungen durch eine korrekte Ausführung und Strafen für fehlerhafte Ausführung beim Erlernen einer Strategie. Der Agent lernt ohne das Eingreifen eines Menschen, indem er seine Belohnung maximiert und seine Strafe minimiert. Reinforcement Learning wird eingesetzt, wenn nur wenige Trainingsdaten zur Verfügung stehen, der Endzustand nicht klar definiert ist oder die Interaktion mit der Umgebung die einzige Möglichkeit ist, mehr zu erfahren. [77]

Vorgehen, Trainingsset, Training, Testset, Anwendung Nachfolgend werden die Begrifflichkeiten und das Vorgehen während der Erstellung von KI-Projekten, hier einem Supervised-Learning-Modell, erklärt. Der Ablauf, vom Sammeln der Daten bis zur Anwendung, wird entsprechend Abbildung 2.17 zusammengefasst. Wie der vorigen Definition zu entnehmen ist, lernt der Supervised-Learning-Algorithmus an einem beschrifteten Datensatz die Beziehung zwischen gegebenen Eingabedaten und einem bestimmten Output. Die Daten werden dabei durch den Menschen oder maschinell erfasst und zumeist aufbereitet, um Sensorrauschen oder andere Störfaktoren zu bereinigen. Das Labeling der Daten kann ebenfalls manuell durch erfahrene Menschen oder maschinell durchgeführt werden. Ein (teil-)automatisiertes Labeling der Daten ist z. B. durch zusätzlich integrierte Sensorik möglich, die bspw. Charakteristika wie Dimensionen misst und so zuvor gesammelte Daten entsprechend gegebenen Spezifikationen als i.O oder n.i.O. labelt.

Im dritten Schritt werden die Daten im Verhältnis 3:1[1] aufgeteilt. Daten, die zum Training des Modells benötigt werden, werden als Trainingsdatenset (*Train*) bezeichnet. Weiterhin wird ein Testdatenset (*Test*) unabhängig vom Trainingsdatenset vorgehalten, um eine Validierung des Modells durchzuführen und dabei etwaige Überanpassungen (*Overfitting*) zu vermeiden. Der Fehler des Modells wird nach dem eigentlichen Modelltraining am Testdatenset gemessen. Das Testset findet während des Modelltrainings keine Verwendung.

[1] Das Verhältnis vom Datensatz *train* zu *test* variiert je nach Algorithmus. Zumeist wird der Datensatz im Verhältnis 3:1 oder 4:1 aufgeteilt. [78]

Das Training ist abgeschlossen, wenn der Algorithmus ausreichend genau ist. Optimierungen werden entweder in iterativen Schritten eingepflegt, oder der Algorithmus wird auf neue Daten im Rahmen des Deployments, also der Bereitstellung, angewendet. [79]

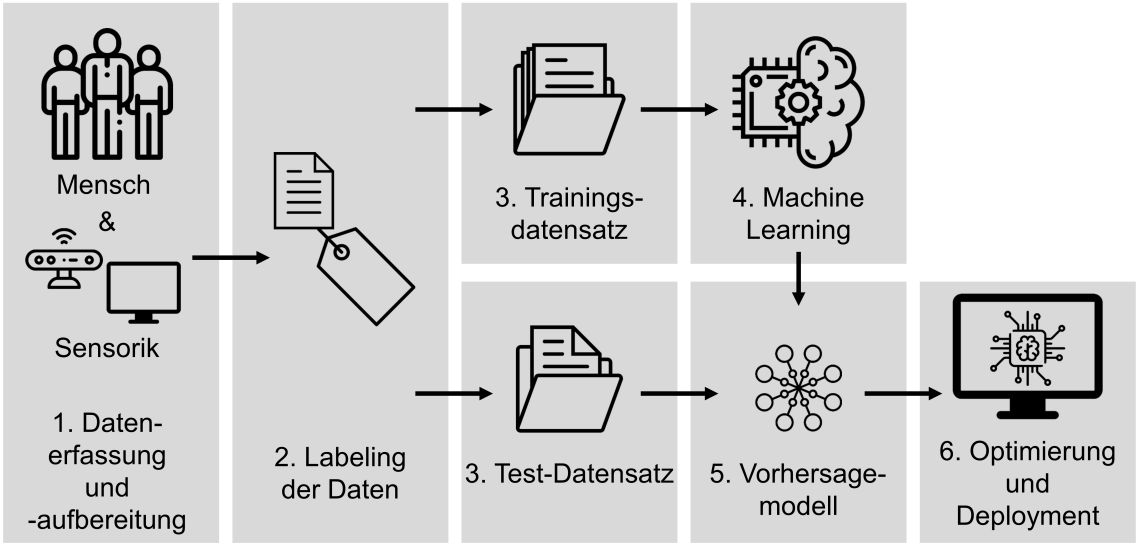


Abbildung 2.17: Vorgehen bei Machine-Learning-Projekten mit der Supervised-Learning-Methode

Neural Network Artificial Neural Networks (ANN), zu Deutsch künstliche neuronale Netze (KNN), sind bedeutende Methoden des maschinellen Lernens. Sie repräsentieren vereinfachte mathematische Modelle eines biologischen Neuronen-Netzwerks. Die Rechenknoten neuronaler Netze stellen Neuronen dar und sind durch Synapsen miteinander verbunden (siehe Abbildung 2.18 links).[2]

Die Grundstruktur eines ANN kann, wie in Abbildung 2.18 rechts dargestellt, modelliert werden. Die Eingabedaten werden in Form eines multidimensionalen Vektors auf die Eingabeschicht geladen, von wo aus sie auf verdeckte Schichten verteilt werden. Die versteckten Ebenen (*Hidden Layer*) treffen Entscheidungen basierend auf den vorherigen Schichten und gewichten diese entsprechend. Mehrere verdeckte Ebenen übereinander zu stapeln, wird allgemein als Deep Learning bezeichnet.

[2] Die Thematik KI kommt in dieser Arbeit in einer angewandten Form zum Einsatz. Es werden keine grundlegenden Algorithmen entwickelt. Aus diesem Grund wird der biologische Aufbau der Neuronen lediglich kurz angeschnitten. Weiterführende Informationen sowie Abbildungen können bspw. [65] Seite 11 entnommen werden.

Jede Nervenzelle bzw. jedes Neuron besteht aus einem Zellkörper oder Soma, der einen Zellkern enthält. Aus dem Zellkörper verzweigen sich eine Reihe von Fasern, die Dendriten genannt werden, und eine einzige Langfaser, das Axon. Die feinen Nervenzellfortsätze, Dendriten und Neuriten gehen vom Zellkörper aus und sind mit weiteren Nervenzellen verbunden.

Signale werden durch eine komplizierte elektrochemische Reaktion von Neuron zu Neuron übertragen, ähnlich den modellierten künstlichen neuronalen Netzen im Rahmen des Machine oder Deep Learnings. Die elektrochemischen Signale steuern die Gehirnaktivität. Diese Mechanismen bilden die Grundlage für das Lernen im Gehirn.

Abbildung 2.18 rechts zeigt ein einfaches dreischichtiges Feedforward Neural Network, bestehend aus einer Eingangsschicht (Input), einer verdeckten Schicht (Hidden) und einer Ausgangsschicht (Output). Diese Struktur ist die Grundlage für eine Reihe gängiger ANN-Architekturen.

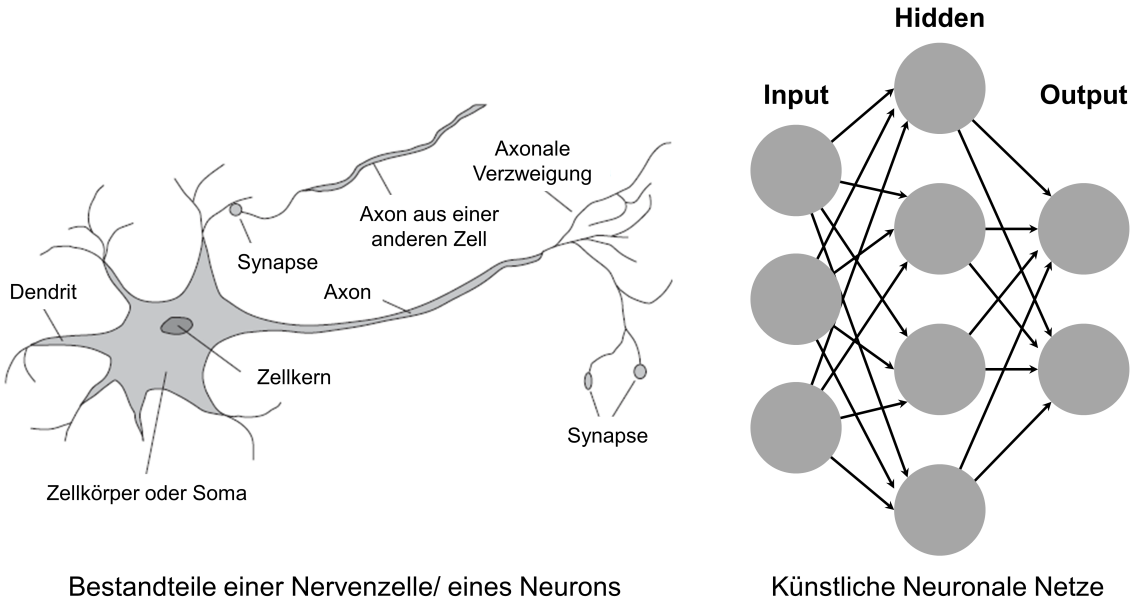


Abbildung 2.18: Aufbau eines biologischen Neurons (links) [65] und Modellierung eines Artificial Neural Networks (rechts)

Convolutional Neural Network Eine besondere Art von künstlichen neuronalen Netzen sind Convolutional Neural Networks (CNN) bestehend aus gefalteten Schichten (*Convolutional Layer*), Sammelschichten (*Pooling Layer*) und vollständig verbundenen Schichten (*Fully-connected Layer*). Durch das Stapeln dieser Schichten wird eine CNN-Architektur gebildet. Sie sind inspiriert vom visuellen Kortex der Tiere, in dem unterschiedliche Schichten auf verschiedene Regionen in einem Bild reagieren. Die Ebenen in einem CNN lernen verschiedene Merkmale (*Features*) eines Bildes zu identifizieren. Für eine Gesichtserkennungsaufgabe können zur Identifikation bspw. Kanten, Gesicht, Augen, Mund verwendet werden. Aus diesen erkannten Merkmalen kann eine Klassifikation vorgenommen werden. [80]

CNNs bestehen wie klassische ANNs aus Neuronen, die sich durch das Lernen selbst optimieren. [81] Ein wesentlicher Unterschied zwischen CNNs und traditionellen ANNs besteht darin, dass CNNs hauptsächlich im Bereich der Mustererkennung in Bildern eingesetzt werden. Dies ermöglicht es, bildspezifische Merkmale in der Modell-Architektur zu kodieren. Abbildung 2.19 zeigt die Architektur eines CNN am Beispiel des LeNet-Modells zur Erkennung von handschriftlichen und maschinell gedruckten Zeichen.

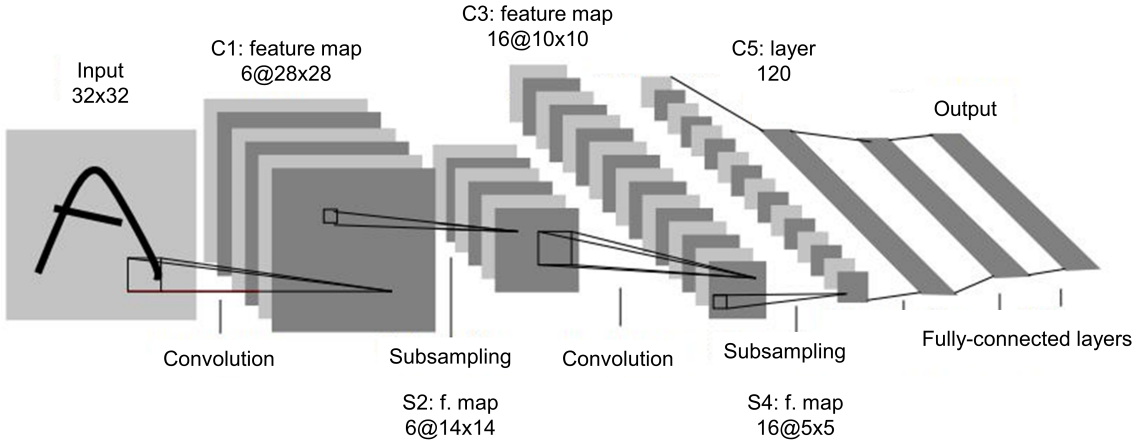


Abbildung 2.19: Modellierung eines Convolutional Neural Networks am Beispiel des LeNet-Modells zur Erkennung von handschriftlichen und maschinell gedruckten Zeichen [82]

Die Eingabeschicht enthält die Pixelwerte des Bildes. Die Hauptaufgabe der Faltungsschicht besteht darin, lokale Zusammenhänge von Merkmalen aus der vorherigen Schicht zu erkennen und deren Erscheinungsbild in einer Merkmalskarte abzubilden [83]. Durch die Faltung in neuronalen Netzwerken wird das Bild in Wahrnehmungselemente aufgeteilt, wobei zunächst lokale Empfangsfelder geschaffen und schließlich die Wahrnehmungselemente in Feature Maps komprimiert werden. So speichert die Feature Map Informationen dazu, an welcher Stelle das Merkmal im Bild vorkommt und mit welcher Güte es dem Filter entspricht. Während Faltungsschichten nahe der Eingabeschicht einfache Geometrien wie Kanten und Rundungen erkennen, identifizieren tiefere Schichten zunehmend komplexere Strukturen. [81] [84] [85] Die Pooling- oder Downsampling-Schicht ist dafür verantwortlich, die Größe des gegebenen Inputs zu reduzieren. Im Allgemeinen wird sie zum schrittweisen Reduzieren der Rechenanforderungen im Netzwerk verwendet und zur Minimierung der Wahrscheinlichkeit einer Überanpassung (*Overfitting*) der Filter. Der Begriff *Fully Connected* impliziert, dass jedes Neuron in der vorherigen Schicht mit jedem Neuron in der nächsten Schicht verbunden ist. Die Ausgabe der Faltungs- und Pooling-Schichten stellt High-Level-Merkmale des Eingangsbildes dar. Der Zweck der Fully-Connected-Schicht ist es, diese Funktionen zur Klassifikation des Eingabebildes in verschiedene Kategorien, basierend auf dem Trainingsdatensatz, zu nutzen. [86]

Gradient Tree Boosting Das Gradient Tree Boosting, ein Ensemble von Entscheidungsbäumen, gehört neben ANNs zu den effizientesten maschinellen Lernalgorithmen für die Praxis. [87] XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) ist ein Framework, das für überwachte Lernaufgaben wie Regression, Klassifizierung und Ranking, basierend auf

Gradient Tree Boosting, verwendet werden kann. Das Framework fußt auf den Prinzipien des Gradient Boosting und wurde entwickelt, um einen skalierbaren und präzisen Algorithmus bereitzustellen. Bei der Boosting-Methode wird ein Algorithmus iterativ durch das Anpassen von Gewichtungen trainiert. Der Hauptgedanke von Gradient Boosting ist die Erzeugung eines Vorhersagemodells in Form eines Ensembles von schwächeren Vorhersagemodellen. Die Hauptursachen für Lernfehler sind Rauschen, Verzerrungen und Abweichungen. Mithilfe von Ensembles können diese Faktoren minimiert werden. Kombinationen mehrerer Klassifikatoren verringern die Abweichungen und können eine zuverlässigere Klassifikation als ein einzelner Klassifikator ergeben. Bei dieser Methode lernen die nachfolgenden Vorhersagevariablen aus den Fehlern der vorherigen Vorhersagevariablen. Daher bestehen für die Prognosen ungleiche Wahrscheinlichkeiten, in Folgemodellen zu erscheinen. Typische Vorhersagemodelle des Gradient-Tree-Boosting-Algorithmus' sind Entscheidungsbäume. Wie in Abbildung 2.20 zu sehen ist, stellen diese eine graphenbasierte Methode dar, in der die Bäume solange durchlaufen werden, bis das Ende des Graphen bzw. ein Blatt des Baumes erreicht ist. Wie zu sehen ist, werden z. B. Entscheidungen bezüglich des Alters von Personen und der täglichen Nutzung von Smartphones getroffen. Entsprechend den Antworten erfolgt eine Gewichtung. [88] [89]

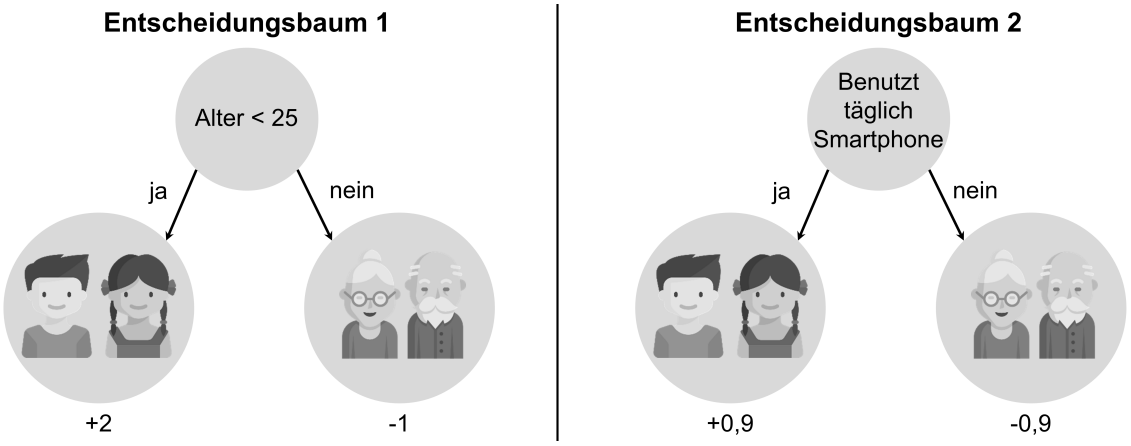


Abbildung 2.20: Beispielhafte Modellierung eines Ensemble-Entscheidungsbaums (*Decision Tree*) in Anlehnung an [89]

2.6 Grundlagen Blockchain - Distributed-Ledger-Technologie - Directed Acyclic Graphs

Die Blockchain-Technologie ist ein neuartiger und sich schnell entwickelnder Ansatz zur unveränderlichen Aufzeichnung und Übertragung von Daten über ein Netzwerk unter Verwendung kryptographischer und algorithmischer Verfahren. [90] Blockchains gelten

als revolutionäre und disruptive technologische Innovation. [91] [92] Technisch baut die Blockchain-Technologie auf der Distributed-Ledger-Technologie (DLT) auf.

Die Distributed Ledger Technology, Englisch für Technik verteilter Kassenbücher, bildet die grundlegende Technik für eine Vielzahl von Anwendungen. Beispiele sind digitale Kryptowährungen, Identifikationsmöglichkeiten, die Kommunikation zwischen Maschinen oder Smart Contracts zum automatisierten Ausführen von Verträgen oder Aktionen. [93] DLTs erlauben es, Transaktionen und Daten über ein verteiltes Netzwerk von verschiedenen Teilnehmern aufzuzeichnen, gemeinsam zu nutzen und zu synchronisieren. [94] In der Literatur wird Blockchain oftmals synonym zu DLT verwendet, jedoch stellt Blockchain eine Art der DLT dar. Die DLT versucht sowohl die Herausforderungen Zentralisierung und Vertrauen bei Transaktionen als auch das Double-Spending-Problem zu lösen.

Zentralisierung Während anfänglich Internetnutzer Inhalte im Web 1.0 konsumierten, konnten die Nutzer im Web 2.0 aktiv mitgestalten und bspw. Blogartikel erstellen oder Artikel in Wikipedia verfassen. Anbieter wie Google oder Facebook zentralisieren heutzutage jedoch Internetnutzer auf ihren Plattformen und können deren Inhalte manipulieren, gegebenenfalls zensieren oder Nutzer sperren. [95]

Vertrauen Transaktionen zwischen zwei oder mehreren Parteien erfordern Vertrauen. Während im persönlichen Kontakt bspw. ein Smartphone gegen Bargeld gehandelt werden kann, ist z. B. der Handel im Internet schwierig aufgrund der Anonymität, asymmetrischer Informationsverteilung und fehlenden persönlichen Kontakts zwischen den Vertragspartnern. Daher werden Intermediäre (Mittelsmänner) eingesetzt, um die Problematik der Anonymität zu lösen. Sogenannte Trusted Third Parties (TTPs), wie z. B. Banken oder Kreditkartenanbieter, sichern die Kommunikation bei Transaktionen zwischen zwei Vertragspartnern ab und schaffen Vertrauen. Allerdings stellt sich die Frage, wie vertrauenswürdig eine solche TTP, eine zentrale Instanz/Institution oder eine Zertifizierungsstelle hinsichtlich bspw. Betrug oder Manipulation ist. [95]

Double-Spending-Problem Das Double-Spending-Problem beschreibt das mehrfache Ausgeben bzw. Verteilen von Objekten oder Daten. In der realen Welt ist jedes Objekt einzigartig. Wird bspw. eine Schraube oder ein Auto gegen einen definierten Wert verkauft, geht das Objekt in den Besitz einer anderen Partei über und kann somit nicht nochmals ausgegeben werden. Im Gegensatz dazu kann in der digitalen Welt eine Datei vervielfältigt und immer wieder verkauft werden. Diese Vervielfältigungsmöglichkeit

kann bspw. mit zentralen Lizenzservern unterbunden werden. Dies führt jedoch wiederum zu der zuvor angesprochenen Zentralisierung. [95]

Die hier aufgezeigten Problematiken versuchen DLTs bzw. Blockchains zu lösen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Grundlagen der Technologie erforscht, und eine erste Machbarkeitsstudie wurde umgesetzt. Erste Erfahrungen mit der Blockchain bzw. der DLT wurden am Beispiel des IOTA-Projektes gesammelt und in den vorhandenen Use Case implementiert. Eine ganzheitliche und vertiefende Analyse ist aufgrund der Neuheit dieser Technologie noch nicht möglich - dennoch wird Grundlagenwissen vermittelt und Potenzial für zukünftige Forschungsarbeiten aufgezeigt. Nachfolgend werden die grundlegenden Begrifflichkeiten und Funktionsweisen erläutert.

Blockchain Blockchain, zu Deutsch Blockkette, bezeichnet eine manipulationssichere, mit Zeitstempel versehene Datenbank, die mit einer Transaktionshistorie in einem dezentralen Teilnehmernetzwerk arbeitet. Diese verwenden kryptographische und algorithmische Methoden, um Daten über ein Netzwerk unveränderlich aufzuzeichnen und zu synchronisieren. Durch das regelmäßige Aktualisieren und Teilen der Transaktionshistorie wird eine Kopie der Kette auf jedem Computer der Teilnehmer gespeichert. So wird sichergestellt, dass keine Doppelausgabe eines Datensatzes bzw. eines Kryptogeldes ausgeführt wird, da dies anderweitig zu einem Konflikt führen würde. [93] [94]

Laut Iansiti und Lakhani basiert die Blockchain-Technologie auf fünf Grundprinzipien [96] [97]:

1. Verteilte Datenbank: Jeder Teilnehmer der Blockchain hat Zugriff auf die gesamte Datenbank und deren komplette Historie. Kein einzelner Teilnehmer kontrolliert die Daten oder die Informationen. Es existiert ein verteiltes Belegbuch, sodass keine einzelne Partei in der Lage ist, alle Informationen zu kontrollieren. Jeder Netzwerkteilnehmer kann direkt die Transaktionsdatensätze der anderen Parteien überprüfen und einsehen, sofern diese unverschlüsselt sind. [96]

2. Peer-to-Peer-Datenübertragung: Die Kommunikation erfolgt auf direktem Weg zwischen den Teilnehmern und nicht über einen zentralen Knoten. Jeder Knoten speichert und leitet Informationen an alle anderen Knoten weiter. [96]

3. Transparenz durch Pseudonymität: Die gesamten Transaktionsdatensätze sind für die Öffentlichkeit sichtbar. Jeder Teilnehmer der Blockchain erhält eine Identifikationsnummer bzw. eine alphanumerische Adresse. Wenn ein Teilnehmer seine Identität mit anderen teilt, kann jeder die Historie seiner Transaktionen auf der öffentlichen Blockchain einsehen. [96]

4. Irreversibilität der Aufzeichnungen: Eine Blockchain besteht aus einer Kette, in der jeder Block in den nachfolgenden integriert ist. Der Transaktionsdatensatz kann nicht verändert werden. [96]

5. Computergestützte Logik: Durch die Verwendung von Algorithmen können Benutzer Transaktionen (Datensätze oder Werttransaktionen) zwischen Knoten auslösen, sogenannte Smart Contracts. [96]

Wie in Abbildung 2.21 dargestellt, baut bei einer Blockchain jeder neue Datenblock auf einem zuvor abgeschlossenen älteren Block auf und verweist auf dessen Identifikationsnummer. Pro Block kann eine gewisse Anzahl n an Transaktionen aufgenommen werden. Aufgrund der Aneinanderreihung der Blöcke und deren Verweise zueinander können ältere Blöcke nicht modifiziert werden. [93] Blöcke enthalten Kopfzeilen und Transaktionen, wie die Abbildung 2.21 verdeutlicht. Jeder Blockkopf enthält neben anderen Metadaten eine Referenz auf seinen Vorgänger.

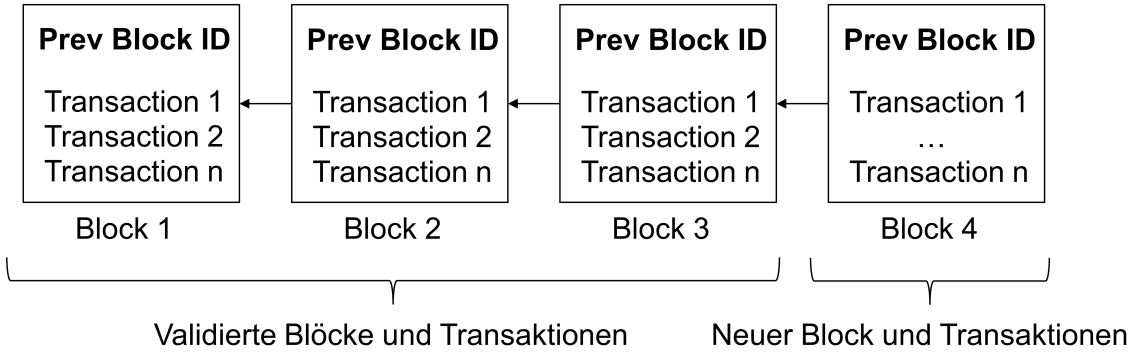


Abbildung 2.21: Daten-Struktur einer Blockchain in Anlehnung an [98] [14]

Transaktionen zwischen Teilnehmern erfordern keine Mittelsmänner oder vertrauenswürdige Drittparteien, sogenannte TTPs, wie Banken oder Zertifizierungsstellen. Stattdessen basiert die Vertrauensbildung auf programmierten Regeln, um Transaktionen zu überprüfen, zu validieren und der Blockkette hinzuzufügen, basieren auf Konsensmechanismen. Während die Zustimmung in einem zentral geführten System vorgegeben wird, wird die Konsensusbildung in einem dezentralen System eingesetzt. Zur Bildung eines Konsensus wird nach dem Ausführen einer Transaktion eine Information an alle Netzwerkteilnehmer unter Verwendung verschiedener Mechanismen verteilt. Die ausgeführte Transaktion wird der entsprechenden Blockchain z. B. durch einen sogenannten Proof of Work (PoW), dem Ausführen einer komplexen Rechenaufgabe, hinzugefügt. [93]

Ein PoW ist ein Datenstück bzw. eine Aufgabe, die mittels Try-and-Error-Methode berechnet wird, um bestimmte Anforderungen zu erfüllen. Die Besonderheit am PoW ist, dass die Ausführung dieser Aufgabe schwierig, die Überprüfung dagegen einfach ist.

PoW wurde als Konzept zur Reduzierung großer Mengen von E-Mail-Spam eingeführt. Dieses Konzept wird als Hashcash [99] bezeichnet und ist eine Methode, bei der ein PoW für den Inhalt jeder E-Mail erforderlich ist. Es ist einfach, einen PoW für eine E-Mail zu berechnen, kostet aber viel Zeit und Rechenleistung für Massen-Spam-E-Mails. [100]

Eine Transaktion in einem Blockchainnetzwerk kann vereinfacht wie folgt dargestellt werden (vgl. Abbildung 2.22) [98]:

1. Erstellen einer Transaktion.
2. Übertragen der Transaktion an ein verteiltes Netzwerk von Knoten oder Computern.
3. Validieren der Transaktion durch Knotenpunkte im Netzwerk gemäß vereinbarten Regeln (einem Konsensmechanismus).
4. Hinzufügen der validierten Transaktion zu einem neuen Block.
5. Hinzufügen des neuen Blocks zur Blockchain.
6. Verteilen des neuen Blocks an alle Knotenpunkte bzw. Teilnehmer.
7. Abschließen der Transaktion. Als Datenbank oder Kassenbuch speichert die Blockchain die Datensätze aller Transaktionen, die jemals über ein Netzwerk ausgeführt wurden.

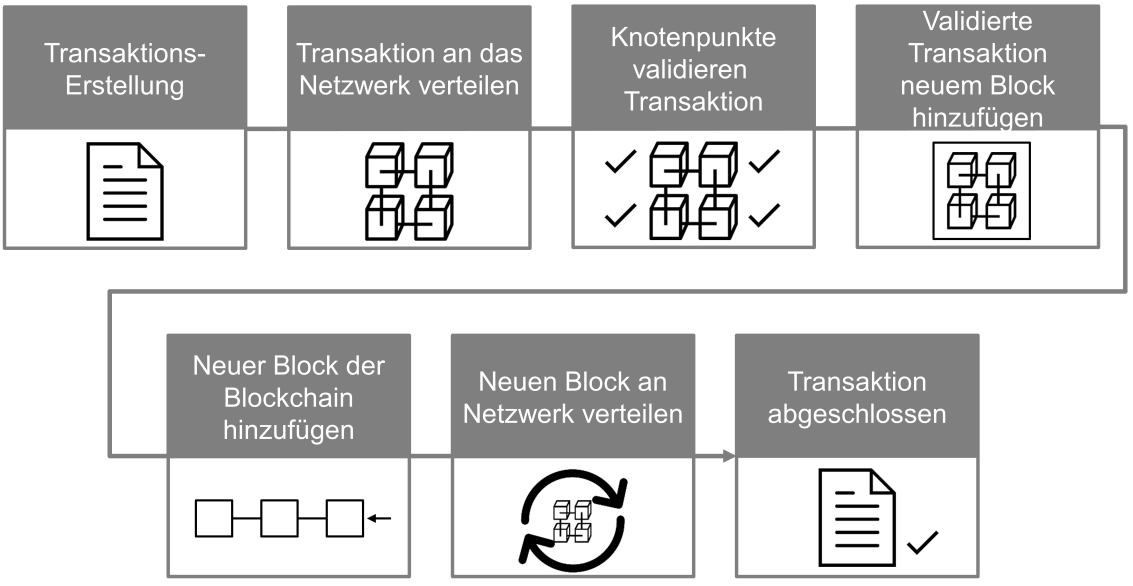


Abbildung 2.22: Ablauf einer Transaktion im Blockchain-Netzwerk in Anlehnung an [98]

Die bedeutendsten Merkmale von DLTs sind Unveränderlichkeit, Zensurbeständigkeit, dezentrale Wartung und das Entfallen einer zentralen vertrauenswürdigen Drittpartei. Mit anderen Worten: Es besteht keine Notwendigkeit, dass eine Institution für die Konfliktlösung und die Aufrechterhaltung einer globalen Wahrheit verantwortlich ist. DLTs sind aufgrund der eingesetzten Kryptografie unveränderlich, da eine rückwirkende Modifizierung der Daten nicht möglich ist [101]. Weiterhin können Daten nicht zerstört oder unterdrückt werden, weshalb sie keinerlei Zensur unterliegen [102]. DLTs eignen sich für die Erfassung des Besitzes an digitalen Vermögenswerten, hier ist bspw. die Kryptowährung Bitcoin eine der wichtigsten und bekanntesten Anwendungen. [103] [104]

Eine Herausforderung hinsichtlich der Geschwindigkeit und Skalierbarkeit von Blockchains stellt der Faktor dar, dass alle Blöcke jedem Teilnehmer bzw. jedem Node (Berechnungsknoten) bekannt sein müssen, um die entsprechenden Transaktionen zu bestätigen. [93]

Directed Acyclic Graphs am Beispiel IOTA Eine Alternative zu Blockchains sind Directed Acyclic Graphs (DAG), zu Deutsch gerichtete azyklische Graphen. Der deutlichste Unterschied zwischen DAGs und DLTs wie einer Blockchain ist, dass Transaktionen in kryptographisch verknüpften Blöcken gebündelt werden und eine einzige lange Kette bilden, während DAGs einen Graphen verwenden, indem eine Transaktion als Knoten im Graph dargestellt wird. Wie in Abbildung 2.23 dargestellt, werden Transaktionen in Knoten der DAG-Struktur gespeichert, wobei jeder Knoten eine einzige Transaktion enthält. Eine Transaktion muss im Gegensatz zu vielen Blockchainsystemen nicht zwangsweise eine Kryptowährungstransaktion darstellen, sondern kann bei einigen DAGs auch sogenannte *Zero-Value-Transaktionen*, also lediglich Datentransaktionen beinhalten. Ähnlich einer PoW-Aufgabe bei der Blockchaintechnologie wird eine Rechen- bzw. Validierungsaufgabe bei DAGs als Spamschutzmaßnahme eingesetzt.

Durch das Lösen der Ineffizienz von Blockchains ist das IOTA-Protokoll, basierend auf der DAG-Technologie, die im IOTA-Ökosystem Tangle genannt wird, das fehlende Glied für das Internet of Everything. Mittels der Bereitstellung einer sicheren und skalierbaren Transaktionsabwicklungsschicht möchte IOTA Maschinen und Menschen in die Lage versetzen, eine Maschinenwirtschaft aufzubauen, damit diese auf direktem Weg untereinander kommunizieren und handeln können. IOTA unterscheidet sich von Blockchains in dem Punkt, dass die Transaktionen nicht von speziellen Rechenknoten durchgeführt werden, sondern jeder Teilnehmer seine Transaktion selbst validiert. Während der Validierungsaufgabe, die gleichzeitig als Spamschutz dient, werden zwei vorherige Transaktionen im Tangle mittels einer Rechenaufgabe validiert (vgl. Abbildung 2.23). Darüber hinaus ist IOTA nicht auf die Abwicklung von Kryptogeldtransaktionen beschränkt.

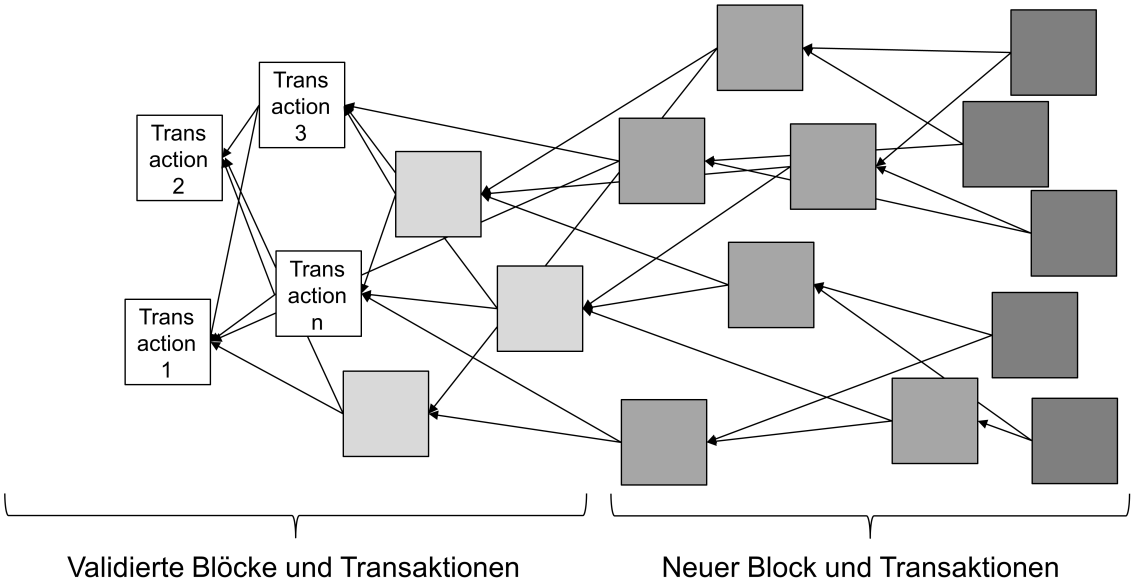


Abbildung 2.23: Datenstruktur eines Directed Acyclic Graph (DAG) [105] [14]

Es ist möglich, Informationen innerhalb einer Tangle-Transaktion sicher zu speichern oder sogar größere Mengen an Informationen über mehrere gebündelte oder verknüpfte Transaktionen zu verteilen. [105]

Eine Transaktion im IOTA-Netzwerk kann vereinfacht wie folgt dargestellt werden [106]:

1. Erstellen einer Transaktion (Empfänger, Absender, Wert und/oder Datennachricht)
2. Signieren der Transaktion (Der Eigentümer signiert die Daten mithilfe seines privaten Schlüssels.)
3. Zufällige Auswahl von Transaktionen (Es werden zwei zufällige Transaktionen im IOTA-Tangle ausgewählt.)
4. Proof of Work (Als Spamschutz wird eine Rechenaufgabe gelöst, die die zuvor ausgewählten Transaktionen validiert.)
5. Ausführen der Transaktion (Sie Transaktion wird über einen Rechenknoten an alle Nachbarn im Netzwerk verteilt. Die Transaktion wird entsprechend Schritt 3 und 4 von weiteren Netzwerkteilnehmern validiert.)

2.7 Begriffe des Toleranzmanagements

Der *Merkmalentstehungsbaum* (MEB) basiert auf zwei in der Literatur bekannten Methoden: dem *Key Characteristic Flowdown* (KCF) und der *Innovativen Prozessoptimierung* (IPO), die wiederum auf der *Theory of Constraints* (TOC), der Engpasstheorie, fußt.[3]

Key Characteristics (KC) und der *KC Flowdown* wurden zunächst von Thornton definiert und werden häufig in Forschung und Industrie zur Beherrschung von Abweichungen und den damit verbundenen Risiken eingesetzt. [107] [108] [109]

Die Idee besteht darin, sich auf quantifizierbare Merkmale - Key Characteristics - eines Produkts und dessen Baugruppe zu konzentrieren, die, wenn sie vom Soll abweichen, einen inakzeptablen Einfluss auf die Kosten, die Leistung oder die Sicherheit des Produkts haben. Das übergeordnete Ziel ist die Erfüllung der Kundenanforderungen. Sie können als Kommunikationsmittel eingesetzt werden, insbesondere wenn komplexe Produkte und Produktionsprozesse in kleineren Arbeitspaketen entwickelt werden. KCs können auf verschiedenen Ebenen auftreten, z. B. in der Montage, können aber auch dem gesamten Produkt, einem Modul oder einem einzelnen Teil zugeordnet sein. Zwischen diesen KCs bestehen Abhängigkeiten. [107] [110]

Die KCs werden im sogenannten KC Flowdown kombiniert, der die Kundenanforderungen mit steuerbaren Faktoren wie Montage-KCs verknüpft, um einen ganzheitlichen Ansatz zu generieren. Der KC Flowdown zeigt eine Baumstruktur, die sich in der Regel ausweitet und den Eindruck einer Pyramide erweckt. Der Flowdown hilft, sich auf das eigentliche Problem zu konzentrieren und sich nicht im Detail zu verlieren. Nur die KCs, die sich auf die Gesamtleistung auswirken, werden optimiert. [107] [110]

Der KC Flowdown wird top-down, bottom-up oder als Kombination aus beidem gezeichnet. Der Top-Down-Ansatz geht von den Kundenanforderungen aus, während der Bottom-Up-Ansatz auf der Wiederverwendung vorhandener Teile basiert. [110] Der Flowdown kann hinsichtlich zweier Aspekte analysiert werden: der erwarteten Abweichungen des KCs und der Sensitivität des Gesamtziels gegenüber einem bestimmten KC. Diese Analyse kann qualitativ oder quantitativ sein.

Die IPO berücksichtigt die Schwierigkeiten von Optimierung in soziotechnischen Systemen, wie z. B. der Mensch-Roboter-Kollaboration, da das Verhalten der soziotechnischen Systeme oft weder linear noch monokausal ist, sodass es keine einfache Lösung gibt. Die Optimierung gelingt nur, wenn beide Teile des Systems, Mensch und Technik,

[3] Dieses Kapitel wurde als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Schirmer, L. and Masiak, T.: Tolerance Management in a Semi-Automated and Collaborative Human-Robot Aircraft Riveting Process, SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2019-01-1373, 2019.

berücksichtigt und in beiden Systemen Maßnahmen ergriffen werden. In der IPO gilt: Prozessinnovationen sind ebenso wichtig wie Produktinnovationen.

Die Grundidee für die IPO ähnelt der Theory of Constraints: (Produktions-)Systeme bestehen aus Prozessketten, bei denen die Gesamtleistung des Systems nur so gut ist wie das schwächste Glied. Um die Leistung des Systems zu optimieren, muss der Engpass gefunden werden, indem das gesamte System analysiert und das schwächste Glied gestärkt wird. Die Methoden verwenden quantifizierbares Wissen, z. B. Sensordaten, und nicht quantifizierbare Daten, z. B. Expertenwissen. [111]

Der *MEB* verwendet die Grundidee und die Umsetzung der *Key Characteristics* sowie des *KC Flowdowns*, jedoch innerhalb der Philosophien des *MEBs*. Der Baum beschreibt die Eigenschaften des Produktes, des Produktionsprozesses und der Produktionsanlagen sowie deren Zusammenhänge und Wechselwirkungen. Daher zeigt der MEB die Zusammenhänge zwischen Prozessergebnissen, d. h. Symptomen eines Variationsproblems, und Prozessvariablen, d. h. Ursachen. Ein wichtiger Aspekt des MEBs ist die Berücksichtigung der Messunsicherheit als eine Quelle der Abweichungen.

Wie beim KC Flowdown zielt der MEB darauf ab, die interdisziplinäre Kommunikation zu unterstützen, indem er Kundenanforderungen (wobei sich *Kunde* sowohl auf den Endkunden als auch auf einen Prozesskunden beziehen kann) und steuerbare Faktoren in der Produktion kombiniert, die interdisziplinäre Diskussion durch Visualisierung verbessert und den Top-Down und Bottom-Up-Ansatz verfolgt. Eine weitere Idee, die aus dem KC Flowdown übernommen wurde, ist, dass die Zeichnung des MEBs keine Verpflichtung zur Optimierung beinhaltet. Darüber hinaus übernimmt der MEB Philosophien aus dem IPO-Ansatz: Der Fokus liegt auf Mensch und Maschine, der Erkenntnis, dass Prozesseigenschaften ebenso wichtig sind wie Produkteigenschaften, der Kombination von quantifizierbaren und nicht quantifizierbaren Merkmalen, dem Aufzeigen von Ursachen und dem Systemoptimum sowie dem Erkennen von Umsetzungsbarrieren.

Der MEB besteht aus quantifizierbaren und nicht quantifizierbaren Merkmalen, da insbesondere der Mensch und seine Auswirkungen auf den Prozess nicht quantifizierbar, aber in Montageprozessen von entscheidender Bedeutung sind. Die Analyse kann kausal sein und z. B. das Aussehen des Baumes betreffen, oder sie kann statistisch sein und z. B. die Berechnung von Toleranzketten beinhalten.

Zusammenfassend zielt der MEB darauf ab, Wissen zu reduzieren und zu bündeln, um so zur Lösung der relevantesten Variantenprobleme beizutragen und einen einfachen Einstieg in das Toleranzmanagement zu ermöglichen, indem er es überschaubarer und benutzerfreundlicher macht. [112]

2.8 Produktbetrachtung und Szenario für die Mensch-Roboter-Kollaboration

Als Entwicklungs- und Validierungsszenario werden im Folgenden als Beispielprodukt der AIRBUS A320 und dessen Produktionsprozesse und Betriebsmittel betrachtet.[4]

Produkt Die Struktur eines Flugzeugs kann in mehrere Sektionen unterteilt werden, die Abbildung 2.24 deutlich macht. Das Cockpit des Flugzeugs wird als Sektion 11/12 bezeichnet, während die Abschnitte 13-18 den Flugzeugrumpf bilden, der den Passagierbereich darstellt. Die horizontalen und vertikalen Leitwerke sind an der Sektion 19 montiert, dem hinteren Abschnitt des Flugzeugs, der das Ende des Passagierbereichs bildet und diesen mit einer Druckkalotte abschließt. Die Druckkalotte fungiert als Trennung zwischen Passagierbereich und der Sektion 19 (vgl. Abbildung 2.24 rechts). In dieser Arbeit wird die Montage der Single-Aisle-Sektion 19 (SA) und der entsprechenden Druckkalotte für die Zivilflugzeugfamilie Airbus SA, dem Airbus A320, untersucht. Single Aisle ist Englische Bezeichnung für ein Flugzeug mit nur einem Kabinengang. Bei der Montage muss die Druckkalotte zur Sektionstonne montiert werden. Der Bereich ist in Abbildung 2.24 links rot markiert. Derzeit findet der Montageprozess mit einer großen Anzahl von Nieten (ca. 1000 Stück) statt, die von zwei Mitarbeitern manuell gefügt werden. Der in Abbildung 2.24 links orange markierte Bereich kennzeichnet die überlappenden Nietpositionen von Druckkalotte und Ringspant an der Sektionstonne. Die Sektionen bestehen aus zusammengesetzten Schalenelementen, die wiederum mit Spanten und Stringern verstärkt werden. [113]

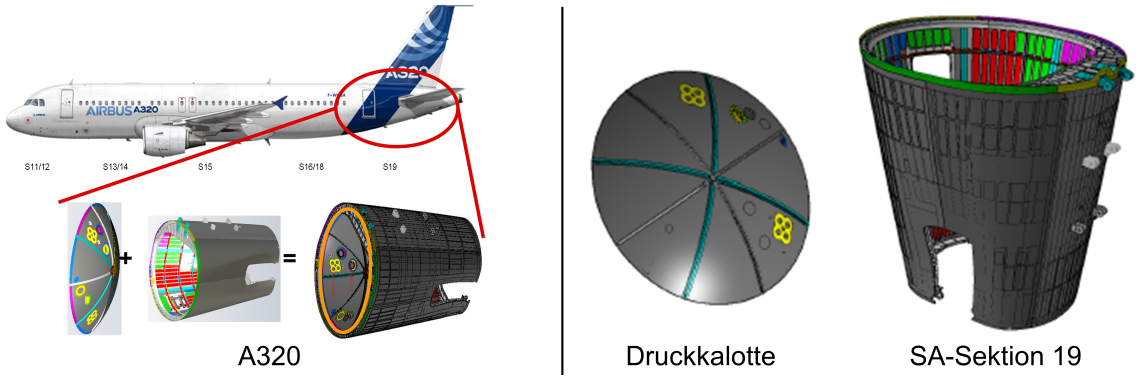


Abbildung 2.24: Flugzeugstruktur des Airbus A320 mit seinen verschiedenen Sektionen (links) und dem Teilabschnitt Sektion 19, bestehend aus der Druckkalotte und der Sektionstonne (rechts) in Anlehnung an [114] [115] [116].

[4] Abschnitte dieses Kapitels wurden als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Kanso, A. and Masiak, T.: Collaboration in a Hybrid Team of Human and Robot for Improving Working Conditions in an Aircraft Riveting Process, SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2019-01-137, 2019.

Die Flugzeugproduktion kann entsprechend Abbildung 2.25 in Vormontage, Sektionsmontage, die abschließende Oberflächenbeschichtung und nachgelagert in die Endmontage gegliedert werden. Während in der Vormontage die Schalenelemente mit Stringern, Spanten, Clips und weiteren Anbauteilen ausgestattet werden, gilt es in der Sektionsmontage, die aus Teilschalen bestehende Halbtonne zu einer vollständigen Sektionstonne zusammenzusetzen. Der zuvor genannte Fügeprozess der Druckkalotte zur Sektionstonne findet in der Sektionsmontage in Form der Baustellenmontage statt. Die Baustellenmontage beschreibt einen stationären Zustand des Montageobjektes sowie des Montagepersonals. Aufgrund der notwendigen Zugänglichkeit von allen Seiten und der Zuführung einer großen Anzahl von Einzelteilen und Betriebsmitteln beansprucht die Baustellenmontage einen hohen Platzbedarf. [19] Im Fall der Montagearbeiten an der Sektion 19 bedeutet dies, dass aufgrund der großen Bauteildimension Racks und Hubeinheiten benötigt werden, um die Zugänglichkeit für die Werker zu gewährleisten.

Nach dem Austakten des Bauteils aus dem Bereich der Sektionsmontage finden Oberflächenbeschichtungen und Konservierungsprozesse statt. In der Endmontage werden die einzelnen Sektionen, also große Elemente wie der Rumpf, Leitwerke, Flügelkasten, Triebwerke und weitere Elemente zusammengesetzt und in Betrieb genommen.

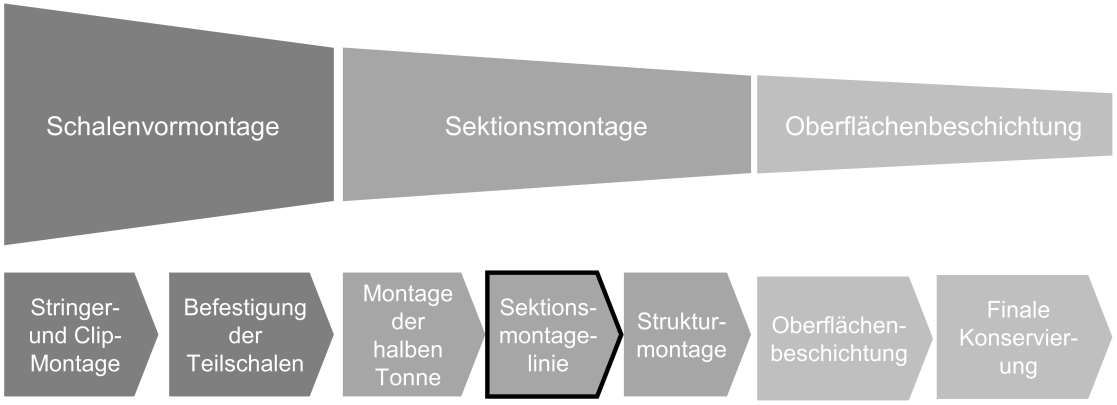


Abbildung 2.25: Darstellung des Produktionsablaufes von der Stringer- und Clip-Montage bis zur finalen Konservierung in Anlehnung an [116]

Montageprozess Die Flugzeugmontage ist ein äußerst komplexer Prozess, der zahlreiche technische Herausforderungen mitbringt. Dazu gehören die Beherrschung großer Produktabmessungen, die Produktvielfalt, das Einhalten geringer Toleranzen und die Bewältigung einer Vielzahl an verschiedenen Aufgaben. Diese Herausforderungen machen ein vollautomatisches System sehr kostenintensiv und unflexibel für die Praxis. Daraus folgt, dass viele Montageaufgaben in der Flugzeugstrukturmontage noch immer manuell durchgeführt werden, z. B. die Montage der Druckkalotte zur Sektionstonne

bzw. zum Ringspant (namentlich Ringspant C70). Wie in Abbildung 2.26 veranschaulicht, müssen zwei Werker bei der Durchführung dieser Aufgaben zusammenarbeiten, wobei sich einer auf die Druckkalotte und einer in die Sektion 19 begibt. Vorbereitende Aufgaben für den Nietprozess sind das Vorbohren, Aufbohren, Senken, De- und Montieren sowie das Auftragen von Dichtmaterial auf Hunderte von Nieten. Im Anschluss kann der Nietprozess durchgeführt werden. Der Werker auf der Außenseite muss die Nietpositionen identifizieren, den Niet einsetzen und den Niethammer bedienen. Der zweite Werker, im Inneren der Sektion, positioniert den Amboss und drückt diesen während des Nietprozesses gegen den Nietschaft. Um die Zugänglichkeit des Arbeitsraumes zu gewährleisten, benötigt der Werker außerhalb der Sektion ein Gestell, während der Bediener auf der Innenseite eine Hebevorrichtung benötigt. Zusätzlich zur schlechten Ergonomie, bedingt durch Überkopfarbeiten und ungünstige Körperhaltungen, besteht eine hohe Lärm- und Vibrationsbelastung durch das Nietwerkzeug im Inneren der Sektion für eine Prozesszeit von ca. 3-4 Stunden. Die Arbeit ist daher als monoton und anstrengend zu bewerten. Darüber hinaus begrenzt der Geräuschpegel die Kommunikation zwischen den Bedienern auf eine Reihe von Klopfsignalen, was die Effizienz des Prozesses weiter reduziert.

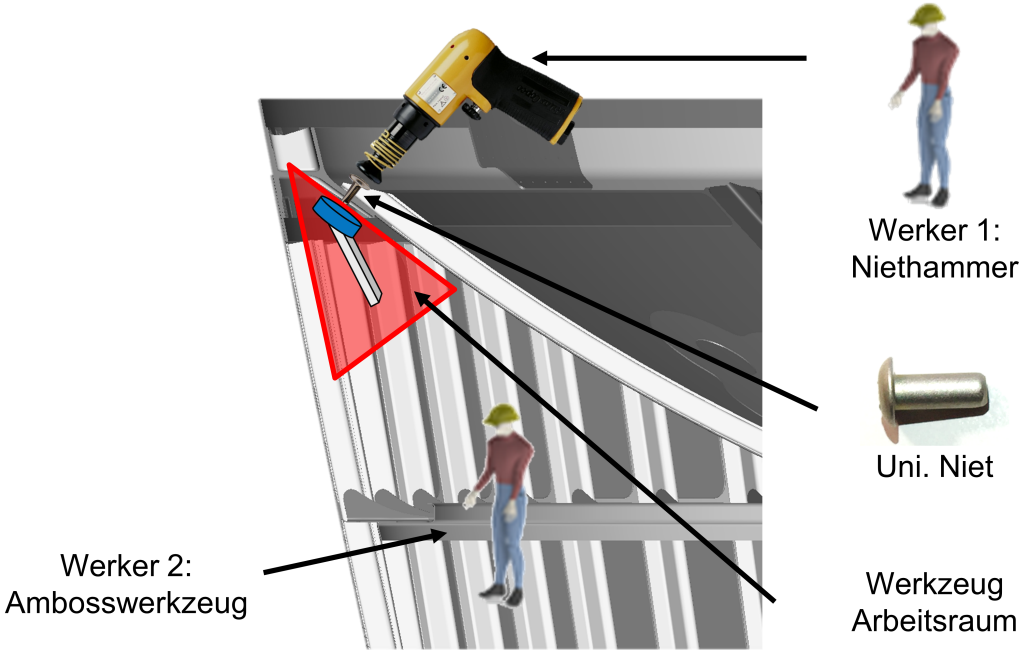


Abbildung 2.26: Schnittdarstellung des aktuellen manuellen Mensch-Mensch-Nietverfahrens während der Montage der Sektion 19 in Anlehnung an [114]

Betriebsmittel Wie zuvor angemerkt, finden ein Niethammer, Niete und ein Amboss Verwendung während der Prozessausführung. Der pneumatische Niethammer, vgl. Abbildung 2.27 links, unterscheidet sich je nach Nietverbindung im Kolbendurchmesser,

Schlagfrequenz, Kolbenhub, Schlagkraft sowie Form des Griffes. Aufgrund der hohen Schlagkraft von bis zu 200 N und einer regulierbaren Schlagfrequenz zwischen ca. 15-30 Hz, abhängig vom Luftdruck zwischen 6-7 bar, treibt der Niethammer im Zusammenspiel mit dem Amboss, auch als Gegenhalter bezeichnet (vgl. Abbildung 2.27 rechts), den Niet mittels eines Kaltumformprozesses ein.

Der Amboss wird für die Gegenhalteaufgabe benötigt und ist zumeist ein Stahlelement, das während des Nietprozesses vor bzw. auf dem Nietschaft positioniert wird. Durch die Krafteinleitung des Niethammers in den Niet schlägt der Nietschaft auf die Ambossoberfläche und verformt sich. Die Kraft des Niethammers wird nicht vom umliegenden Material absorbiert, sondern vom Niethammer durch den Niet in den Amboss geleitet und dort aufgenommen. Je nach Nietdurchmesser kommen Gegenhaltegewichte zwischen 1 bis 4 kg zum Einsatz. Zudem wird die Ambossoberfläche gehärtet und poliert, um Einkerbungen zu vermeiden, wenngleich das Material nicht zu hart sein darf, damit es nicht zersplittert. [117]

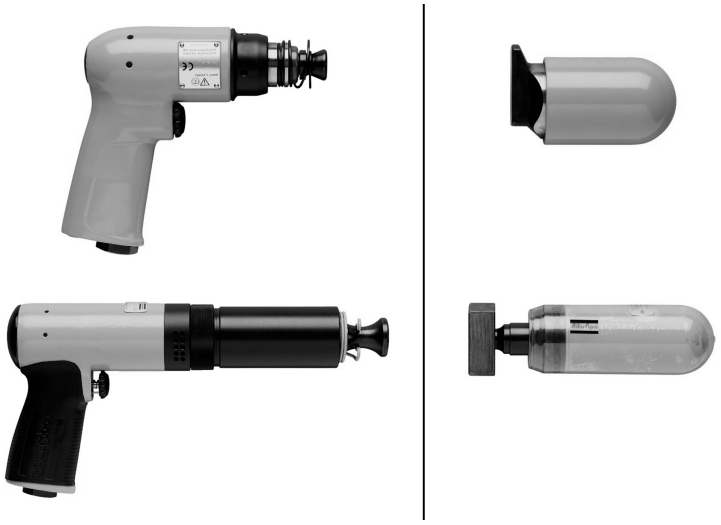


Abbildung 2.27: Verwendete Betriebsmittel im Nietprozess: Verschiedene Ausführungen eines Niethammers (links) und eines Ambosses/Gegenhalters (rechts) [119]

Nietprozess Das Nieten zählt zu den Montageverfahren aus der Gruppe des *Fügens*, genauer gesagt der Untergruppe *Fügen durch Umformen*, und bezeichnet das feste oder bewegliche Verbinden eines oder mehrerer Bauteile mithilfe eines Hilfsfügeteils, dem Niet. Der Niet wird während des Fügeprozesses plastisch verformt und bildet durch den Formschluss eine Verbindung der Bauteile. [118] Nachfolgend werden vorbereitende Aufgaben, Nomenklaturen und Spezifikationen des Nietprozesses beschrieben.

Nietnomenklatur und Nietprozess Vollniete sind die am häufigsten verwendeten Niete im Flugzeugbau. Sie bestehen aus einem Fertigungskopf, einem Schaft und einem Stauchkopf. Wie die Abbildung 2.28 zeigt, dehnt sich der Nietschaft durch das Stauchen aus und füllt das Nietloch.

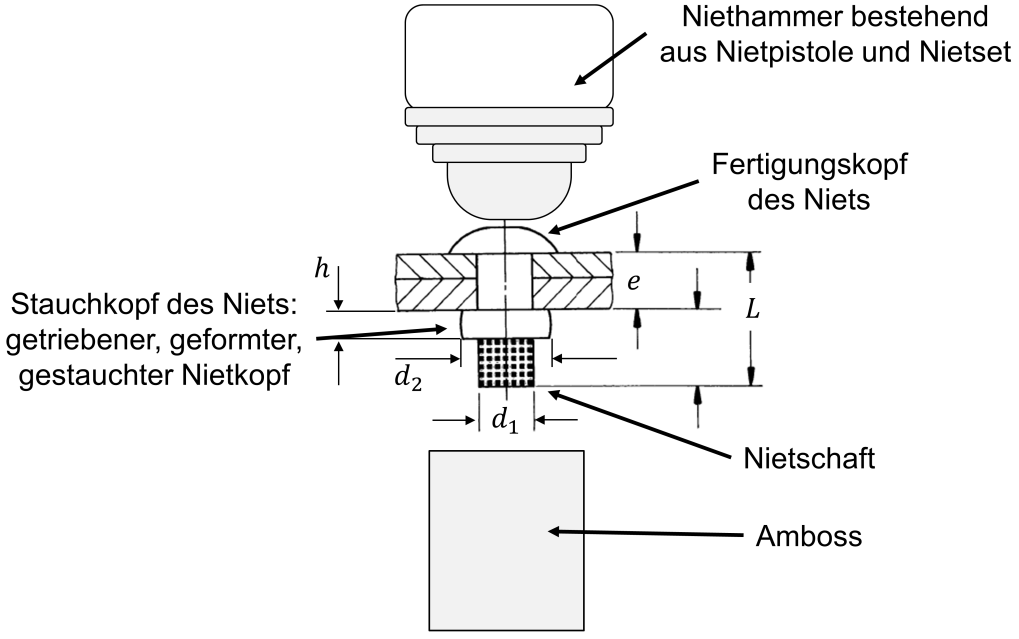


Abbildung 2.28: Begriffe des Nietprozesses [120] [23]

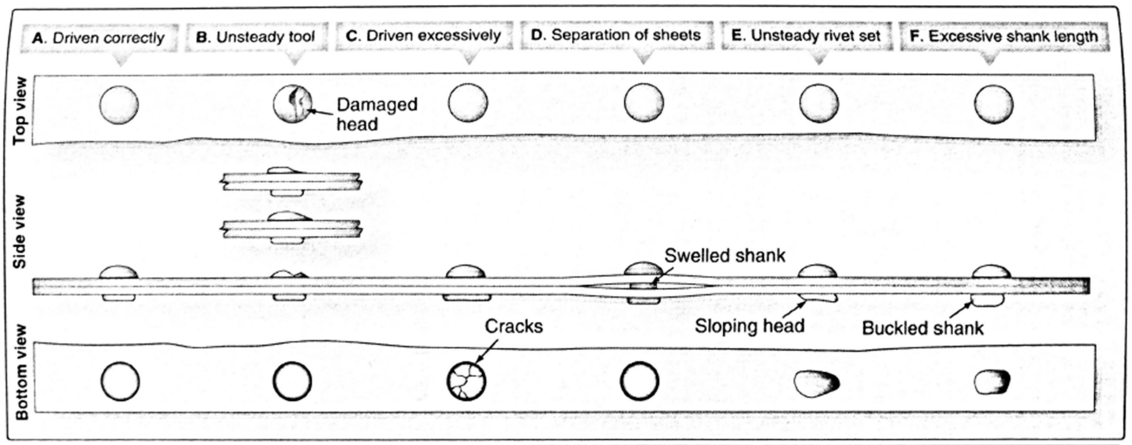
Eine den Nietprozess vorbereitende Aufgabe ist es, den richtigen Nietsatz (Nietstempel) in den Niethammer einzusetzen und diesen mit einer Haltefeder zu fixieren. Mithilfe des Luftdruckreglers am Niethammer kann dieser entsprechend des jeweiligen Niets eingestellt werden.

Während des **Nietvorgangs** positioniert der zweite Werker den Amboss vor dem Nietschaft. Durch das Aktivieren des Niethammers erfolgt das Kaltformen des Nietschaftes. Eine positive Nietung erfolgt bei richtigem Timing und senkrechter Positionierung des Niethammers bzw. Ambosses.

An vielen Stellen einer Flugzeugstruktur ist der Zugang zu den Nieten sowohl räumlich als auch visuell eingeschränkt. Um den Amboss senkrecht zum Niet auszurichten, gleichzeitig Strukturelemente des Flugzeuges nicht zu beschädigen und gute Nietergebnisse zu erzielen, sind ausgebildete Experten und gute Teamarbeit erforderlich. Bei der abschließenden Inspektion kommen Schieblehre, Hammer, Spiegel und die Erfahrung der Werker zum Einsatz. Da sich beide Werker während der Prozessausführung möglicherweise nicht sehen, wurde ein Klopfcode zur Kommunikation eingeführt. Einmal Klopfen mit dem Amboss auf den Niet bedeutet: Starten oder Fortsetzen des Eintreibens des

Niets. Zweimal Klopfen auf den Niet bedeutet: Der Niet ist zufriedenstellend. Dreimal Klopfen auf den Niet bedeutet: Der Niet ist unbefriedigend und muss entfernt werden. Neben dieser klassischen Kommunikation haben moderne Kommunikationsmethoden wie Funkgeräte den Informationsaustausch zwischen beiden Werkern verbessert. [23]

Während der **Inspektion** werden die Nietköpfe auf mehrere Kriterien geprüft. Der Nietkopf muss eine gleichmäßige Oberfläche haben, frei von Werkzeugspuren und ohne Spalt zwischen dem Nietkopf und dem Strukturelement sein. Die Oberfläche um den Nietkopf darf keine Risse aufweisen, und der Nietkopf selbst darf nicht zersplittert sein. Dargestellt sind diese und weitere typische Fehler in Abbildung 2.29.



	Imperfection	Cause	Remedy	Action
A	None	None	None	None
B	Cut head	Improperly held tools	Hold riveting tools firmly against work	Replace rivet
C	Excessively flat head, resultant head cracks	Excessive driving, too much pressure on bucking bar	Improve riveting technique	Replace rivet
D	Sheet separation	Work not held firmly together and rivet shank swelled	Fasten work firmly together to prevent slipping	Replace rivet
E	Sloping head	a. Bucking bar not held firmly b. Bucking bar permitted to slide and bounce over the rivet	Hold bucking bar firmly without too much pressure	Replace rivet
F	Buckled shank	Improper rivet length, and E above	E above and rivet of proper length	Replace rivet

Abbildung 2.29: Typische Fehler, die während des Nietprozesses auftreten können [23]

Neben der optischen Prüfung müssen zudem die Dimensionen des Niets entsprechend der Spezifikation überprüft werden. [120] Die Dimensionen des gefertigten Niets sind abhängig von den Dimensionen des Nietloches und des verwendeten Niets. Basierend auf dem Durchmesser d_1 des Nietloches (2.28) sowie der Dicke e (2.28) der beiden zu verbindenden Strukturelemente kann mit den Gleichungen 2.19 und 2.20 die Länge L des Nietschaftes (2.28) des zu verwendenden Niets berechnet werden.

$$\text{für } d_1 > 4mm \text{ gilt } L = e + 1,3 \cdot d_1 \tag{2.19}$$

$$\text{für } d_1 \leq 4mm \text{ gilt } L = e + 1,5 \cdot d_1 \tag{2.20}$$

Für den in dieser Arbeit verwendeten Anwendungsfall wird zur Berechnung der Vernietung der Druckkalotte mit der Sektion 19 mit einem Lochdurchmesser $d_1 = 4mm$ und einer Strukturdicke $e = 4mm$ nach Gleichung 2.20 eine Nietschaftlänge von $L = 10mm$ berechnet. Aus der Spezifikation [120] ergeben sich die Toleranzen zu $d_{2,min} = 5,6mm$, $d_{2,max} = 7,5mm$, $h_{min} = 1,3mm$ und $h_{max} = 2,6mm$, vgl. Abbildung 2.28.

Beim **Entfernen von fehlerhaften Nietverbindungen**, da diese z. B. Beschädigungen aufweisen oder nicht den Spezifikationen entsprechen, wird der Kopf aufgebohrt und der Schaft ausgestanzt, wie in Abbildung 2.30 ausführlich dargestellt.

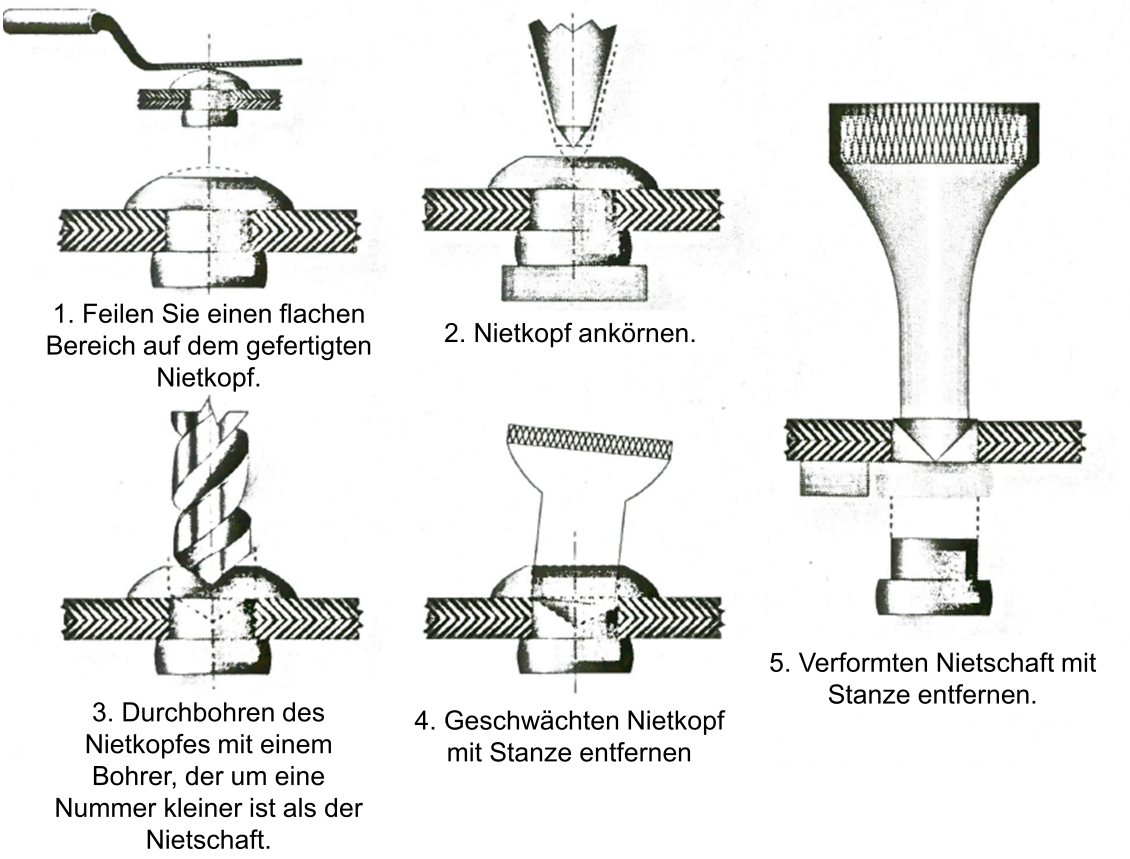


Abbildung 2.30: Verfahren zum Entfernen von fehlerhaften Nietverbindungen [23]

Die Vorgehensweise ist wie folgt: 1. Zunächst wird der Nietkopf flach angefeilt. 2. Mithilfe einer Punze wird der Niet zentrisch gekörnt. Dazu wird ein Amboss auf der Gegenseite hinterlegt, um Deformationen in der Flugzeugstruktur zu vermeiden. 3. Im nächsten Schritt wird der Nietkopf mit einem 1/32 kleineren Bohrer als der Nietschaft aufgebohrt. Im 4. und 5. Schritt wird der Nietkopf sowie der geformte Nietschaft herausgeschlagen. [23]

Nietvorbehandlung Die Niete bestehen aus einer Aluminiumlegierung 2017 (auch als 2017A bezeichnet), die sich aus 91,5 % bis 95,5 % Aluminium, 3,5 % bis 4,5 % Kupfer und meist aus vernachlässigbaren Spuren von Eisen (max. 0,7 %) und anderen Metallen (max. 0,4 %) zusammensetzt. Die Niete müssen viele Prozesse durchlaufen, um den Industriestandards zu entsprechen, bevor sie in der Anwendung eingesetzt werden können. Diese Prozesse umfassen: Beizen, Wärmebehandlung, Abschrecken, Gelbchromatierung und eine abschließende richtige Lagerung. [121]

Der erste Schritt bei der Behandlung der Niete ist die Säuberung von Unreinheiten, die von der Herstellung oder anderen Quellen stammen können. Dies geschieht in einem Prozess namens Beizen. Die Niete werden in eine Lösung getaucht, die typischerweise starke Säuren wie Salz- oder Schwefelsäure enthält. Die Lösung enthält in der Regel auch einen Korrosionsschutz. Der Industriestandard für 2017A-Niete verlangt eine Wärmebehandlung, d. h. die Niete werden für 30 bis 35 Minuten lang auf 495°C (748 K) erhitzt. Ziel dieses Prozessschrittes ist es, die in den Nieten aufgebauten Spannungen zu beseitigen. Weiterhin sind die Niete einfacher zu verformen, wodurch die Belastung der Betriebsmittel reduziert werden kann. Die schnelle Abkühlung der Niete erfolgt unmittelbar nach der Wärmebehandlung. Dies wird als Abschrecken bezeichnet und muss innerhalb von 15 Sekunden nach dem Herausnehmen der Niete aus dem Ofen erfolgen. Die Niete werden in Wasser bei 25°C (298 K) abgeschreckt. Nach dem Abschrecken sind die Niete aufgrund ihrer Legierungen weich und können leicht verformt werden. Sollten die Niete nicht unmittelbar nach der Behandlung verwendet werden, müssen diese in einem kühlen Behälter gelagert werden. Die Temperatur des Aufbewahrungsortes sollte bei -18°C oder weniger liegen und eine Lagerdauer von 7 Tagen nicht überschreiten, um ein Aushärten der Niete zu unterbinden, da der Festigkeitszuwachs erst nach der Montage der Niete erwünscht ist. Die Aufbewahrung bei niedrigen Temperaturen verlangsamt diesen Prozess. Weiterhin lassen sich die Niete im vorbehandelten Zustand einfacher verformen. [116]

Anwendungsbeispiel aus der Industrie Abschließend werden (teil-)automatisierte Nietkonzepte aus der Flugzeugproduktion aufgezeigt. Hauptziel der (Teil-)Automatisierung in diesem Prozess ist neben der Verbesserung der Ergonomie für die Werker die

Steigerung der Produktqualität und der Effizienz sowie teilweise die Umstellung von periodisch getakteten Bewegungsabläufen zum Fließbetrieb.

Abbildung 2.31 dient zur Lokalisierung der nachfolgenden Beispiele. Diese finden bspw. in der Vormontage während dem Fügen von Stringern, Spanten und Teilschalen oder im Rahmen der Sektionsmontage beim Zusammenfügen der einzelnen Sektionen statt.

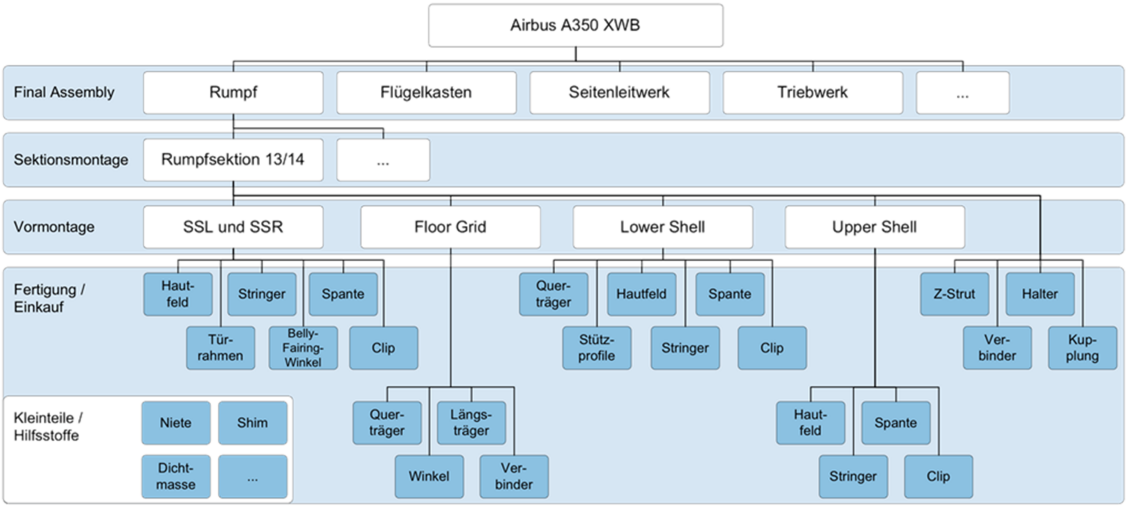


Abbildung 2.31: Struktureller Aufbau eines Airbus A350 [115]

Bei dem jüngsten Beispiel handelt es sich um das automatisierte Zusammenfügen von Sektionen mittels Robotern im Airbus-Werk in Hamburg (vgl. Abbildung 2.32). Bereits in der Vergangenheit verwendete AIRBUS in der Sektionsmontage das als *Flextrack* bezeichnete System zum Bohren von Nietlöchern. Nachgelagert erfolgt in der neuen Station das automatisierte Zusammenfügen der Rumpf- und Hecksektionen, dazu Bohren, Senken und Setzen die Roboter ca. 3000 Niete. Um den hohen Toleranzanforderungen gerecht zu werden, wird die Position der Sektionen, aber auch die der Roboter mittels Lasermessungen überwacht. Das Zusammensetzen wird zudem von Werkern begleitet. [122]

Des Weiteren zeigte bereits Vette-Steinkamp [35] entsprechend Abbildung 2.33 auf, wie die Firma Brötje-Automation eine *Pulse Motion Line* beim Flugzeuglieferanten Premium Aerotec aufbaute. Neben der Anforderung, einzelne Maschinen und Prozesse zusammenzufassen und manuelle Arbeitsplätze sowie Roboterstationen zu integrieren, gilt es auch, in der Pulse Motion Line Nietprozesse zu automatisieren. [123] In dieser Anwendung wird eine Flugzeugschale des A350 mit Spanten aufgerüstet. Das Fügen der Spanten zur Teilschale erfolgt automatisiert in einer stationären Nietanlage.

Die existierenden Systeme zum Durchführen von (teil-)automatisierten Nietprozessen in der Flugzeugproduktion zeigen den Bedarf nach einem höheren Automatisierungsgrad,

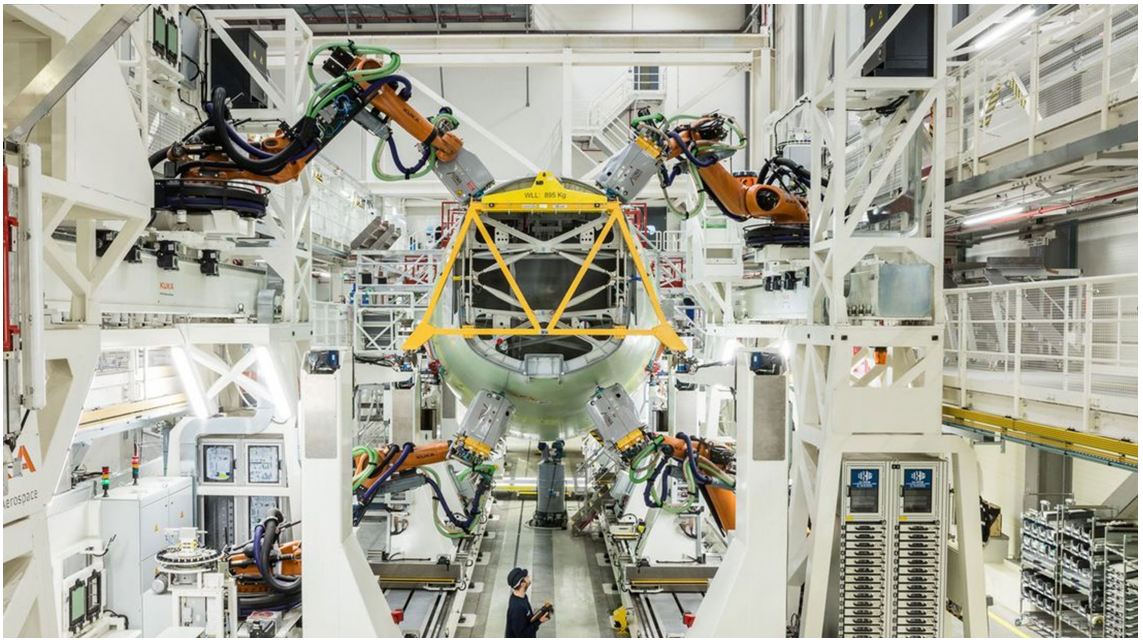


Abbildung 2.32: Automatisierung mit Robotern im Hangar 245 bei Airbus in Hamburg [115]

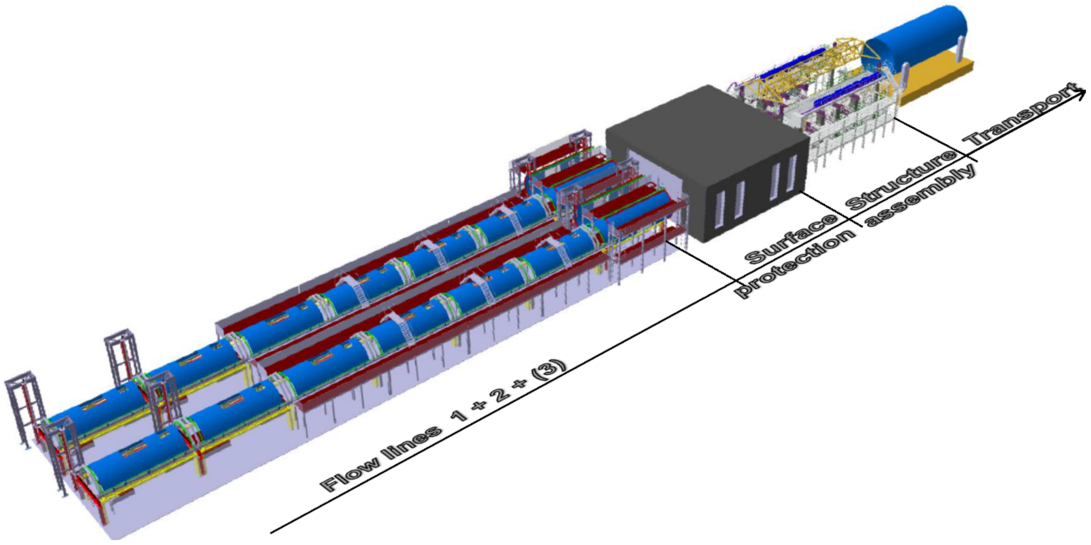


Abbildung 2.33: Darstellung einer Fließmontage von der Schalenmontage bis zur Sektionsmontage [116] [35]

der ergonomischen Entlastung der Werker, der Steigerung der Qualität, um gleichzeitig dem internationalen Wettbewerb standzuhalten. Während die zuvor aufgezeigten Stationen erste erfolgreiche Automatisierungsergebnisse der Flugzeugbranche aufzeigen, werden Großteile weiterhin in manuellen Tätigkeiten von Experten durchgeführt.

Herausforderungen sind große Bauteildimensionen, geringe Montagetoleranzen und schwer zugängliche Prozessarbeitsräume für die Werker. Weiterhin existieren Arbeitsschritte,

die aktuell unter Verwendung von schweren Prozesswerkzeugen manuell durchgeführt werden müssen. Voll automatisierte Stationen stoßen schnell an ihre Grenzen oder erzielen nicht die geforderten Genauigkeiten. Dies musste bspw. Boeing in der automatisierten Sektionsmontage des Rumpfes der 777X Twin-Aisle erfahren. Bei der Roboterlinie *Pulse Production Line*, auch bekannt unter der Bezeichnung *Fuselage Automated Upright Build*, kurz FAUB, sollten Roboter an den vorderen und hinteren Sektionen arbeiten und je Boeing 777 Rumpf bis zu 60.000 Verbindungselemente fügen (vgl. Abbildung 2.34). [124] Die Station war zu unflexibel, beschädigte Rumpfteile oder fügte die Teilschalen nicht vollständig zusammen. Als Konsequenz wurde die Station zurückgerüstet und die Arbeiten wurden wieder manuell von Werkern durchgeführt. [124] [125]



Abbildung 2.34: Roboter-Nietsystem für Boeing 777-Rumpfmontage von KUKA Systems [124]

Im folgenden Kapitel werden Konzepte zur Teilautomatisierung von Fügeprozessen in limitierten Arbeitsräumen während der Montage zur Flugzeugsektion aufgezeigt, die die Werker in der Prozessausführung entlasten. Mithilfe der implementierten Sensoren im teilautomatisierten Nietsystem werden Möglichkeiten zur automatisierten Qualitätssicherung unter Verwendung von Algorithmen Künstlicher Intelligenz vorgestellt. Abschließend wird durch den Einsatz der Blockchaintechnologie eine digitale Buchführung zur Steigerung der Datenintegrität vorgestellt. Abgerundet werden die Konzepte durch natürliche und intuitive Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Maschine. Für die erfolgreiche Umsetzung dieser Applikation, d. h. den zu beginn stattfindenden Produkt-Prozess-Betriebsmittel Analysen und den nachfolgenden Prototypen Entwicklungen, erfolgt die Anwendung des V-Modells zur Absicherung der Implementierungen und dem Zusammenspiel der jeweiligen Komponenten.

Kapitel 3

Vorgehen zum Systementwurf und Konzept

Ausgehend von der Forschungsfrage und den dazugehörigen Thesen wird anhand eines Vorgehensmodells die Entwicklung des teilautomatisierten Konzeptes vorangetrieben.

Der Betrachtungsbereich liegt in der Montage von Großbauteilen in der Flugzeugproduktion. Wie eingangs beschrieben sind große Bauteildimensionen, kleine Toleranzen, aber auch eine große Variantenvielfalt und die Organisation einer Vielzahl an Aufgaben grundlegende Herausforderungen der Flugzeugproduktion. Weiterhin sollen die Werker bezüglich Ergonomie entlastet und die Nachverfolgbarkeit der Prozesse gesteigert werden.

Zunächst wird das angewandte Vorgehensmodell während der Entwicklung der einzelnen Komponenten aufgezeigt. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung des entwickelten Konzeptes eines teilautomatisierten Nietprozesses.

3.1 Vorgehen in der Applikationsentwicklung

Ein wichtiger Punkt in der Umsetzung dieser Arbeit ist das Zusammenwirken von mechatronischen Systemen. Nach VDI 2206 zeichnen sich mechatronische Systeme durch die funktionale und/oder räumliche Integration von Sensoren, Aktoren und der Informationsverarbeitung aus [126]. Die Entwicklung und Realisierung des geplanten Konzeptes beinhaltet neben mechanischen und elektrotechnischen Aufgabenstellungen eine Vielzahl an softwaretechnischen Aufgaben aus dem Bereich der Informatik.

Das in der Umsetzung angewandte Vorgehensmodell für die Entwicklung der einzelnen Komponenten soll nachfolgend vorgestellt werden, gefolgt von den angewandten Methoden in Kapitel 4 und den entwickelten Konzepten in Kapitel 5, die im Anschluss validiert werden.

Während der Analysephase wird die Methode **Produkt - Prozess - Betriebsmittel** angewandt (vgl. Abbildung 3.1). Dieser ganzheitliche Planungsansatz für die Entwicklung von Montageprozessen betrachtet die Abhängigkeiten zwischen dem Produkt, dem Prozess und den Betriebsmitteln. Nach einer detaillierten Analyse des Produktes und des bisherigen Montageprozesses können (Teil-)Automatisierungskonzepte sowie die Anforderungen an die zu verwendenden Betriebsmittel abgeleitet werden.

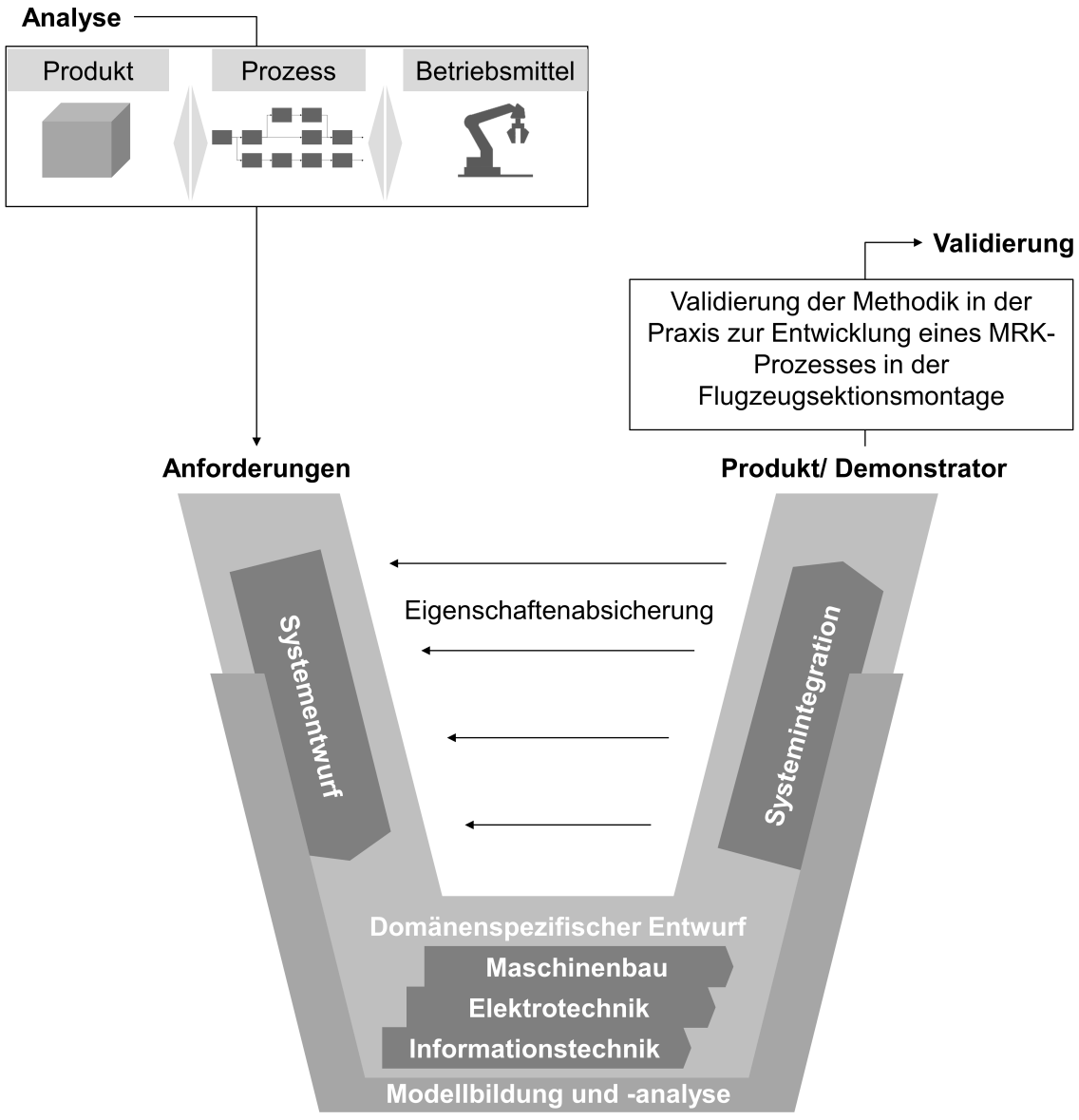


Abbildung 3.1: Angewandtes V-Modell für die Konzeption einer MRK-Station für die Großbauteilmontage in der Flugzeugsektionsmontage in Anlehnung an [126]

Zu Beginn des ausgewählten Vorgehensmodells, dem V-Modell, stehen als Ausgangspunkt die **Anforderungen**, die aus der vorherigen Analyse abgeleitet und als Eingabedaten verwendet werden. Die Aufgaben werden als detaillierte Anforderungen zusammengefasst und setzen den Maßstab zur abschließenden Bewertung. [126]

Der **Systementwurf** fasst die gestellten Anforderungen in einer abstrahierten und lösungsneutralen Form zusammen. Aus diesem kann ein domänenübergreifendes Lösungskonzept abgeleitet werden. Ein wichtiger Schritt ist die Zerlegung der Gesamtfunktion des Systems in Teilfunktionen, denen wiederum geeignete Lösungselemente zugeordnet werden, deren Funktionserfüllung geprüft werden kann. [126]

Die Konkretisierung der zuvor erstellten Lösungskonzepte erfolgt nachfolgend meist in getrennten Domänen. Hier wird eine Untergliederung in die Domänen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik vorgenommen. Der Detaillierungsgrad des **domänen-spezifischen Entwurfs** nimmt an dieser Stelle zu, um die Erfüllung der Funktionen zu gewährleisten. [126]

Während der **Systemintegration** werden die Ergebnisse aus den einzelnen Domänen zusammengetragen und zu einem Gesamtsystem, hier einem Forschungsdemonstrator, zusammengeführt. Ziel ist es, das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten zu untersuchen. [126]

Die **Absicherung der Eigenschaften** erfolgt kontinuierlich mittels eines Abgleichs anhand des Lösungskonzeptes und der gestellten Anforderungen, die mit den Systemeigenschaften übereinstimmen müssen. [126]

Mithilfe von rechnergestützten Werkzeugen und Simulationen der Montageaufgaben werden die beschriebenen Phasen von **Modellbildung und Modellanalyse** begleitet. [126]

Das Ergebnis des durchlaufenden Makrozyklus ist ein Produkt oder ein Forschungsdemonstrator. Der Reifegrad des Produktes nimmt mit zunehmender Konkretisierung und dem wiederholtem Durchlaufen des Zyklus zu. Ergebnisse sind zunächst Labormuster, Funktionsmuster, Vorserienprodukte und abschließend serienreife Produkte. [126]

Im Rahmen der zugrundeliegenden Arbeit wurde ein Forschungsdemonstrator zur Entwicklung eines MRK-Nietprozesses in der Flugzeugsektionsmontage aufgebaut. Nach dem Ableiten der Anforderungen aus der Analysephase wurde ein Lösungskonzept ausgearbeitet, das in seine Teilfunktionen aufgegliedert wurde. Die Teilfunktionen, die nachfolgend in Abbildung 3.5 genauer erläutert werden, wurden in ihrem Zusammenwirken im Demonstrator getestet. Nach dem ersten Durchlauf erfolgt im Rahmen dieser Dissertation eine Validierung der Ergebnisse.

3.2 Konzept des teilautomatisierten Nietsystems

Der Ist-Prozess wird aktuell manuell von zwei Werkern durchgeführt. Zur ergonomischen Entlastung und Steigerung der Effizienz soll ein Automatisierungskonzept für die Flugzeugmontage entwickelt werden. Die Grundlage hierfür bildet die ganzheitliche Analyse des Produkts, des aktuellen Prozesses in der Strukturmontage und der verwendeten Betriebsmittel (vgl. Abbildung 3.2).[1]



Abbildung 3.2: Ganzheitlicher Planungsansatz für die Entwicklung von Montageprozessen in Anlehnung an [114]

Die Anforderungen für den Soll-Prozess stammen aus der zuvor angesprochenen Analyse. Aufgrund der Komplexität der Anwendung, die durch die großen Produktdimensionen, den limitierten Arbeitsbereich und die engen Toleranzanforderungen entsteht, scheint eine Teilautomatisierung die wirtschaftlichste Lösung zu sein. Unter Berücksichtigung der körperlichen Belastung und der für den Werker ungünstigen Arbeitsbedingungen im Inneren der Sektion 19 wird der Bedarf für ein teilautomatisiertes, rekonfigurierbares und kollaboratives Konzept abgeleitet. Es erfolgt eine fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen Werker und Roboter. Die Integration eines MRK-fähigen Robotersystems in die Sektionstonne kann die Prozessqualität und Effizienz verbessern. Für das Szenario wird der Roboter auf einer Hubeinheit im Inneren der Sektion platziert, siehe Abbildung 3.3. Aufgrund der Bauteildimension bedarf es einer zusätzlichen Hubeinheit, die das

[1] Abschnitte dieses Kapitels wurden als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Kanso, A. and Masiak, T.: Collaboration in a Hybrid Team of Human and Robot for Improving Working Conditions in an Aircraft Riveting Process, SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2019-01-137, 2019. Müller, R., Vette, M., Geenen, A., Kanso, A., Masiak, T.: Development of a Human-Robot-Collaboration System using the Example of a Riveting Process in Aircraft Assembly, Journal of Robotics and Automation, URL: https://scholarlypages.org/Articles/robotics/jra-2-009.pdf, 2018. Müller, R., Vette, M., Geenen, A., and Masiak, T.: Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process, SAE Technical Paper, DOI: doi.org/10.4271/2017-01-2096, 2017.

Erreichen jeder Nietposition durch den Roboter sicherstellt. Der Roboter positioniert das prozessspezifische Nietwerkzeug; der Werker an der Außenseite bzw. auf der Druckkalotte übernimmt weiterhin die komplexe Aufgabe des Nieteinfädelns sowie das Bedienen des Niethammers.

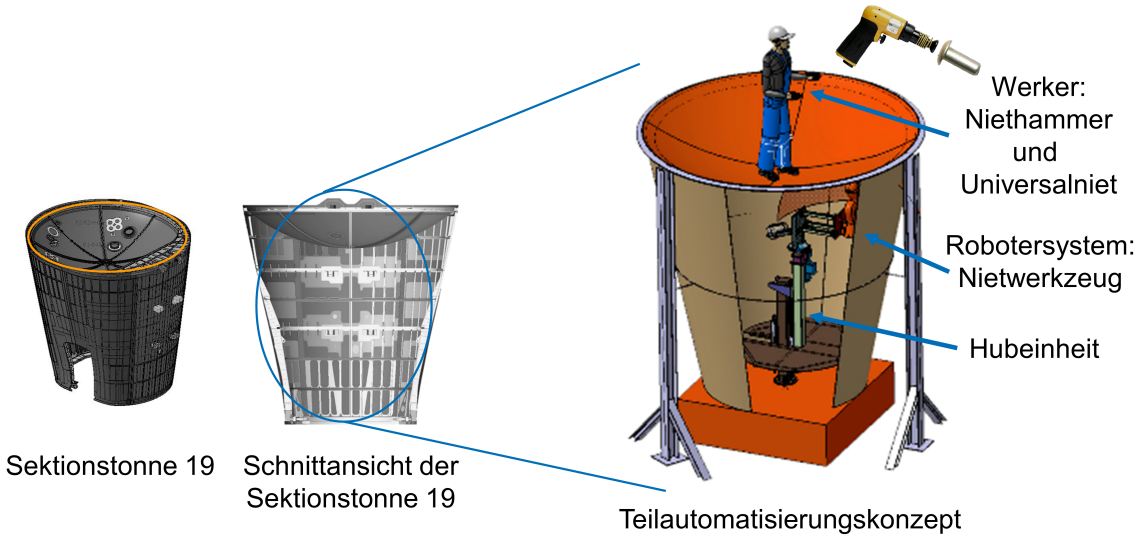


Abbildung 3.3: Konzept für die Teilautomatisierung eines Nietvorgangs in der Montage der Druckkalotte zur Sektionstonne mittels Mensch-Roboter-Kollaboration

Das Fügen der Druckkalotte zur Sektionstonne erfordert einen definierten Montageprozess, der durch das Produkt und die verwendeten Betriebsmittel vorgegeben wird. Dem hier betrachteten Nietprozess in der Sektionsmontage geht das Anliefern und Verbinden der Teilschalen/halbierten Sektionstonnen in die Station voraus. Die Sektionstonne kann aufgrund der großen Abmessungen nur grob positioniert werden. Das Befestigen des Bauteils erfolgt zudem in Bodennähe, sodass aus geringen Positionsabweichungen am unteren Teil der Sektionstonne große Positionsabweichungen am oberen Teil der Sektionstonne, wo die Druckkalotte aufgesetzt wird, resultieren. Dafür ist eine Methode zu entwickeln, die ein rekonfigurierbares Robotersystem mit einem Messsystem vorsieht. Das Robotersystem wird so vorpositioniert, dass markante Merkmale des Produktes im Messbereich der Sensorik liegen. Dies erlaubt die schrittweise Bestimmung der Position des Roboters in Bezug auf das Prozessmerkmal. Während sich das Robotersystem zunächst global im Produkt referenziert, erfolgt im Anschluss die Bestimmung der regionalen Merkmale, also des flächigen Nietmusters, bis hin zur lokalen Merkmalserkennung eines einzelnen Nietlochs. Das Konzept sieht eine hybride Programmierung des Robotersystems vor, d. h. die Referenzierung im Bauteil und die Detektion des Merkmales, sprich des Nietlochs, erfolgt online während des Einrichtens der Station. Die Positionierung des prozessspezifischen Werkzeuges vor dem Nietschaft wird aus dem vorherigen

Einmessvorgang abgeleitet. Halte-, An- und Abrückbewegungen sind festgelegte Prozessparameter.

Abbildung 3.4 zeigt den Arbeitsablauf des Nietprozesses. Nach der Referenzierung am Bauteil und der Detektion der Nietlöcher zeigt der schwarz markierte Abschnitt den kollaborativen Abschnitt zwischen Mensch und Roboter. Nachdem der Werker die Niete eingefädelt und der Roboter den Amboss positioniert hat, erfolgt der kollaborative Nietprozess. Während der Werker den Niethammer betätigt, positioniert der Roboter den Amboss in einer Halteposition vor dem Nietschaft. Um das Robotersystem für die kollaborative Prozessausführung zu befähigen, bedarf es eines spezifischen Nietwerkzeugs, das einerseits im limitierten Arbeitsraum positioniert werden kann und andererseits die Niethammerschläge minimiert, damit keine Schäden im Robotersystem auftreten. Das zu entwickelnde universelle Nietwerkzeug soll roboterunabhängig einsetzbar sein. Weiterhin gilt es, alle Prozessparameter im Werkzeug abzubilden. Der Roboter verbleibt während des Nietprozesses in einem definierten Abstand vor dem Nietloch. Ein aktives Nachführen des Roboters ist nicht notwendig, da diese Funktion in das Nietwerkzeug zu integrieren ist.

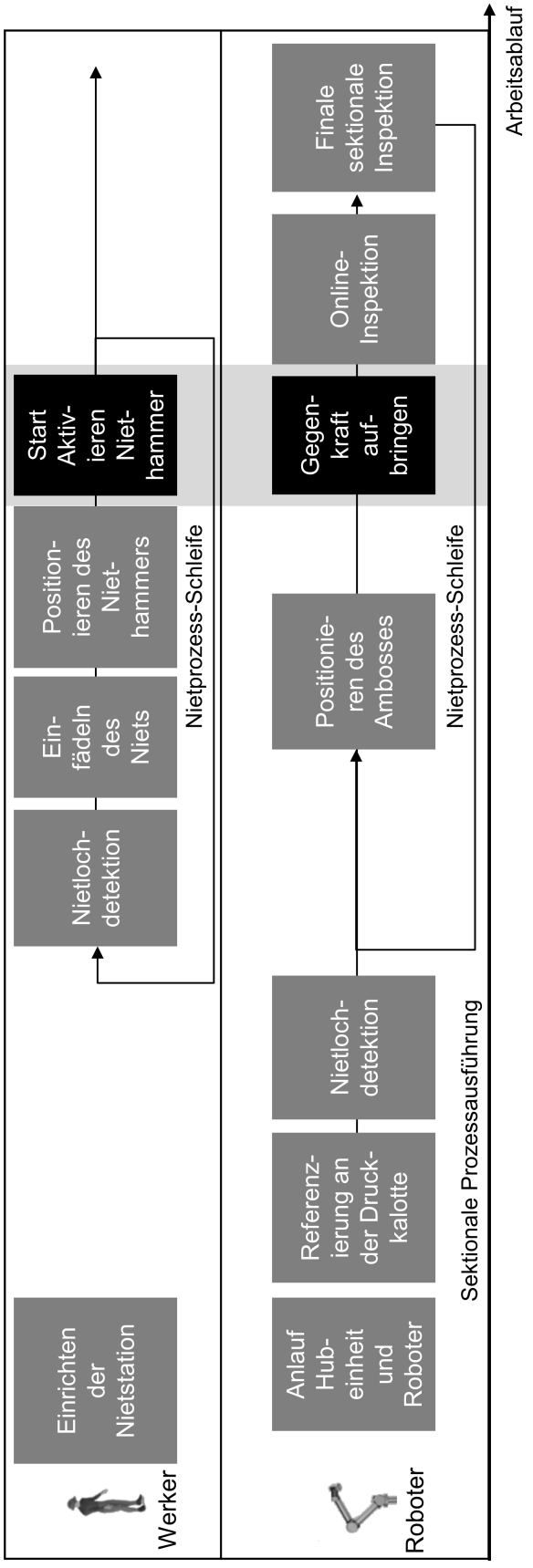


Abbildung 3.4: MRK-Prozess zwischen Mensch und Roboter an der Druckkalotte und Sektion 19

Da sich während des Nietprozesses kein Werker im Inneren der Sektion aufhält, besteht Bedarf an einem automatisierten Inspektionssystem. Für eine abschließende Qualitätsaussage ist als zusätzliche Komponente des Messkonzeptes die integrierte Sensorik für eine Online-Inspektion des Nietprozesses zu verwenden. Die neue Methode sieht das Aufzeichnen von Sensordaten vor, die durch ein Modell des maschinellen Lernens geleitet werden, um eine Aussage zur Prozessqualität zu liefern. Bei der Umsetzung gilt es, eine hybride Umsetzung der Inspektionsaufgabe mittels KI und deterministischen Verfahren zu implementieren, damit die Genauigkeit und Robustheit der Inspektion gesteigert wird. Während bzw. nach dem Nietprozess können die geometrischen Dimensionen des gefertigten Nietschaftes sowie auftretende Prozesskräfte gemessen werden, und es kann eine optische Bewertung des Nietkopfes erfolgen. Aufgrund der kollaborativen Umsetzung und des direkten Zusammenspiels von Mensch und Roboter ist eine intuitive und natürliche Mensch-Technik-Interaktion unabdingbar. Die MTI-Komponente ist Teil einer übergeordneten Bedienmetode, die im Folgekapitel genauer erläutert wird. Der Bedarf an einem neuen angepassten MTI-Konzept fußt auf der kollaborativen Natur des Nietprozesses. Mensch und Roboter müssen sich im hybriden Team miteinander abstimmen, um den Prozess gemeinsam erfolgreich auszuführen. Der Werker muss zu jeder Zeit die volle Kontrolle über den Prozess haben. Mithilfe von Smart Devices werden dem Werker Prozessinhalte in bspw. Mixed-Reality-Form visualisiert und zudem Interaktionskanäle zur Steuerung des Roboters ermöglicht. Grundlage für die zuvor genannten Konzepte bildet ein für die Aufgabenstellung neues und angepasstes modulares und erweiterbares Steuerungssystem, das neben der Ansteuerung des Robotersystems und dem Auslesen der Sensorik Möglichkeiten der MTI bereitstellt. Im Steuerungskern laufen die prozessspezifischen Sensordaten zusammen und werden in einem separaten Softwaremodul des Steuerungssystems an die Algorithmen der KI für eine Qualitätsanalyse übergeben. Neben den KI-Komponenten ist das Steuerungssystem zur Sicherung der Datenintegrität über ein zusätzlichen Modul an die Distributed-Ledger-Technologie angeschlossen. Die Einstufung der Anwendung als MRK erfordert die Einhaltung von Sicherheitsnormen wie bspw. der DIN ISO/TS 15066. Während seitens der Roboterkinematiken sichere und zertifizierte Systeme auf dem Markt verfügbar sind, gilt es, die Applikation als Gesamtsystem mittels zusätzlicher Sensorik abzusichern. Da im eigentlichen Nietprozess Mensch und Roboter nur über den Niet selbst miteinander in Kontakt stehen, verhindert die Trennung beider Teilnehmer durch die Druckkalotte Kollisionen während der Prozessausführung und erhöht damit die Sicherheit.

Im Gegensatz zu vollautomatisierten Systemen erlauben teilautomatisierte Systeme eine höhere Flexibilität in der Applikation. Dies wird durch das in Abbildung 3.5 dargestellte Stationskonzept ermöglicht. Der Lösungsansatz ist allgemeingültig, an dieser Stelle

jedoch auf das Szenario in der Flugzeugmontage angewandt. Die sieben Hauptkomponenten bilden die Grundlage für die Beantwortung der Forschungsfrage. Das teilautomatisierte System erfordert spezifische Komponenten für eine erfolgreiche Implementierung des kollaborativen Nietverfahrens zwischen Mensch und Roboter. Zu den Komponenten gehören die zuvor erwähnten Sicherheitseinrichtungen, eine übergeordnete Steuerung, ein Messkonzept und ein prozessspezifisches Werkzeug. Darüber hinaus muss die Zusammenstellung zwischen Mensch und Roboter im Rahmen der MRK entwickelt werden. Weiterhin bedarf es einer einfach zu handhabenden Bedienmethode, die auch ohne spezielle Programmierkenntnisse intuitiv in der Produktion angewendet werden kann.

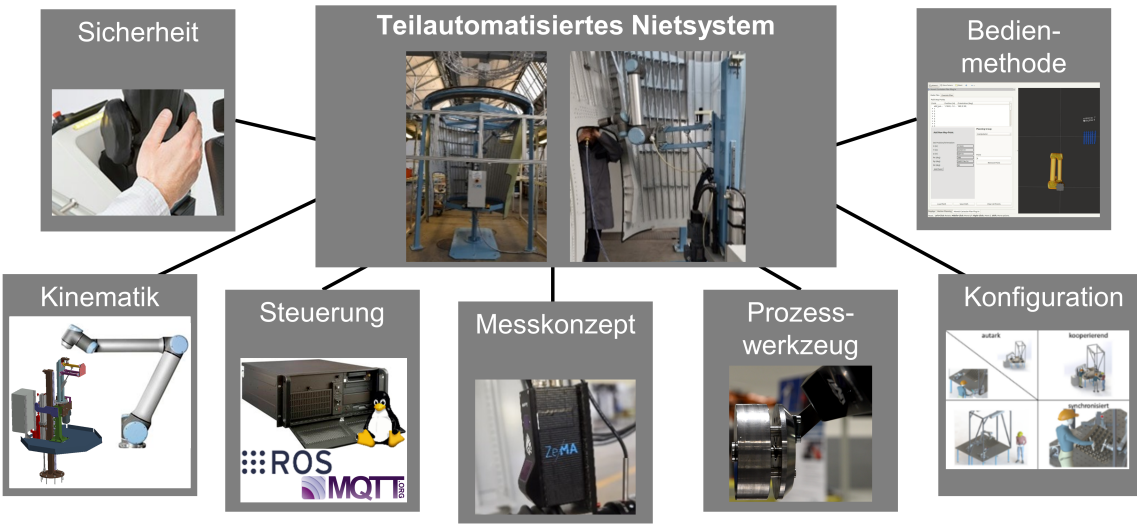


Abbildung 3.5: Das teilautomatisierte Nietsystem besteht aus sieben Kernkomponenten, die abgedeckt sein müssen in Anlehnung an [127]

Kapitel 4

Planungsansatz für die MRK-Station

Im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Projektes *FourByThree* (Nr. 637095) wurde eine allgemeingültige Bedienmethode von teilautomatisierten Systemen entwickelt, die während der Projektlaufzeit auf die Anforderungen der Flugzeugproduktion zugeschnitten wurde.

Während des Projektes *FourByThree*, von Interreg geförderten Folgeprojektes *Robotix-Academy* (Nr. 002-4-09-09-001) und des Transferprojekts *Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Saarbrücken*, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wurde weiterhin auf Basis des Six-Sigma-PIDOV-Modells eine Vorgehensweise zur Integration von Sensoren, KI-Algorithmen und Blockchaintechnologien entwickelt.

Nachfolgend werden allgemeingültige Methoden für die Bedienung der Station sowie Vorgehensmethoden zur Integration von Sensoren und Algorithmen vorgestellt, die abschließend um die Distributed-Ledger-Technologie erweitert werden. Der Lösungsansatz ist in dieser Arbeit auf das Szenario in der Flugzeugmontage angewandt.

4.1 Methodik zur Stationsbedienung

Die Bedienmethode des Nietsystems ist eine wichtige Komponente für den erfolgreichen Betrieb von MRK-Anwendungen. Es beinhaltet eine fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung, eine intuitive Einrichtung, Bedienung und Programmierung bzw. Konfiguration der Systeme in der Produktionsumgebung. Die Programmierung bezieht sich sowohl auf die Bewegungsabläufe als auch auf die logischen Verknüpfungen des Anwenderprogramms während der Produktion [131]. Können Rekonfigurationen oder Programmierungen nicht parallel zur Produktion durchgeführt werden, haben diese Stillstandzeiten

oder Verzögerungen einen direkten Einfluss auf die Effizienz der Produktion. Daher müssen sie auf ein Minimum reduziert werden.[1] [132]

Werden zusätzliche Sensoren an MRK-Robotersystemen oder in deren Anwendung integriert, führt dies zu einer Erhöhung der Komplexität und Beherrschbarkeit. In den meisten Fällen müssen Daten von Peripheriegeräten gesondert ausgelesen und ausgewertet werden, sodass fortgeschrittene Programmierkenntnisse erforderlich sind. Kurzfristige Änderungen und Anpassungen dieser Programme in der Montage sind schwierig. Aus diesem Grund sind maßgeschneiderte und intuitive Bedienungsmethoden erforderlich. In diesem Fall wird eine hybride Programmiermethode gewählt, mittels derer eine Anwendung schnell und effektiv in Betrieb genommen werden kann. [133] Das bedeutet, dass zunächst Arbeitsschritte und Wegpunkte des Robotersystems offline geplant werden, die später während der Programmausführung online angepasst werden, indem die Beziehungen zwischen dem virtuellen und dem realen Modell mittels Lasertriangulationssensorik oder Bildverarbeitung bestimmt werden. Darüber hinaus muss es möglich sein, auch ohne besondere Programmierkenntnisse auf verschiedene Varianten oder Produktanpassungen in der Montage zu reagieren. [134]

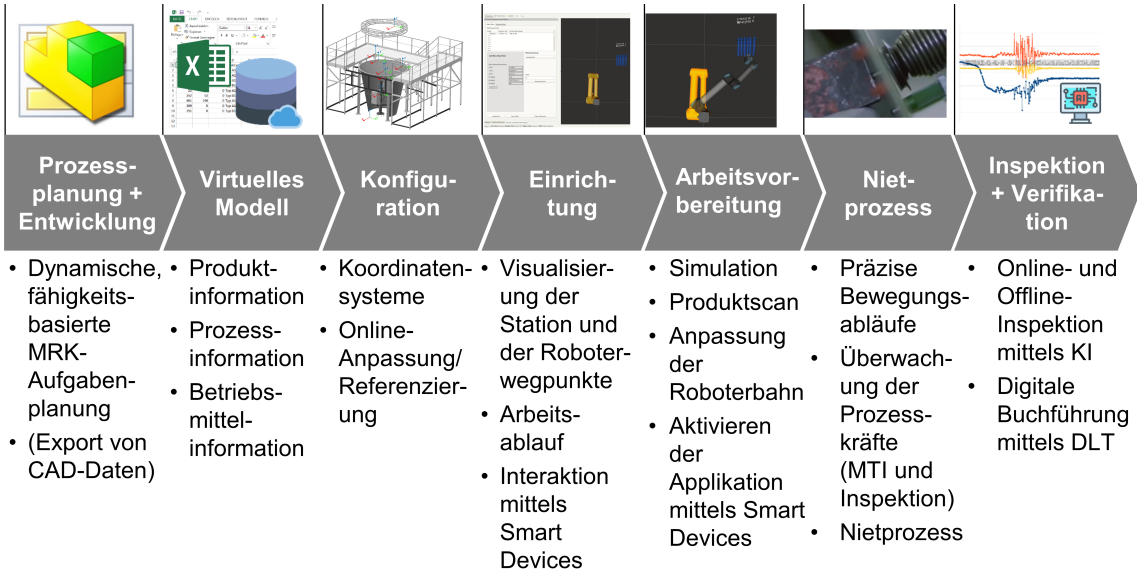


Abbildung 4.1: Die allgemeingültige Bedienmethode des teilautomatisierten Systems wird individuell auf die Anforderungen der Prozessstation in der Flugzeugproduktion zugeschnitten (in Anlehnung an [134] [114]).

[1] Abschnitte dieses Kapitels wurden als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Geenen, A., and Masiak, T.: Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process, SAE Technical Paper, DOI: doi.org/10.4271/2017-01-2096, 2017. Müller, R., Vette-Steinkamp, M., Masiak, T.: Blockchain-basierte Qualitätsdokumentation befähigt eine Mensch-Roboter-Kollaboration in der Flugzeugproduktion, handling, Darmstadt, WEKA BUSINESS MEDIEN GmbH, 2019.

Prozessplanung, virtuelles Modell und Konfiguration Das entwickelte intuitive Bedienkonzept ist in sieben Phasen unterteilt (vgl. Abbildung 4.1). Ausgehend von der Planung und Entwicklung des MRK-Prozesses erfolgt eine fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter. Der Werker und seine Erfahrung spielen eine wichtige Rolle im Nietprozess, wobei eine gute Hand-Augen-Koordination und die Fähigkeit, Prozesse zu bewerten und entsprechend zu reagieren, erforderlich sind. Zunächst muss die Zuordnung der Aufgaben entsprechend den Fähigkeiten von Mensch und Robotersystem erfolgen. Da das Einfädeln des Niets, das Positionieren und Betätigen des Niethammers sowie eine erste Sichtprüfung prozessbestimmend sind, wird die komplexe Aufgabe dem Menschen zugeteilt. Weiterhin wird die Ergonomie im Inneren der Sektion durch den begrenzten Arbeitsraum, Überkopfarbeiten und extreme Lärmbelastungen aufgrund des Niethammers in Kombination mit der Metalloberfläche negativ bewertet. Daher ist der Einsatz eines Robotersystems zur Entlastung der Werker von dieser monotonen und nicht ergonomischen Arbeit vorzuziehen.

Anschließend gilt es, ein Verfahren zur einfachen Programmierung und Konfiguration der Station zu entwickeln. Grundlage für die Programmierung der Roboter in der Bedienmethode sind computergestützte Konstruktionsmodelle (CAD) des jeweiligen Produkts. Klassische CAD-Programme oder einfach implementierte Muster können verwendet werden, um ein virtuelles Modell abzuleiten. Das virtuelle Modell ist eine Kombination aus Prozessinformationen, Positions- und Orientierungsdaten, erweitert um Aufgabeninformationen, die sowohl dem Roboter als auch dem Bediener zur Erfüllung der Aufgabe zur Verfügung gestellt werden. Wenn ein CAD-Modell nicht verwendet werden kann oder nicht verfügbar ist, wie in der Airbus-A320-Produktion, muss bspw. ein Laserliniensensor oder ein Kamerasystem zur Mustererkennung verwendet werden, um die Positionen der Nieten zu identifizieren.

Aufgrund der groben Positionierung der Sektionstonne in der Station fehlt die Beziehung zwischen dem virtuellen Modell und dem realen Werkstück. Die Transformationsbeziehungen müssen in der dritten Phase der Bedienmethode mittels Referenziermethoden ermittelt werden (vgl. Abbildung 4.1). Aus globaler Sicht sind die Transformationsbeziehungen zwischen Welt, Roboter und Werkstückkoordinatensystem notwendig. Das für den Prozess relevante Nietloch wird im Rahmen der lokalen Konfiguration betrachtet. Daher muss eine Online-Anpassung der lokalen Werkstückkoordinatensysteme erfolgen. Um die Prozesssicherheit zu gewährleisten, wird die Online-Anpassung in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Abweichungen zwischen dem virtuellen und dem realen Modell können beseitigt werden, indem die für den Nietvorgang benötigten genauen Nietlochpositionen online mithilfe eines Sensors gemessen werden.

Einrichtung mittels der Mensch-Roboter-Schnittstellen Nach der Konfiguration des Systems können die hinterlegten Nietpunkte in einer graphischen Oberfläche betrachtet und auf der Bauteiloberfläche visualisiert werden. Wird z. B. eine neue Produktvariante gehandhabt, die nicht über ein CAD-Modell verfügt, oder sind Änderungen am Produkt vorzunehmen, können Unterschiede auch ohne Programmierkenntnisse am Hallenboden adaptiert werden. Möglich wird dies durch Visualisierungen und graphische Benutzeroberflächen, in denen Punkte manuell hinzugefügt, gelöscht oder angepasst werden können (vgl. Abbildung 4.2 Mitte). Existieren CAD-Modelle, können diese oder die erzeugten virtuellen Modelle für eine abschließende Simulation verwendet werden. Dadurch bestünde die Möglichkeit einer aktiven Kollisionsvermeidung während der Prozessausführung.

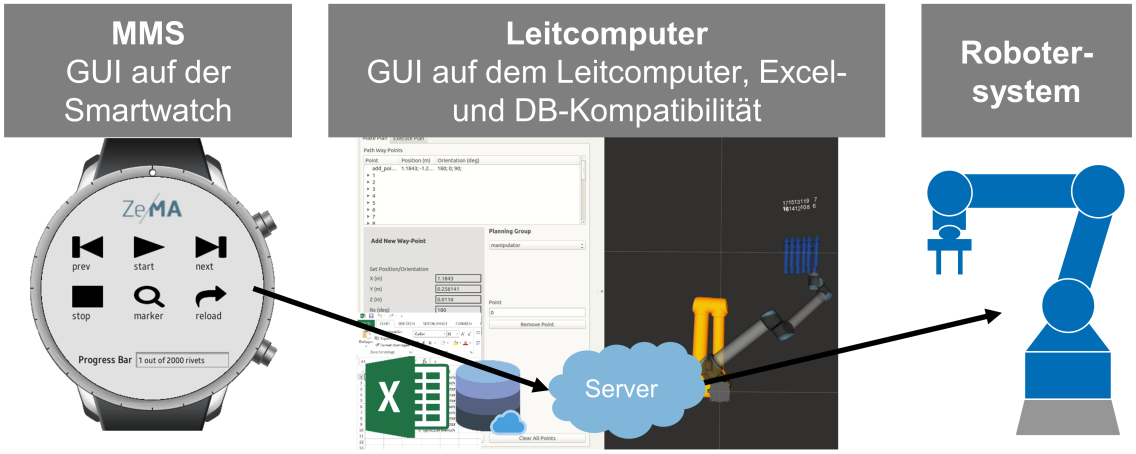


Abbildung 4.2: Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) für die intuitive Bedienmethode in Anlehnung an [114]

Nach der Bestätigung des Programmablaufs kann der Werker das Einrichten der MRK-Nietstation und somit die Arbeitsvorbereitung abschließen und den Produktionsprozess starten. Mit smarten Devices hat der Werker jederzeit drahtlos die Kontrolle über das gesamte System und kann den Roboter zu den zuvor festgelegten Wegpunkten steuern. Zu den Interaktionsmöglichkeiten gehören das Starten und Stoppen des gesamten Prozesses sowie das Vorwärts- und Rückwärtsspringen zwischen Wegpunkten über die graphische Oberfläche der jeweiligen Apps. Dies ist z. B. notwendig, wenn eine Nietoperation wiederholt werden muss. Zusätzliche Informationen über den Prozess selbst können mittels Kurznachrichten auf den Smart Devices angezeigt werden. Ausgehend von einem modularen Steuerungskonzept kann so ein Netzwerk von Clients bzw. Devices über Kanäle miteinander verbunden werden.

Nach Abschluss der vorbereitenden Tätigkeiten in der Einrichtphase kann der Nietprozess gestartet werden. Durch die Integration einer Kamera, eines Kraft-Momenten- und

eines Laserliniensensors in das Werkzeug des MRK-fähigen Robotersystems ist eine intelligente Qualitätskontrolle möglich. Die Sensoren werden neben der Bauteilreferenzierung für die Überwachung des Nietvorgangs in Echtzeit eingesetzt und erlauben dadurch die Endkontrolle mithilfe einer Künstlichen Intelligenz, wodurch der Produktionsprozess schneller und effizienter abläuft. Die Prozessdaten werden während des Nietprozesses gesammelt und durch ein trainiertes neuronales Netzwerk geleitet, um das betreffende Objekt als in Ordnung (i.O.) oder nicht in Ordnung (n.i.O.) in Bezug auf die Qualität zu klassifizieren. Um eine umfassende Lösung bereitzustellen, visualisiert eine Augmented-Reality-Anwendung den aktuellen Status des Prozesses und ermöglicht eine intuitive Interaktion mit dem System. Abschließend können Hashes, also eine Art Fingerabdruck der aufgezeichneten Sensordaten, mithilfe der Distributed-Ledger-Technologie zur Steigerung der Integrität der Daten und des Vertrauens automatisiert abgesichert werden. Die prozessspezifischen Sensorrohdaten werden während der Prozessausführung in einer unternehmensinternen Datenbank hinterlegt. Ebenso wird deren Hash im Tangle hinterlegt.

4.2 Vorgehen zur Integration von Sensoren und Algorithmen

Basierend auf den Erfahrungen, die bei der praktischen Implementierung der Sensoren und Algorithmen sowie dem Vorgehen in Umsetzungsprojekten der Künstlichen Intelligenz (vgl. 2.17) gesammelt wurden, soll nachfolgend ein Vorgehensmodell zur Integration von Sensoren und Algorithmen in Anlehnung an das aus der Literatur bekannte Six-Sigma [135] aufgezeigt werden.

Six-Sigma bezeichnet ein Analyseverfahren zur Verbesserung von Produkten und Prozessleistungen. Zielgerichtete Fragen über einen Prozess ermöglichen aussagekräftige Antworten, die wiederum zu einem Verbesserungsprojekt führen sollen. Zwei Arten der Six-Sigma-Methoden, die DMAIC- und PIDOV-Vorgehensmodelle, sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Beide Modelle finden ihren Einsatz in der Planung und Entwicklung von Prozessen und Produkten. [135] [136] [137]

Das DMAIC-Modell findet mit der Analyse des vorhandenen Zustandes häufig seine Anwendung in der Verbesserung von bestehenden Produkten und Prozessen, während das PIDOV-Modell vermehrt in der Entwicklung und Verbesserung von Produkten oder Prozessen zum Einsatz kommt. [135]

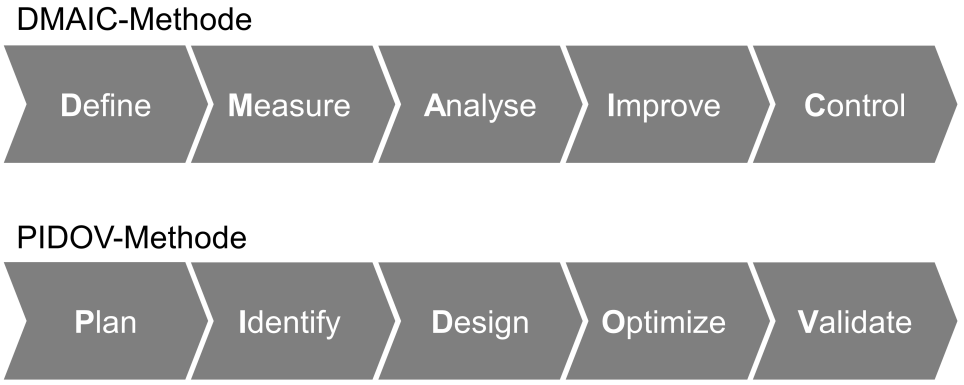


Abbildung 4.3: Arten der Six-Sigma-Methoden: DMAIC- und PIDOV-Methode in Anlehnung an [135]

Basierend auf dem PIDOV-Modell wurde ein erweitertes Vorgehensmodell zur Integration von Sensoren und Algorithmen während der Prozessentwicklung in Abbildung 4.4 erarbeitet.

Ähnlich dem PIDOV-Modell gilt es, in der ersten Phase, der **Analyse und Zieldefinition**, das Produkt, den Prozess sowie die Betriebsmittel zu analysieren und entsprechende innovative Konzepte abzuleiten. Zusammen mit den Rahmenbedingungen wird eine Zieldefinition aufgestellt, in diesem Fall bspw. die Bewertung bzw. Sicherung der Qualität des teilautomatisierten Nietprozesses in der Flugzeugproduktion [138].

Im zweiten Schritt, bei dem **relevante Daten und Informationen identifiziert** werden, werden die Anforderungen an das Produkt oder den Prozess bestimmt. Die Arbeitsraumanalyse liefert die Produktdimensionen für das auszuwählende Handhabungsgerät. Die Nietqualität wird anhand der Dimensionen, des Durchmessers und der Höhe des Stauchkopfes sowie der Oberflächenbeschaffenheiten des Niets und des umliegenden Materials klassifiziert.

Gemäß dem PIDOV-Modell wird nachfolgend ein Lösungskonzept für den Prozess erstellt. An dieser Stelle wird zudem explizit auf eine prozessspezifische Handhabungsgeräte- sowie Sensor- und Algorithmenauswahl Wert gelegt. Abhängig von den Produktdimensionen kann der Bedarf entstehen, den Arbeitsraum des Handhabungsgerätes zu erweitern. Aufgrund von Bauteilcharakteristika wie bspw. spiegelnden Oberflächen oder begrenztem Arbeitsraum können Sensoren nicht frei gewählt werden. Damit einhergehend eröffnen sich aus der hybriden Implementierung von deterministischen Algorithmen und Algorithmen der Künstlichen Intelligenz neue Möglichkeiten zur Auswertung der Sensorik. In dieser Arbeit wurden ein Laserlinien- und ein Kraft-Momenten-Sensor sowie eine 2D-Kamera eingebunden. Aufseiten der Algorithmen wurden neuronale Netze und Entscheidungsbäume implementiert.

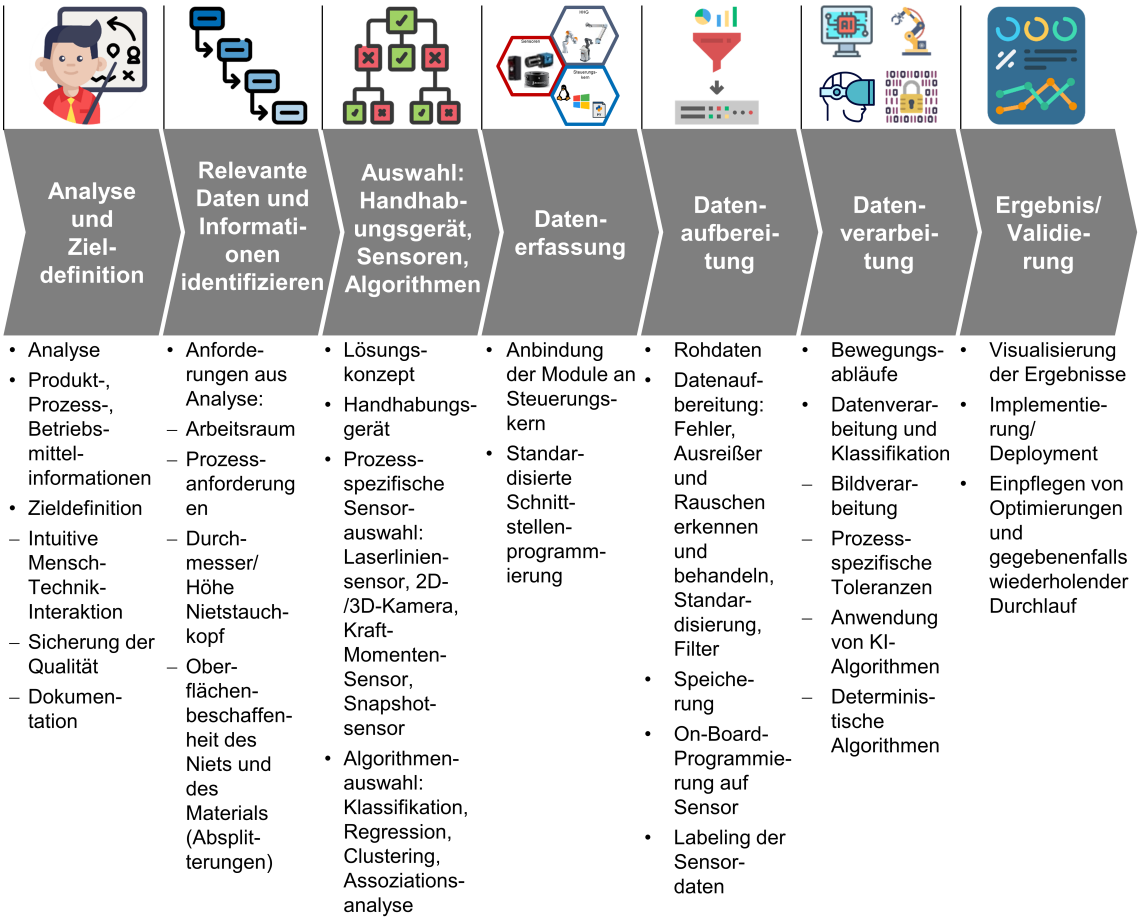


ABBILDUNG 4.4: Vorgehensmodell zur Integration von Sensoren und Algorithmen während der Prozessentwicklung in Anlehnung an das Six-Sigma PIDOV-Modell [135]

Die Einbindung dieser zusätzlichen Komponenten steigert die Komplexität der gesamten Entwicklung bezüglich der **Datenerfassung**. Im Hinblick auf die Wiederverwendbarkeit und Wartbarkeit sind daher eine objektorientierte Anbindung der Module an den Steuerungskern sowie die Einführung standardisierter Schnittstellen erforderlich. Auf die Details des entwickelten Steuerungskonzepts wird in Kapitel 5.1 eingegangen.

Der fünfte Schritt, die **Datenaufbereitung**, beinhaltet das Auslesen, Aufbereiten und abschließende Speichern von Rohdaten. Gängige Praxis ist das Entfernen von Ausreißern und Rauschen mittels Filter oder die standardisierte Darstellung der Daten. Je nach verwendeter Sensorik können Daten auch bereits auf dem Sensorboard aufbereitet und/oder analysiert werden. Beim Einsatz von Algorithmen der Künstlichen Intelligenz erfolgt an dieser Stelle das Labeling, also das Beschriften der Daten für nachfolgende Trainingsphasen zur Erstellung der KI-Modelle.

Im Rahmen der **Datenverarbeitung** werden die Sensordaten mittels unterschiedlicher

Verfahren, bspw. klassischer Bildverarbeitung, Künstlicher Intelligenz oder deterministischer Algorithmen, analysiert. Weiterhin führen die Kinematiken die hinterlegten Bewegungsabläufe aus.

Abschließend werden die **Ergebnisse** visualisiert und ähnlich dem PIDOV-Modell optimiert und validiert. Je nach Reifegrad wird der Detaillierungsgrad des Lösungskonzeptes erhöht und iterativ so lange optimiert, bis die Anforderungen erfüllt sind. [138]

4.3 Erweiterung des Vorgehensmodells um die Distributed-Ledger-Technologie

Die Distributed Ledger Technology (DLT) ist eine Technologie zur Wahrung der Datenintegrität und eine vertrauenswürdige Transaktionsschicht für den Datenaustausch zwischen vielen Akteuren in einem Geschäftsökosystem, um eine einzige Version der Wahrheit sicherzustellen. Das DLT-Kernprotokoll von IOTA basiert auf einem Directed-Acyclic-Graph-Modell (DAG) und bietet Skalierbarkeit, gebührenfreie Transaktionen und neue Geschäftsmodelle auf Basis von Mikrozahlungen.

Mithilfe der IOTA-Technologie können Prozess- und Sensordaten unveränderlich in privaten, privilegierten oder öffentlichen Kanälen bereitgestellt werden. Die erarbeiteten Konzepte, die in den nachfolgenden Kapiteln aufgezeigt werden, bauen auf das zuvor vorgestellte *Vorgehen zur Integration von Sensoren und Algorithmen* auf. Aus diesem Grund werden die grundlegenden Mechanismen der Distributed-Ledger-Technologie der Abbildung 4.4 als Erweiterung in Abbildung 4.5 hinzugefügt.

Der **Zieldefinition** wird in Abbildung 4.5 der Punkt *Datenintegrität auch über die Unternehmensgrenze hinaus* hinzugefügt. Je nach Zusammenspiel von Lieferant, Behörden und OEM kann das Teilen von Informationen zwischen den beteiligten Parteien eine wichtige Rolle spielen. Die DLT kann an dieser Stelle die Datenintegrität und das Vertrauen zu den Daten gewährleisten.

Im Zuge der Identifikation von relevanten Daten und Informationen müssen folgende Fragen beantwortet werden: *Welche Daten sollen dem Tangle hinzugefügt werden? Und werden diese in privaten, privilegierten oder öffentlichen Kanälen hinterlegt?* Während ein privater Kanal für unternehmensinterne Informationen Verwendung finden kann, eignen sich privilegierte Kanäle dazu, Wertschöpfungsprozesse zu dokumentieren, bspw. bei einer Zulieferkette mit mehreren Teilnehmern oder Parteien. Öffentliche Kanäle hingegen können zum Publizieren von sicherheitsunkritischen und die Öffentlichkeit betreffenden Daten verwendet werden.

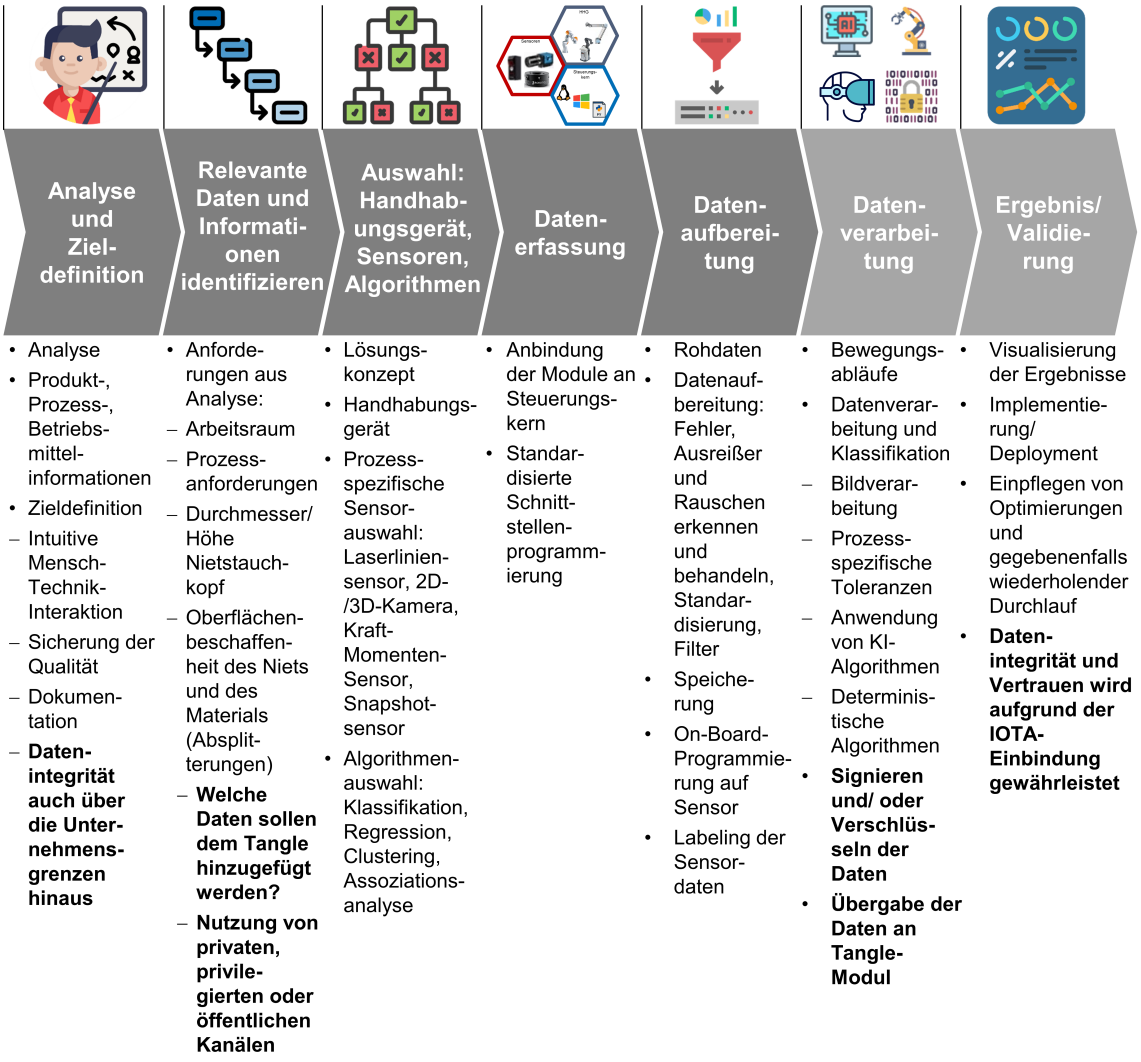


Abbildung 4.5: Erweiterung des Vorgehensmodells zur Integration von Sensoren und Algorithmen um die Distributed-Ledger-Komponenten

Die Zwischenschritte, d. h. Sensor- und Algorithmenauswahl, die Datenerfassung mittels standardisierter Schnittstellen und die Datenaufbereitung bleiben wie beim *Vorgehen zur Integration von Sensoren und Algorithmen* gleich. An dieser Stelle ist nochmals darauf zu verweisen, dass die Rohdaten in einer unternehmensinternen Datenbank verbleiben. Im Tangle werden lediglich die digitalen Fingerabdrücke hinterlegt. Im Anschluss erfolgt die Datenverarbeitung mittels unterschiedlicher Methoden. An dieser Stelle erfolgt das Signieren und/oder Verschlüsseln der Prozessdaten und die Übergabe der Daten an das IOTA-Tangle-Softwaremodul, das die Daten der Blockchain bzw. dem Tangle hinzufügt.

Grundsätzlich gilt es, keine Rohdaten im Tangle zu speichern und/oder diese für jedermann frei zugänglich zu machen. Daher erfolgt das Erstellen eines digitalen und einzigartigen Fingerabdrucks mithilfe eines Hash-Algorithmus. Für die effiziente Verarbeitung von großen Datenmengen eignet sich z. B. der SHA-2-Algorithmus oder auch weitere

gängige Public-Key-Verschlüsselungstechnologien. Durch das Berechnen und Hinterlegen eines Hashes, also eines einzigartigen digitalen Fingerabdrucks, können die **Datenintegrität und das Vertrauen** auch über die Unternehmensgrenzen hinaus einfach und automatisiert realisiert werden. [14]

Der Einsatz und die Integration der Technologie in das Vorgehensmodell bietet verschiedene Vorteile:

Im Rahmen der KI sowie der DLT werden Daten in den Medien oftmals als *das neue Öl* oder *das Grundwasser der Information der Gesellschaft* bezeichnet [62] [63]. Der Grundstein solcher Beschreibungen ist die Feststellung, dass immer mehr Daten generiert werden. Entscheidend ist, die Masse der Daten zu organisieren/strukturieren und aus diesen qualitativ hochwertige und verwertbare Informationen zu gewinnen. Datentransaktionen wie Maschine-zu-Maschine-Zahlungen (M2M) werden ermöglicht, und zusammen mit der Entwicklung neuer smart Service Gateways ermöglichen diese neue Geschäftsmodelle (z. B. Pay-per-Use Geschäftsmodelle). Prozess- und Sensordaten können in privaten und/oder öffentlichen Kanälen unveränderlich veröffentlicht werden, um das Vertrauen und die Datenintegrität zu gewährleisten.

Konkret beim Beispiel der Flugzeugproduktion besteht die Möglichkeit des sicheren Teilens von Datensätzen über die Unternehmensgrenzen hinaus. Weiterhin wird der manuelle Signierprozess des Werkers digitalisiert und automatisiert.

Kapitel 5

Konzeption MRK-Station für die Grossbauteilmontage

Eingangs wurde der Bedarf für ein MRK-fähiges Robotersystem mit intuitiven Mensch-Technik-Interaktions-Bedienmethoden, einer KI-basierten Qualitätssicherung und einer Blockchain-basierten Qualitätsdokumentation aufgezeigt. Als Lösungsansatz für die Verbesserung der Arbeitsbedingungen in der Flugzeugproduktion durch den Einsatz der MRK und die zuvor genannten Module wurde ein teilautomatisiertes Nietsystem, entsprechend Kapitel 3.2, entwickelt. Die einzelnen Lösungskonzepte werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

5.1 Systemarchitektur

Für den Nachweis der Funktionsfähigkeit gilt es, eine Vielzahl an Hard- und Softwarekomponenten aus den Bereichen der Robotik, Mensch-Technik-Interaktion, der KI und der Blockchaintechnologien im Demonstrator zu implementieren und zu validieren. Aus diesem Grund wird eine Systemarchitektur entwickelt, die die Systemkomponenten und ihre Schnittstellen standardisiert beschreibt und mittels gängiger Protokolle verbindet.

Hinsichtlich der Betrachtung eines Montagesystems beschreibt Eilers die Systemarchitektur als die Zusammenhänge zwischen Hard- und Software in Form von Modulen und Funktionen sowie deren Schnittstellen untereinander. [139] Grundvoraussetzung für den Einsatz von Modulen sind abgegrenzte Fähigkeiten und definierte Schnittstellen. Weiterhin sollen die Schnittstellen nur wenige Verflechtungen zu anderen Modulen aufweisen. [140]

In der Industrie kommen zur Steuerung von mechatronischen Systemen in der Regel softwarebasierte Steuerungen zum Einsatz. In den meisten Fällen werden automatisierte Prozessanlagen durch speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) betrieben.

Das Software-Design und die Implementierung einer solchen SPS ist in der IEC 61131-3 standardisiert [141]. Die SPS verarbeitet ihre gespeicherten Programme zyklisch. Für die Programmierung einer SPS gibt es verschiedene Programmiermöglichkeiten. Graphische Sprachen wie Funktionsplan (FUP) und Kontaktplan (KOP) lassen sich von strukturierten, textbasierten Sprachen wie Anweisungsliste (AWL) und textbasierten Hochsprachen unterscheiden. Dabei werden Programmbausteine, Funktionsblöcke und Funktionsmodule verwendet. [142]

Da in dieser Arbeit neben der Integration von Industriekomponenten auch Komponenten aus der Unterhaltungselektronik, bspw. eine Smartwatch oder eine Mixed-Reality-Brille, sowie neuartige Softwaremodule für die Künstliche Intelligenz und Blockchain-Technologie erprobt werden, gelangen bisherige Industriekomponenten schnell an ihre Grenzen. Aus diesem Grund wurde ein service- und broker-orientiertes, modulares Steuerungssystem zur Konfiguration und Steuerung des Montagesystems aufgebaut.

Serviceorientierte Architekturen (SOA) sind Softwarearchitekturen für verteilte Systeme [143]. Die Basiskomponenten sind Services, die dem System unterschiedliche Funktionen bieten, über entsprechende Schnittstellen verfügen und jederzeit erreichbar sind. [144] Um die gewünschte Funktionalität aus einer Menge aller verfügbaren Services eines Systems zu erhalten, werden einzelne Services zusammengeführt. Im Sinne der Automatisierungstechnik bieten einzelne mechatronische Funktionseinheiten ihre Funktionalitäten in Form von Dienstleistungen über einheitliche Schnittstellen im gesamten System an. Die Zusammensetzung der Services ist dabei durch eine lose Kopplung gekennzeichnet und abhängig von den Anforderungen der Anwendung. [5] Dies gewährleistet einen hohen Grad an Modularität, was die Anpassungsfähigkeit der Prozesstationen erheblich steigert [145].

Broker sind Softwarekomponenten, die die Vermittlung zwischen Serviceanbieter und Servicekonsument orchestrieren. Die Rollenverteilung von Client und Server kann dynamisch gestaltet werden und ist somit weniger starr. [146] Ein bekannter Vertreter dieser Architektur ist der MQTT-Broker, der auf dem MQTT-Protokoll, einem leichtgewichtigen Publish-/Subscribe-Nachrichtenprotokoll, basiert. [147]

Damit die Prozess- und Interaktionsmodule in einer Montagestation flexibel und bedarfsgerecht angeordnet und eingesetzt werden können, wird ein modulares Steuerungssystem vorausgesetzt. Des Weiteren können so die verschiedenen Module aus den Bereichen Handhaben, Fügen, Inbetriebnahme sowie Hilfsprozess und Sonderoperationen integriert werden. [148]

Abbildung 5.1 fasst alle Module des Steuerungssystems zur Konfiguration eines Montagesystems mit multimodalen Interaktionsmöglichkeiten zusammen. Die Anordnung

der Module erfolgt anhand ihrer Fähigkeiten in fünf Modulklassen, die jedoch modular erweiterbar sind. Die Basis dazu bildet ein Service-orientiertes Steuerungssystem zur intuitiven Konfiguration der einzelnen Module in der Station, die mittels standardisierter Nachrichten über eine broker-basierte Architektur kommuniziert.

Die in Abbildung 5.1 gelisteten Module repräsentieren Fähigkeiten des Gesamtsystems. Da Module wie ein Sensor selbst nicht in der Lage sind, eigenständig zu kommunizieren, ist es notwendig, jeden Teilnehmer mit einem *smarten Service* auszustatten. Das heißt, Services ermöglichen es, Geräte intuitiv und einfach mit dem gesamten Steuerungssystem zu verbinden. Dazu werden für jedes Gerät Softwarepakete entwickelt, ähnlich den Apps auf Smartphones, die alle notwendigen Dateien und Konfigurationen zur Ausführung beinhalten. Die einzelnen Services können abschließend nativ auf der Hardware des Gerätes, in virtualisierten Umgebungen (klassische virtuelle Maschinen/Virtualisierung mittels Docker) oder - sofern notwendig - auf echtzeitfähigen Computerbetriebssystemen oder einer SPS ausgeführt werden.

Die Modulgruppen Mensch, Kinematik und Sicherheit decken die wichtigsten Module aus den Bereichen der MRK bspw. die fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung und die menschzentrierte Applikationsentwicklung, ab. Im Bereich der Kinematik können unterschiedliche MRK-fähige Robotersysteme oder individuelle Kinematiken wie eine Hubeinheit mittels universeller Roboterschnittstellen dynamisch angesteuert werden. Zur Steigerung der Sicherheit können klassische Sicherheitssysteme, z. B. für die Arbeitsraumüberwachung, mittels 3D-Scanner eingebunden werden.

Für das Einbinden der MTI und der prozessspezifischen Sensoren wurde die Gruppe *IO-Module* für die Informationsein- und -ausgabe geschaffen. Einerseits sind hier Laserlinien- und Kraft-Momenten-Sensoren sowie Kameras aufgelistet, die für die Referenzierung an Bauteilen oder zur Detektion von Merkmalen und Qualitätseigenschaften verwendet werden. Andererseits existiert eine Vielzahl an Ein- und Ausgabegeräten für den Informationsaustausch und die Interaktion zwischen Mensch und Maschine.

Am Beispiel eines Ausschnittes des Nietprozesses sollen die interagierenden Module des Steuerungssystems kurz beschrieben werden: Für das Starten des Laserscans wird bspw. über die graphische Oberfläche des Moduls **Smartwatch** der entsprechende Interaktion-Knopf gedrückt. Eine MQTT-Nachricht wird von dem Werker-Endgerät über das **Broker**-Modul an das Modul **Zustandsautomaten** gesendet. Basierend auf der hinterlegten Logik sendet dieser wiederum die Posedaten an das Treibermodul, das mit dem **Roboter** kommuniziert. Die Bahninterpolation und die Ansteuerung der Roboteraktoren wird auf der echtzeitfähigen **Robotersteuerung** durchgeführt. Während der Roboter den Laserliniensensor entlang des Ringspantes führt, wird auf der **Recheneinheit im Laserliniensensor** ein Algorithmus zur Erkennung der Nietlöcher ausgeführt. Werden

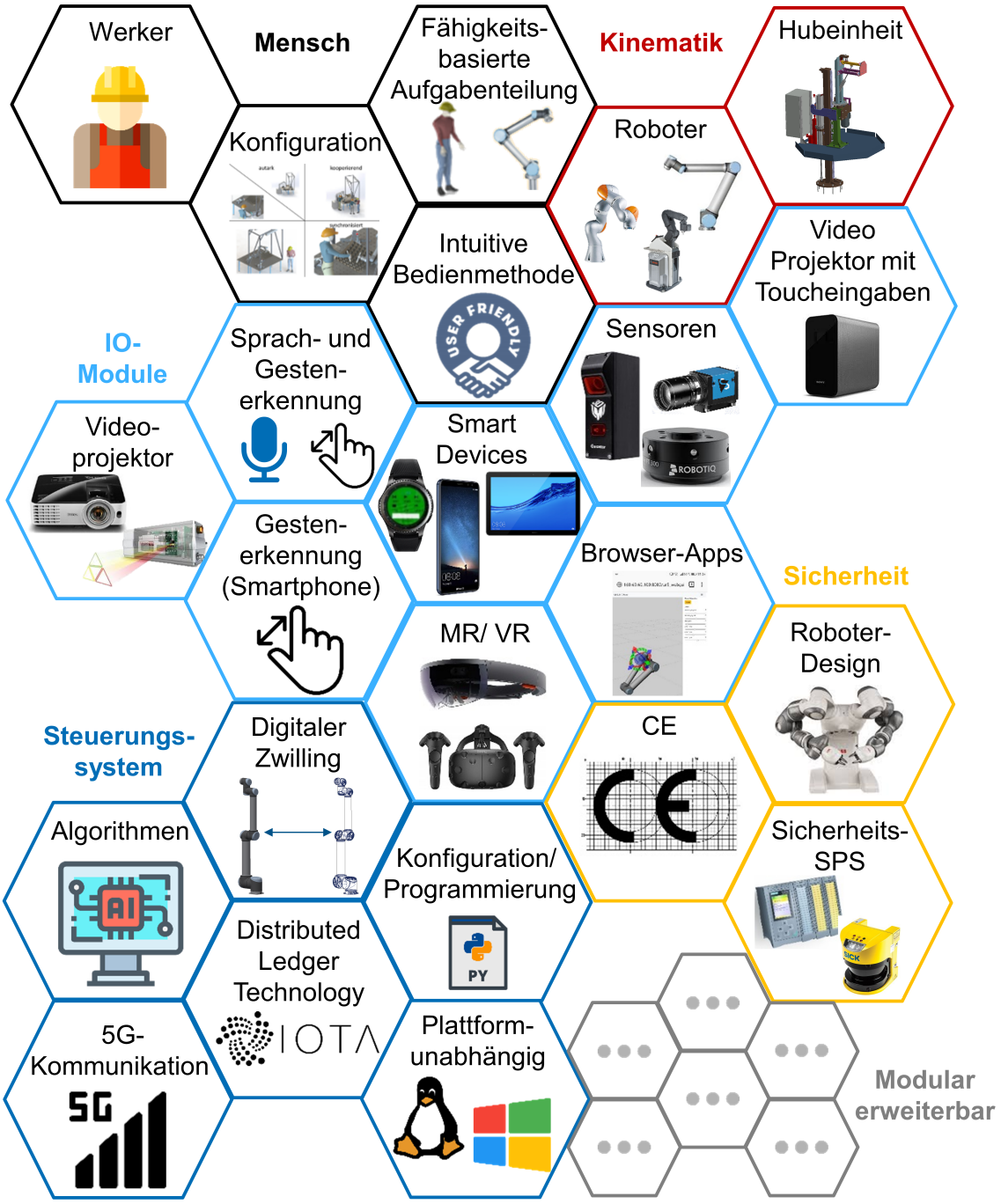


Abbildung 5.1: Das modulare Steuerungssystem zur Konfiguration des Montagesystems mit multimodalen Interaktionsmöglichkeiten in Anlehnung an [10]

Löcher detektiert, wird eine Nachricht mit den X- und Z-Koordinaten des Loches an den **Zustandsautomaten** gesendet, der gleichzeitig die aktuelle Pose vom **Roboter** ausliest und über einen Konnektor im Modul **Datenbank** hinterlegt.

Bei der Entwicklung der Module und Services wurde auf ein Höchstmaß an Modularität geachtet, damit einzelne Module individuell wiederverwertet, umgeschrieben, erweitert und transferiert werden können. Das in Abbildung 5.1 graphisch dargestellte modulare Steuerungssystem wurde während der Entwicklungs- und Forschungszeit dieser Arbeit stetig weiterentwickelt. Abbildung 5.2 zeigt die entstandene Sammlung von Software- und Hardwarekomponenten. Während einige Komponenten auf echtzeitfähiger Hardware wie bspw. der SPS oder dem Laserliniensensor laufen, wurden viele Software-Treiber auf einer klassischen Computerarchitektur oder als App für Mensch-Technik-Interaktionsgeräte entwickelt. Ein Großteil der Module wurde nativ auf einem Stationscomputer installiert. Weitere Module wurden in virtuelle Maschinen oder Docker-Container ausgelagert. Auf Serverhardware ausgelagerten virtualisierten Containern steht bspw. mehr Speicher oder Rechenleistung zur Verfügung als auf lokalen Systemen. Bezüglich der Interaktion zwischen Mensch und Technik existiert die Möglichkeit, über graphische Oberflächen auf physischen Geräten oder virtuell, mithilfe von Mixed Reality Brillen Eingaben zu tätigen.

	Physische Komponenten (echtzeitfähig)	**Physische Komponenten (nicht echtzeitfähig)**	**Virtuelle Komponenten**
MTI		• Smartwatch-App • Node-Red UI • Tablet-App-Browser • ROS Native/ Web	• HoloLens-App • Smart-Beamer-App • Simulationsumgebung

Software	• Siemens SPS
	• Bosch XDK IOTA Implementierung
	• Safety-SPS-Implementierung
		• Statemachine
		• Treiber/ Konnektoren
		  • Hubeinheit
		  • Kraft-Momenten-Sensor
		  • SmartBeamer2MQTT
		  • Laser-Sensor
		  • Rosrobot2web
		  • ROS Core
		  • PLC2MQTT
		  • HoloLens2ROS
		  • KI-Analyse
		• Node-Red
			Docker-Container
			• MQTT Broker
			• MongoDB-Datenbank
			• KI-TensorFlow-Container
			• IOTA-MAM
			• IOTA-Web

Hardware	• Universal Robots UR10 • Siemens SPS • Safety SPS • Bosch XDK • Server	• Laserliniensensor • Kraft-Momenten-Sensor • Hubeinheit • Kamera • Videoprojektor • HoloLens • Tablet • Smartwatch	

Abbildung 5.2: Software- und Hardwarekomponenten des Steuerungssystems

Aufgrund der Modularität kann das entwickelte Steuerungssystem zudem flexibel auf

Änderungen reagieren. Es bietet mithilfe von standardisierten Schnittstellen unterschiedlichste Möglichkeiten der Informationsein- oder ausgabe - sowohl hinsichtlich der Sensorik und Aktorik als auch bezüglich der MTI.

5.2 Messstrategien

Um die Unterschiede zwischen dem realen und dem virtuellen Modell zu minimieren, wird ein Referenzierungsprozess des Roboters an der Teilschale oder dem Ringspant der Sektion 19 mit einem Laserliniensensor durchgeführt. Darüber hinaus wurde die Merkmalserkennung unter Verwendung von Lasersensordaten in Kombination mit einer Interpolation für eine höhere Genauigkeit implementiert.

Referenzierung reales und virtuelles Modell

Es wird ein virtuelles Modell erstellt, das ein definiertes Nietmuster beschreibt. Aus diesem virtuellen Modell werden nachfolgend Wegpunkte für das Roboterprogramm abgeleitet. Da eine Abweichung zwischen dem realen und virtuellen Modell minimiert werden muss, wird eine Online-Korrektur des lokalen Koordinatensystems durchgeführt.[1]

Die nachfolgenden Gleichungen sind graphisch in Abbildung 5.3 dargestellt.

Der Abgleich zwischen realem und virtuellem Modell erfolgt durch das Bestimmen von drei Punkten auf dem Werkstück: ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p1}}$, ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p2}}$ und ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p3}}$. Aus diesen Punkten können Verbindungsvektoren (${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p21}}$ und ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p31}}$) berechnet werden. Die Berechnung des Kreuzprodukts ergibt den Normalvektor der Ebene, der durch die Verbindungsvektoren (${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p21}}$ und ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p31}}$) erzeugt wird. Die Normalisierung führt zum Einheitsvektor ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{jz}}$. Zusätzlich zur Normalisierung des Vektors ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p21}}$ wird der zweite Einheitsvektor ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{jx}}$ berechnet. Das Kreuzprodukt aus ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{jz}}$ und ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{jx}}$ wird zur Berechnung des dritten Einheitsvektors ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{jy}}$ verwendet. Die Definition von zwei Geraden als ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p1}} + \boldsymbol{\lambda_1} \cdot {}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{jx}} = \mathbf{O_j}$ und ${}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{p3}} + \boldsymbol{\lambda_2} \cdot {}^{\boldsymbol{i}}\underline{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{jy}} = \mathbf{O_j}$ führt zur Gleichung 5.1. Das Gleichungssystem 5.1 kann erstellt und gelöst werden.

$$\begin{pmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{1z} \end{pmatrix} + \lambda_1 \begin{pmatrix} {}^{i}e_{jx_x} \\ {}^{i}e_{jx_y} \\ {}^{i}e_{jx_z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{3x} \\ p_{3y} \\ p_{3z} \end{pmatrix} + \lambda_2 \begin{pmatrix} {}^{i}e_{jy_x} \\ {}^{i}e_{jy_y} \\ {}^{i}e_{jy_z} \end{pmatrix} \tag{5.1}$$

[1] Abschnitte dieses Kapitels wurden als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Geenen, A., and Masiak, T.: Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process, SAE Technical Paper, DOI: doi.org/10.4271/2017-01-2096, 2017.

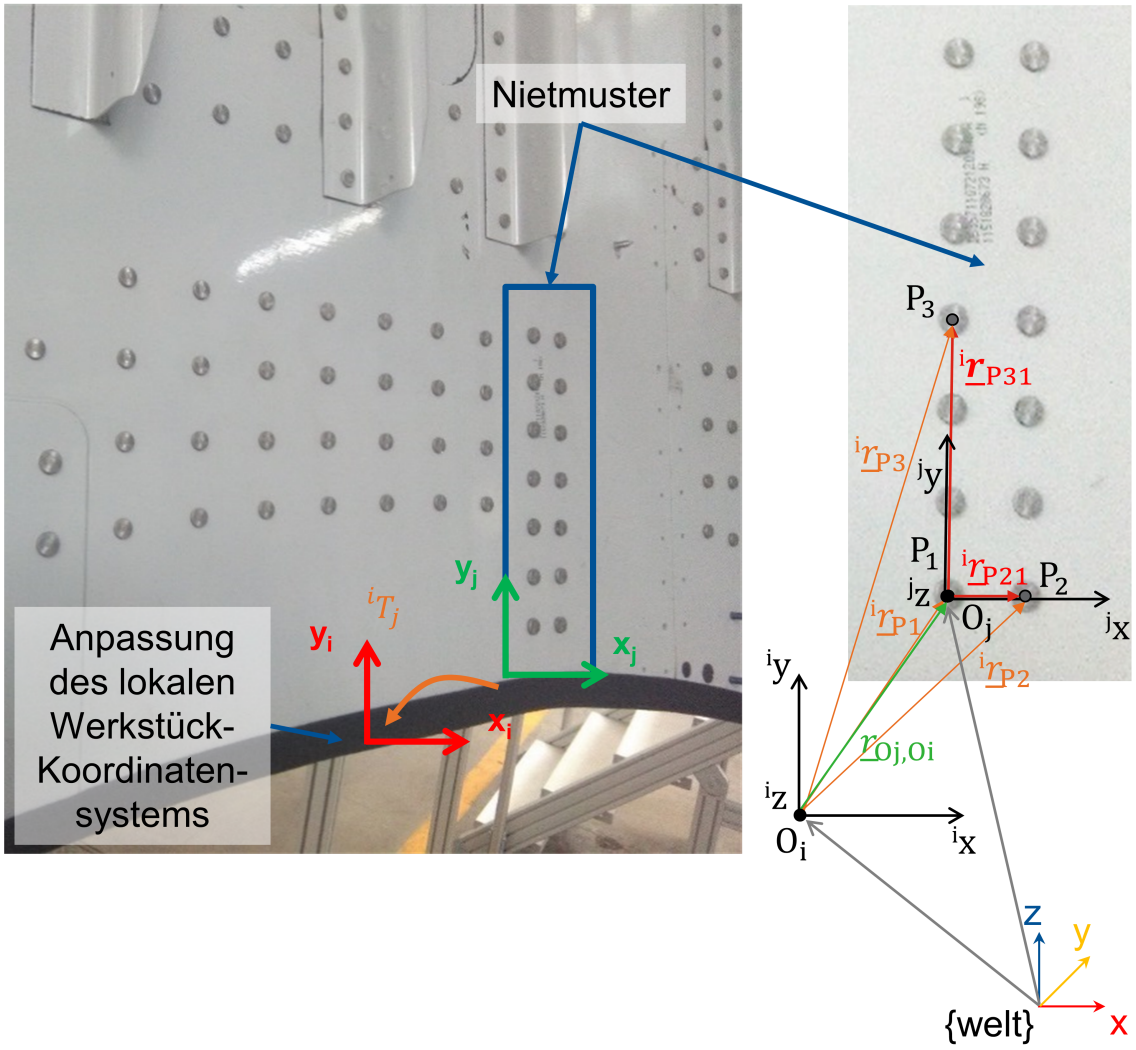


Abbildung 5.3: Anpassung des Koordinatensystems entsprechend den Gleichungen 5.1 und 5.2 in Anlehnung an [114]

Dadurch kann die Transformationsmatrix 5.2, die das angepasste lokale Koordinatensystem symbolisiert, im nachfolgenden Nietvorgang bestimmt und eingesetzt werden. Die Transformationsmatrix beschreibt die Abweichung zwischen dem virtuellen und realen Modell.

$$
{}^i\mathbf{T}_j = \begin{pmatrix} {}^ie_{jx_x} & {}^ie_{jy_x} & {}^ie_{jz_x} & {}^ix_{o_j,o_i} \\ {}^ie_{jx_y} & {}^ie_{jy_y} & {}^ie_{jz_y} & {}^iy_{o_j,o_i} \\ {}^ie_{jx_z} & {}^ie_{jy_z} & {}^ie_{jz_z} & {}^iz_{o_j,o_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{5.2}
$$

Merkmalserkennung durch Interpolation und Best-Fit-Verfahren

Nebst dem Abgleich zwischen dem realen Produkt und dem virtuellen Modell wird eine Feature-Erkennung der Nietlöcher durch Interpolationen und eine Best-Fit-Methode implementiert, um die Abweichungen zwischen den Modellen zu minimieren.[2]

Der 2D-Laserliniensensor wird am Flansch des Roboters montiert und zu diesem kalibriert. Die Messungen des Sensors werden durch Multiplikation der zweidimensionalen Messwerte mit der Kalibriermatrix zwischen dem Sensorkoordinatensystem und dem Basiskoordinatensystem des Roboters auf den 3D-Raum erweitert. Dieser liefert somit 3D-Koordinaten von jedem gemessenen Punkt. Der Sensor wird verwendet, um das Nietloch im Ringspant oder der Teilschale der Flugzeugsektion zu detektieren.

Theoretisch hat ein Nietloch eine kreisförmige Form, und die Erfassung von drei Punkten an seinem Umfang ist ausreichend, um den Kreis, der das Loch beschreibt, zu interpolieren. Ein Kreis wird durch Parameter wie Mittelpunkt, Radius und Normalvektor definiert, die die Orientierung des Kreises im Raum beschreiben. Aufgrund von Fertigungstoleranzen und Messrauschen ist die Bohrung jedoch nicht explizit als Kreis definiert, der aus drei Punkten interpoliert wird. Aus diesen Gründen wird eine Best-Fit-Methode verwendet, um den Kreis zu erkennen, die das Loch mit einem minimalen Fehler interpoliert. Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung der Best-Fit-Methode ist ein überbestimmtes System. Das bedeutet, dass mindestens vier Punkte am Umfang der Bohrung gemessen werden müssen. Die gemessenen Punkte liegen aufgrund des Messrauschens und anderer Faktoren nicht genau auf einem bestimmten Kreis, wie die Abbildung 5.4 deutlich macht.

Die Methode der Merkmalserkennung lässt sich in drei wesentliche Abschnitte unterteilen. Zunächst muss die Ebene, die so nah wie möglich an den 3D-Messpunkten liegt, durch eine Singulärwertzerlegung angepasst werden. P_m ist ein Punkt auf der zu fittenden Ebene und der Mittelwert aller gemessenen Punkte. A ist eine 3xn-Matrix, die wie folgt definiert ist: $\mathbf{A} = (P_1 - P_m, P_2 - P_m, P_n - P_m)^T$, wobei P_1, P_2 und P_n die gemessenen Punkte seien und $P_m = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{n}$ der Mittelwert aller gemessenen Punkte ist. Der Normalenvektor $\underline{n}$ kann durch Lösen der Gleichung 5.3 bestimmt werden. Das Ziel ist es, den Fehler r zu minimieren:

$$r = ||\mathbf{A} \cdot \underline{n}||^2 \stackrel{!}{=} MIN \qquad mit \qquad \underline{n} \in \mathbb{R}^3; ||\underline{n}|| = 1 \tag{5.3}$$

[2] Abschnitte dieses Kapitels wurden als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Kanso, A. and Masiak, T.: Collaboration in a Hybrid Team of Human and Robot for Improving Working Conditions in an Aircraft Riveting Process, SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2019-01-137, 2019.

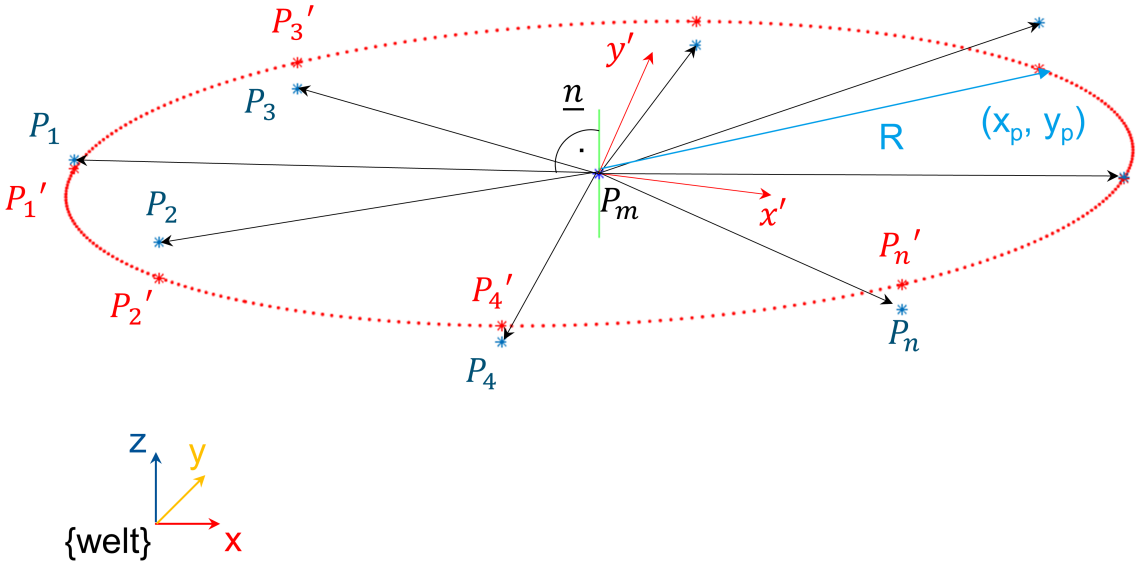


ABBILDUNG 5.4: Feature-Erkennung der Nietlöcher durch Interpolation und Best-Fit-Methode. Vektoren zu den von einem Laserliniensensor aufgezeichneten verrauschten Punkten; projizierte Punkte zu der angepassten 2D-Ebene in Anlehnung an [10]

Der Normalenvektor der gefitteten Ebene oder des Kreises wird durch Lösen der Gleichung 5.3 bestimmt. Im nächsten Schritt werden die gemessenen Punkte auf die angepasste 2D-Ebene projiziert. Matrix $\mathbf{A}$ wird in Matrix $\mathbf{A}_{2D}$ umgewandelt. Das Problem der Kreisanpassung wird somit in ein 2D-Problem transformiert. Die Kreisgleichung in 2D wird wie folgt beschrieben:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2 \tag{5.4}$$

$$(2x_c)\, x + (2y_c)\, y + \left(R^2 - x_c^2 - y_c^2 - y_c^2\right) = x^2 + y^2 \tag{5.5}$$

$$c_o x + c_1 y + c_2 = x^2 + y^2 \tag{5.6}$$

Dabei sind x und y 2D-Koordinaten des Kreises, x_c und y_c die Koordinaten der Kreismitte und R ist der Radius des Kreises. Die Transformation des 3D-Punktes in eine 2D-Ebene führt zu dem System in Gleichung 5.7, Gleichung 5.8, Gleichung 5.9 und Gleichung 5.10:

$$\mathbf{A}_{2D} = \begin{pmatrix} x_1 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{pmatrix} \tag{5.7}$$

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 \end{pmatrix} \tag{5.8}$$

$$\underline{c} = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} \tag{5.9}$$

$$\mathbf{A}_{2D} \cdot \underline{c} = \underline{b} \tag{5.10}$$

Gleichung 5.10 wird mit der Methode der kleinsten Quadrate gelöst:

$$\underline{c} = \left(\mathbf{A}_{2D}{}^T \cdot \mathbf{A}_{2D}\right)^{-1} \cdot \mathbf{A}_{2D}{}^T \cdot \underline{b} \tag{5.11}$$

$$x_c = \frac{c_0}{2}; y_c = \frac{c1}{2}; \mathrm{R} = \sqrt{{c_2}^2 + {x_c}^2 + {y_c}^2} \tag{5.12}$$

Abschließend werden die Koordinaten des Kreismittelpunktes zurück in den 3D-Raum transformiert und im Roboter-Basiskoordinatensystem dargestellt. Zuletzt wird der Mittelpunkt des Kreises in das Koordinatensystem des Amboss-Werkzeuges für die Positionierung während des Nietvorgangs transformiert. Nachfolgend kann der kollaborative Nietprozess zwischen Mensch und Roboter ausgeführt werden. Zudem kann aus der Abweichung von gemessenen Daten und den so gewonnenen Modelldaten auf die Qualität des Nietloches geschlossen werden.

Konzept zur Prozessabsicherung - Toleranzmanagement

Für einen erfolgreichen Nietvorgang ist eine genaue Positionierung und Ausrichtung des Ambosses in Bezug auf den Niet erforderlich. Zunächst wurde zu diesem Prozess eine Machbarkeitsstudie ohne Messtechnik durchgeführt, d. h. der Amboss wurde vom Roboter basierend auf den geplanten Abmessungen der Sektionstonne und den Betriebsmitteln positioniert. Der Niet oder die entsprechende Bohrung befindet sich im Rahmen der Druckkalotte und dem Ringspant. Der Ringspant wird nach der Eintaktung in die Station an bodennahen Befestigungslaschen fixiert. Die Hubeinheit, die sich in der Mitte der Sektionstonne befindet, hebt den Roboter in den Arbeitsraum in der Nähe der Druckkalotte. Der Roboter positioniert dann den Amboss gegen den Niet.[3]

Die resultierende Toleranzkette ist in Abbildung 5.5 grau markiert. Sie besteht aus vielen Gliedern, die große Variationen darstellen. Die Nietlöcher in der Druckkalotte und im Ringspant sind ungenau in Bezug auf die Befestigungslaschen positioniert, d. h. nicht, wie im CAD-Modell geplant. Geringe Abweichungen in der Positionierung des Ringspantes, insbesondere bei Neigungen, führen aufgrund der Dimensionen des Bauteils zu großen Positionsabweichungen der Nietlöcher in Bezug auf die berechnete Roboterposition. Darüber hinaus beeinflussen sowohl die Positionsungenauigkeiten der Hubeinheit als auch die des Roboters den Abstand zwischen Amboss und Niet.

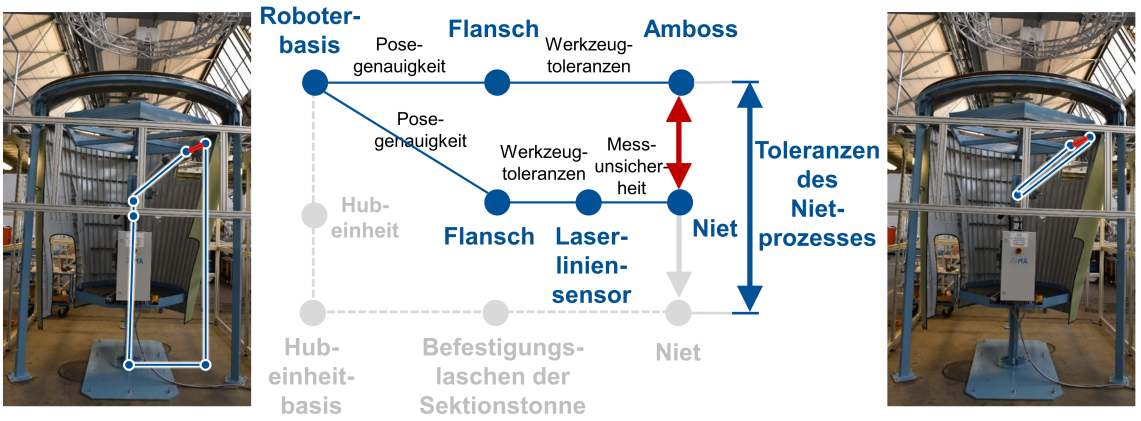


Abbildung 5.5: Toleranzkette mit und ohne Laserliniensensor im Forschungsdemonstrator in Anlehnung an [149]

Grundlegende Prämisse des Demonstrators ist: Eine Umsetzung ohne jegliche Messtechnik ist aufgrund der großen Produktdimensionen und der geringen Toleranzen nicht

[3] Dieses Kapitel wurde als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Schirmer, L. and Masiak, T.: Tolerance Management in a Semi-Automated and Collaborative Human-Robot Aircraft Riveting Process, SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2019-01-1373, 2019.

möglich. Daher ist eine Verkürzung der Toleranzkette durch zusätzliche Sensoren erforderlich. Aus diesem Grund wurde von Beginn an ein Lasertriangulationssensor eingesetzt.

Mit der Einführung des Lasertriangulationssensors richtet sich die Genauigkeit des Abstandes zwischen Niet und Amboss nach der Messunsicherheit des Linienlasers, der Roboterpositionierung und der Kalibrierung des Werkzeugs (siehe blaue Toleranzkette in Abbildung 5.5). Durch die Verkürzung der Toleranzkette werden die zu erwartenden Abweichungen reduziert.

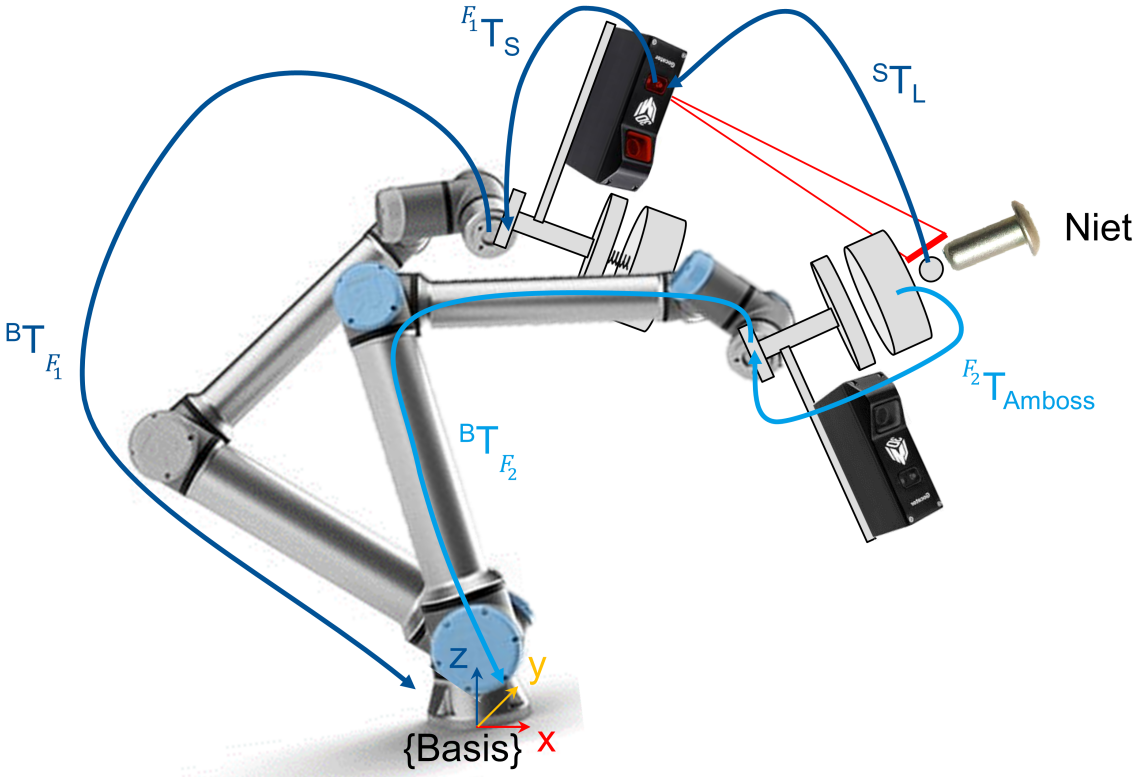


Abbildung 5.6: Transformationsbeziehungen zwischen Nietloch, Sensor, Roboterbasis und Amboss in Anlehnung an [149]

Die Transformationsbeziehungen in Abbildung 5.13 zeigen die Struktur und die damit verbundenen Toleranzen der verwendeten Komponenten, basierend auf den Transformationsbeziehungen zwischen Nietloch, Sensor, Roboterbasis und Amboss. Um die Positionen und Ausrichtungen der Nietbohrungen zu bestimmen, führt der Roboter zunächst einen Laserscan mit dem Lasertriangulationssensor durch. Mit der Transformationsgleichung 5.13 werden die Nietlöcher in Roboter-Basiskoordinaten umgerechnet:

$$ {}^{B}\mathbf{T}_{L} = {}^{B}\mathbf{T}_{F_1} \cdot {}^{F_1}\mathbf{T}_{S} \cdot {}^{S}\mathbf{T}_{L} \tag{5.13} $$

Im Nietprozess übernimmt das Robotersystem die Gegenhaltefunktion, indem es den Amboss vor dem Nietloch positioniert. Unter der Annahme, dass das zuvor gemessene Nietloch der neuen Pose des Ambosses entspricht, kann die anzufahrende Pose des Roboters ${}^{B}\mathbf{T}_{F_2}$, wie in Gleichung 5.14 dargestellt, berechnet werden.

$$ {}^{B}\mathbf{T}_{Amboss} = {}^{B}\mathbf{T}_{F_2} \cdot {}^{F_2}\mathbf{T}_{Amboss} \stackrel{!}{=} {}^{B}\mathbf{T}_{L} \tag{5.14} $$

$$ {}^{B}\mathbf{T}_{F_2} = {}^{B}\mathbf{T}_{L} \cdot ({}^{F}\mathbf{T}_{Amboss})^{-1} \tag{5.15} $$

Abbildung 5.6 und Gleichung 5.15 zeigen, dass die Genauigkeit des Robotersystems zweimal in die Transformation einfließt. Dies wird durch die Transformation vom Sensor zur Roboterbasis und die Transformation von der Roboterbasis zum Amboss verursacht.

Anwendung des Toleranzmanagements auf den Nietprozess Auf Basis der Analyse der Toleranzketten können gezielte Anpassungen am System durchgeführt werden. Mithilfe des Merkmalentstehungsbaum-Konzeptes (MEB), das auf den MRK-Nietprozess angewendet wird, sollen die Toleranzkette und mögliche Optimierungen dargestellt und analysiert werden. Dafür werden die Produkteigenschaften, der Produktionsprozess und die verwendeten Betriebsmittel berücksichtigt, da alle drei Aspekte miteinander interagieren.

Der MEB dient vor allem dazu, den tatsächlichen Prozess zu verstehen und zu dokumentieren. Die Werte für quantifizierbare Merkmale wurden aus technischen Spezifikationen und technischen Zeichnungen oder aus Versuchsdurchführungen abgeleitet.

Wie in Abbildung 5.7 zu sehen ist, hängt die Qualität der Fügeverbindung zwischen Druckkalotte und Ringspant von der Anzahl der korrekt verformten Nieten ab. Die Qualität eines gefügten Niets kann durch drei Merkmale bestimmt werden: die Höhe und den Durchmesser des flach gestauchten Nietkopfes und das optische Erscheinungsbild des Fertigungskopfes des Niets [120]. Darüber hinaus kann das akustische Erscheinungsbild des Niets überprüft werden. Während das Hauptziel des Niets darin besteht, eine bestimmte Zugfestigkeit zu erreichen, konzentriert sich der MEB auf die Eigenschaften, die in der Baugruppe sichtbar und messbar sind, ohne den Niet zu zerstören.

Alle MEB-Module des Nietvorgangs sind im Anhang in Abbildung A.1 dargestellt. Jeder Nietvorgang benötigt zwei Elemente: den Niethammer und seinen Werker sowie den am

Roboter montierten Amboss. Die Merkmale für den Prozess sind Position und Orientierung des Ambosses, die auf den Amboss wirkende Kraft sowie die Module Niethammer, Niet und Bohrung.

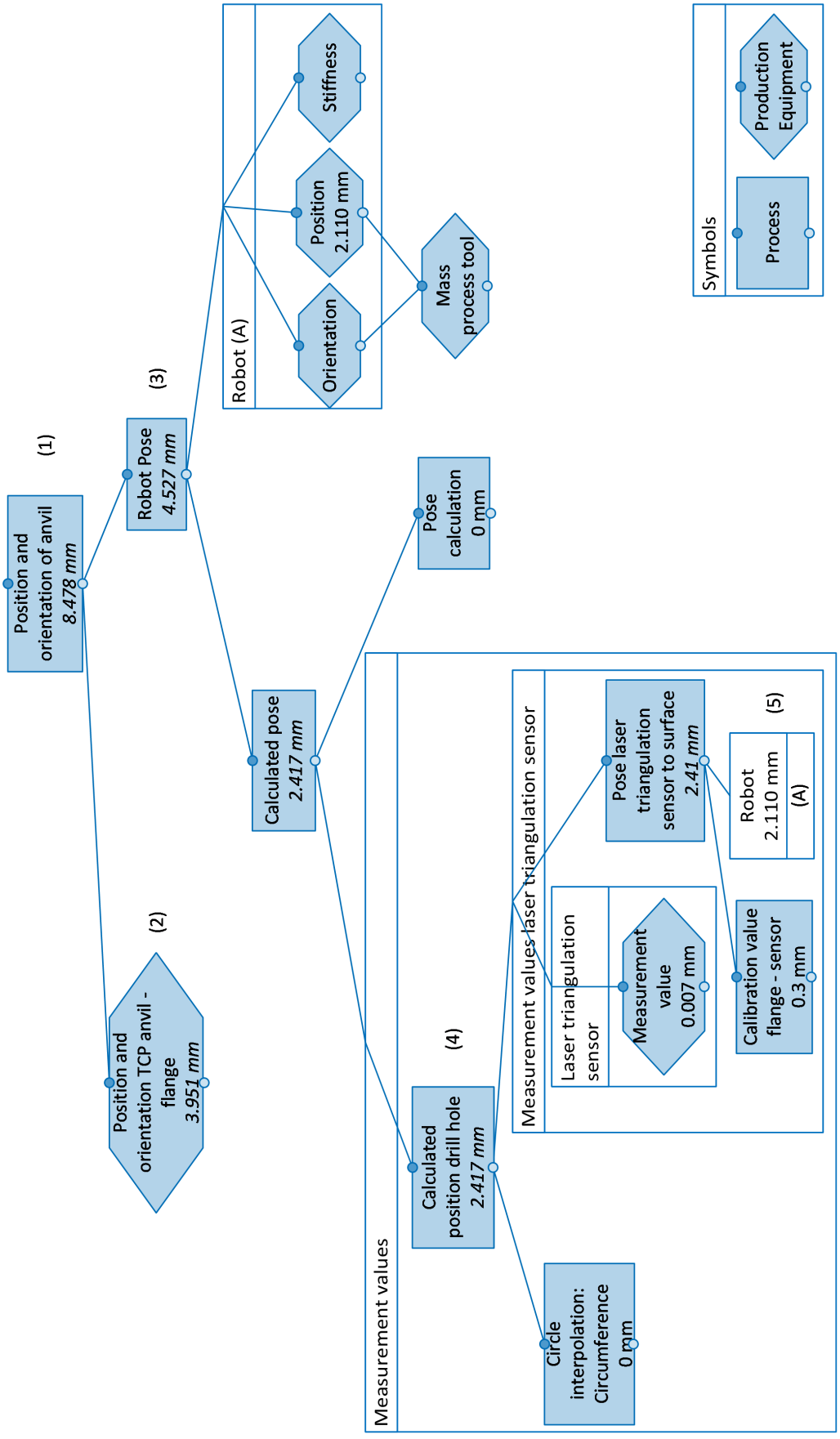


Abbildung 5.7: Zweig des Merkmalentstehungsbaums, der den Roboterteil des Nietprozesses beschreibt [149]

Der Roboter beeinflusst die Kraft, Position und Ausrichtung des Ambosses. Die Gegenkraft ist sowohl vom Roboter (Eigenschaften: Nennlast und Steifigkeit) als auch vom Amboss abhängig, der für die Nietanwendung neu entwickelt wurde (Eigenschaft: Federkonstante und Masse). Während die Eigenschaften des Ambosswerkzeuges in Kapitel 5.3 erklärt werden, wird nachfolgend auf die Toleranzen der Position und Ausrichtung des Ambosses eingegangen. Wie in Abbildung 5.7 dargestellt, setzt sich die Position des Ambosses aus der relativen Position zwischen dem tatsächlichen TCP des Ambosses und dem Roboterflansch sowie der Roboterposition (Abbildung 5.7 (1)) zusammen. Die relative Position zwischen Flansch und Amboss TCP hängt von den Montageabweichungen der einzelnen Teile des Ambosses (Abbildung 5.7 (2)) ab. Die Position und Ausrichtung des Roboters wird von den Eigenschaften des Roboters selbst und der berechneten Pose (Abbildung 5.7 (3)) beeinflusst. Während des Produktionsprozesses wird der Roboter durch eine Hubeinheit in der Sektion vorpositioniert. Der Roboter wird im ersten Abschnitt positioniert und der Laserliniensensor scannt den Ringspant, um die Positionen der Bohrungen zum Roboterkoordinatensystem zu bestimmen. Während des Messvorgangs bestimmt der Laserliniensensor die Position der Löcher relativ zum Sensor, während die Pose des Roboters gespeichert wird. Aus diesen Messungen wird sodann die Nietposition abgeleitet und in Roboterbasiskoordinaten abgespeichert. Die berechnete Position der Bohrung (Abbildung 5.7 (4)) ergibt sich aus der Kreisinterpolation, den Messwerten des Lasers sowie der Position und Ausrichtung des Roboters (Abbildung 5.7 (5)). Der Linienlaser wird bei der ersten Einrichtung des Fügeprozesses kalibriert. Die Hubeinheit wird nicht zwischen dem Messprozess der Niete bewegt und erscheint daher nicht im MEB.

Nach der Einrichtung des MEBs und der Modellierung der quantitativen und qualitativen Merkmale des Prozesses und ihrer Zusammenhänge kann dieser analysiert werden.

Der MRK-Prozess ist in einem Teil des MEBs zu sehen: Der linke Teil des Merkmalentstehungsbaumes ist hauptsächlich vom Roboter abhängig, der rechte Teil des Baumes vom Bediener. Darüber hinaus erscheinen die Eigenschaften des Roboters, insbesondere dessen Position und Ausrichtung, oft im MEB.

Auch die Eigenschaften des Werkers erscheinen ebenfalls oft im MEB, was einerseits von Vorteil ist, da er mit Variationen umgehen kann. Auf der anderen Seite können Werker bspw. den manuell durchgeführten Inspektionsprozess subjektiv betrachten. Es findet sich nur eine Ringstruktur, bei der die Masse des Prozesswerkzeugs die Position und Ausrichtung des Roboters beeinflusst. Insgesamt zeigt der MEB eine durchgängige Baumstruktur, was auf eine gute Prozessstruktur hinweist.

Toleranzketten werden verwendet, um den Ast mit der Position und Ausrichtung des Ambosses zu analysieren, der den Teil des Produktionsprozesses darstellt. Die Visualisierung der Ketten ist in den Abbildungen 5.7 und A.1 zu sehen. Während Abbildung 5.7 die Kette als Diagramm darstellt, wobei Knoten Merkmale und Kanten die Abweichung dazwischen symbolisieren, befindet sich die Toleranzkette auch im Zweig des MEBs. Für die Berechnung der Toleranzketten werden, sofern bekannt, Werte für die Abweichungen verwendet, ansonsten werden Werte aus vorgegebenen Toleranzen geschätzt. Innerhalb der Toleranzketten werden geometrische Abweichungen von Produkt, Produktionsprozess, Betriebsmitteln und insbesondere Messunsicherheiten berücksichtigt. Die abschließende Toleranz ist die Position und Ausrichtung des Ambosses beim Nieten in Bezug auf die Position des Niets. Die Kette selbst besteht aus der Position des Ambosses, der relativen Position des Ambosses zum Roboterflansch, der Roboterposition, der Position und Ausrichtung des Roboters, der berechneten Pose, den Messwerten des Linienlasers, der Ausrichtung des Linienlasers auf die Oberfläche sowie der Position und Orientierungsgenauigkeit des Roboters, hier eines Universal Robots UR10. Das Beispiel in Abbildung A.1 zeigt die Toleranzwerte in z-Richtung, die die wichtigste Kette darstellen. Numerische Einflüsse werden aufgrund ihrer minimalen Auswirkungen vernachlässigt. Auch in der Toleranzkette zeigt sich der signifikante Einfluss des Roboters in seiner doppelten Erscheinung, da der Roboter seine Pose zwischen der Messung des Niets mit dem Linienlaser und dem eigentlichen Nietprozess mit dem Amboss ändert.

Abschließend können die Toleranzketten berechnet werden - hier kommen zwei Versionen zum Einsatz: Arithmetisch/Worst-Case und Root Sum Square (RSS). Jede der Berechnungen nähert sich nur der tatsächlichen Abweichung, aber die Ergebnisse zeigen die Größenordnung und den Bereich, in dem die Abweichungen liegen. Die Testwerte basieren auf relativ konservativen Annahmen: Langsame Verfahrgeschwindigkeit, wenige Änderungen in der Pose zwischen Messen und Nieten und aktuellere Robotersysteme deuten auf eine bessere Positioniergenauigkeit hin.

Die Toleranzen ergeben sich aus den technischen Spezifikationen für den geformten Niet. Der Wert für die z-Achse ergibt sich direkt aus der Nennhöhe und der tolerierten Höhe des gestauchten Niets. Die x- und y-Achswerte werden aus dem Verhältnis der Ambossfläche zum erforderlichen Durchmesser für den verformten Nietkopf abgeleitet. Die Orientierung wird schließlich aus dem erforderlichen Maximalverhältnis zwischen der geringsten und größten Höhe des gestauchten Nietschaftes abgeleitet.

Wie Tabelle 5.1 zeigt, können die geforderten Toleranzen und eine einwandfreie Prozessfähigkeit c_p noch nicht vollständig erreicht werden. Das Problem lässt sich jedoch durch kleine Anpassungen lösen.

	Sollwert	Worst-Case	RSS	RSS C_p
Abweichung x-Achse [mm]	± 3,125	± 2,64	± 1,55	2,02
Abweichung y-Achse [mm]	± 3,125	± 2,64	± 1,55	2,02
Abweichung z-Achse [mm]	+0,6 -0,7	± 2,61	± 1,18	0,42
Abweichung Orientierung [°]	± 9,83	± 0,57	± 0,37	13,47

Tabelle 5.1: Soll- und Istwerte der Toleranzkettenanalyse [149]

Das System kann bspw. um ein zusätzliches Modul zur besseren Positionierung in z-Achsen-Richtung erweitert werden. Ein Ansatz ist die Implementierung weiterer Messtechnik, die während des Nietvorgangs den exakten Abstand misst, oder die Umsetzung eines kraftdrehmomentgesteuerten Nietverfahrens mit automatischer Abschaltung für den Niethammer. Darüber hinaus können Änderungen am Produktionsprozess vorgenommen werden, indem z. B. nur kleine Bewegungen des Roboters zwischen dem Messen und dem Nietprozess zugelassen werden, um die Positionier- und Orientierungsgenauigkeit zu erhöhen. Des Weiteren kann das Ambosswerkzeug mittels einer konstruktiven Erweiterung, der Anbringung von kleinen Abstandshaltern an der Ambossfläche, einen definierten Abstand zwischen Amboss und verformtem Nietschaft garantieren.

5.3 Prozesswerkzeugentwicklung

Bei Montage der Druckkalotte zur Sektionstonne kommen Vollniete zum Einsatz. Das MRK-Nietverfahren erfordert die Entwicklung eines speziellen Gegenhaltewerkzeugs für das Robotersystem. Anforderungen an das Werkzeug sind: Modularität, ein angepasstes Design in Bezug auf den limitierten Arbeitsraum in der Sektion, integrierte Sensoren für die MTI, Sensoren für die Prozesskontrolle und Referenzierung. Ein wesentliches Merkmal des Prozesswerkzeugs ist die Minimierung von Prozesskräften und Schwingungen, die durch den Niethammer in den Niet und damit auch in das Robotersystem eingeleitet werden. Das Aufbringen der Kräfte, insbesondere der Spitzen und Dauerschwingungen, in den Roboter kann zu Schäden an Teilen des Robotersystems wie z. B. den Gelenken und Getrieben führen. Es gilt, die Parameter des Prozesswerkzeugs so zu gestalten, dass die Prozesskräfte, die in die Roboterkinematik eingeleitet werden, minimal sind. Dazu müssen die Eigenfrequenzen des Robotersystems und des Ambosses für die Modellierung eines Zweimassen-Systems, ähnlich wie in 5.8 dargestellt, ermittelt werden. Anschließend

können optimierte Parameter mittels Hardwareanpassungen im Werkzeugprototyp hinterlegt werden.

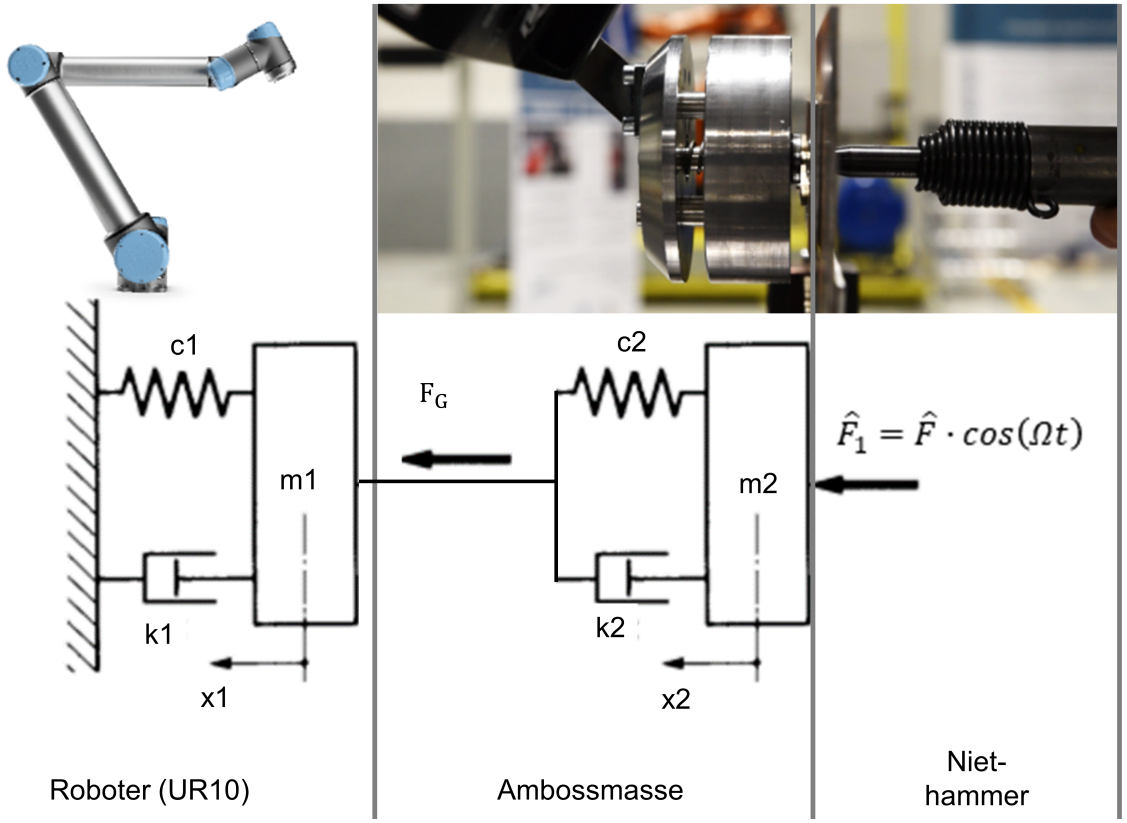


Abbildung 5.8: Zweimassensystem bestehend aus Roboter (links) und Gegenhalter (mitte) als Prozesswerkzeug. Die Kraft- und Schwingungsanregung erfolgt durch den Niethammer (rechts), der vom Werker betätigt wird. In Anlehnung an [127]

Entwicklung des Nietprozesswerkzeuges

Nebst der Bestimmung der Parameter des Roboters und des entwickelten Amboss-Werkzeuges, die im Folgekapitel 5.3 erklärt werden, ist zunächst ein modulares Nietprozesswerkzeug zu entwickeln, das einerseits im Prozess der Druckkalotte und Sektion 19 Verwendung findet, aber auch mit minimalen Anpassungen auf weitere Prozesse und Robotersysteme übertragen werden kann.

Entsprechend der Anwendung und der gewünschten Adaptierbarkeit werden die in Tabelle 5.2 aufgelisteten Anforderungen an das Werkzeug gestellt. Diese wurden aus der Produkt- und Prozessanalyse abgeleitet und müssen alle Fähigkeiten abdecken, die normalerweise der Mensch im Prozess anwendet. Mittels sensorischer und mechanischer Komponenten soll die Fähigkeit des Menschen, zu sehen oder nachgiebig auf Prozesskräfte zu reagieren, in das Werkzeug integriert werden.

Neben der Integration verschiedener Sensoren wird der Möglichkeit, die Werkzeugeigenschaften hinsichtlich der Frequenzen des Roboters und des Werkzeugs einzustellen, ein besonderer Stellenwert eingeräumt, damit der vom Niethammer erzeugte Krafteinfluss und die entstehenden Schwingungen reduziert werden.

Anforderungen	Eigenschaften
Sensoren	• Halterung für Laserliniensensor • Halterung für Kamera • Integration eines Kraft-Momenten-Sensors
Parameter	• Prozesskraft • Gegenhaltergewicht entsprechend Flugzeugspezifikation • Roboternutzlast • Roboter- und Werkzeugfrequenzen • Einstellmöglichkeit der Werkzeugeigenschaft (Schwingfähigkeit) hinsichtlich Frequenzen
Nachgiebigkeit	• Konstruktive Integration des Feder-Dämpfer-Prinzips • Schwingfähigkeit • Kompressibilität bzw. mechanisches Nachführen des Werkzeugs
Design	• Sicheres Design entsprechend Normen • Design angepasst an begrenzten Arbeitsraum • Modularität • Universalität, um verschiedene Niettypen abzudecken

Tabelle 5.2: Anforderungsliste an das Nietprozesswerkzeug

Die übergeordnete Funktion des Nietwerkzeuges ist die erfolgreiche Durchführung des kollaborativen Nietprozesses mit dem Menschen. Wie der Anforderungsliste entnommen

werden kann, muss das Werkzeug weitere Unterfunktionen wie z. B. die Integration diverser Sensoren, ermöglichen. Die folgenden Komponenten wurden den entsprechenden Teilfunktionen des Nietwerkzeuges zugeordnet (vgl. Tabelle 5.3).

Teilfunktion	Komponenten
Detektion des Niets	Laserliniensensor
Schwingfähigkeit	Mechanisches Federelement mit Stellschraube
Prozessdatenerfassung	Laserliniensensor, Kamera, Kraft-Momenten-Sensor

Tabelle 5.3: Teilfunktionen des Werkzeuges und ausgewählte Komponenten

Abbildung 5.9 zeigt eine Schnittdarstellung des montierten Nietwerkzeuges und dessen Komponenten. Die für den Nietprozess notwendige Schwungmasse (Abbildung 5.9 (1)) sorgt für die plastische Kaltverformung des Nietschaftes während der Prozessausführung. Die Masse ist mittels Passbolzens (Abbildung 5.9 (6)) und entsprechender Gleitbuchsen (Abbildung 5.9 (4)) in der Rückwand (Abbildung 5.9 (7)) des Werkzeuges gelagert. Das eingelassene Federelement (Abbildung 5.9 (2)) dient der aktiven Schwingungsisolierung und reduziert so die Übertragungskraft auf die Roboterkinematik. Das Federelement kann über eine Stellschraube (Abbildung 5.9 (3)) vorgespannt bzw. eingestellt werden, um bspw. die Abstimmung zwischen Werkzeug- und Roboterresonanzfrequenzen durchzuführen. Die Rückwand des Werkzeugs ist über einen Auslegerarm (Abbildung 5.9 (9)) mit dem Roboterflanschadapter (Abbildung 5.9 (10)) verbunden und enthält zudem eine Halteplatte (Abbildung 5.9 (8)) für das Montieren des Laserliniensensors sowie der Kamera.

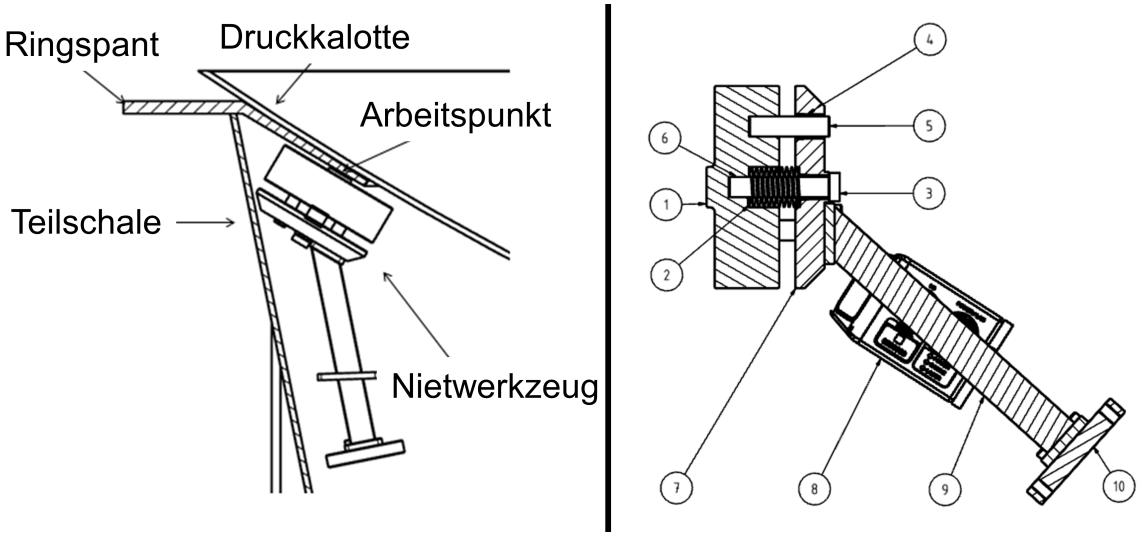


Abbildung 5.9: Skizze des Nietwerkzeugprototyps entsprechend der Anforderungsliste [150]

Bestimmung der Eigenfrequenz des Robotersystems und des Gegenhalters

Nachfolgend wird eine exemplarische Methode zur Bestimmung der Eigenfrequenz des Robotersystems und des Gegenhalters aufgezeigt. Die Vorgehensweise hat zum Ziel, die Kräfte, die durch den Nietprozess in das Werkzeug und die Roboterkinematik eingeleitet werden, zu begrenzen. Die ermittelten Parameter werden in das Nietwerkzeug übertragen.

Zur Anwendung des Zweimassenschwingers müssen die Parameter des Robotersystems sowie des Gegenhalters ermittelt werden. Dazu wird die experimentelle Modalanalyse angewandt, die auf Basis der Daten von Schwingungsanalysen eine Beschreibung der Struktur bzw. des dynamischen Verhaltens liefert. Im Versuchsaufbau wird eine Betriebsschwingformanalyse zur Ermittlung der Schwingungen während der Prozessausführung unter Verwendung eines Lasertrackers (Typ: API Radian R50) durchgeführt. Da die Frequenzen des Robotersystems und des Nietwerkzeugs abhängig von der Roboterpose sind, sei an dieser Stelle zu erwähnen, dass die ermittelten Frequenzen in dieser Arbeit auf die Roboterpose während des Nietprozesses abgestimmt sind.[4]

Zunächst gilt es, die Steifigkeit c_1 des Robotersystems zu ermitteln. Der Roboter wird zur Bestimmung des Parameters mit einer Last von 2,5 kg belastet und die Auslenkung des TCPs von 0,475 mm wird mittels eines Lasertrackers gemessen.

$$c_1 = \frac{m_1 \cdot g}{x_1} = \frac{2,5kg \cdot 9,81\frac{m}{s^2}}{0,475mm} \approx 52\frac{N}{mm} \tag{5.16}$$

Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen des Roboters wird eine Sprungantwort des Systems durch eine externe Krafteinleitung erzeugt. Unter Beachtung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems zur Vermeidung von Messfehlern wird das Signal mit dem Lasertracker bei 100 Hz aufgezeichnet [151]. In Abbildung 5.10 links ist das aufgezeichnete Signal im Zeitbereich dargestellt, in Abbildung 5.10 rechts unter Verwendung der diskreten Fourier-Transformation im Frequenzbereich. Die ermittelte Frequenz f_1 des Roboters liegt bei 9,4 Hz.

[4] Dieses Kapitel wurde als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Geenen, A., Kanso, A., Masiak, T.: Development of a Human-Robot-Collaboration System using the Example of a Riveting Process in Aircraft Assembly, Journal of Robotics and Automation, URL: https://scholarlypages.org/Articles/robotics/jra-2-009.pdf, 2018.

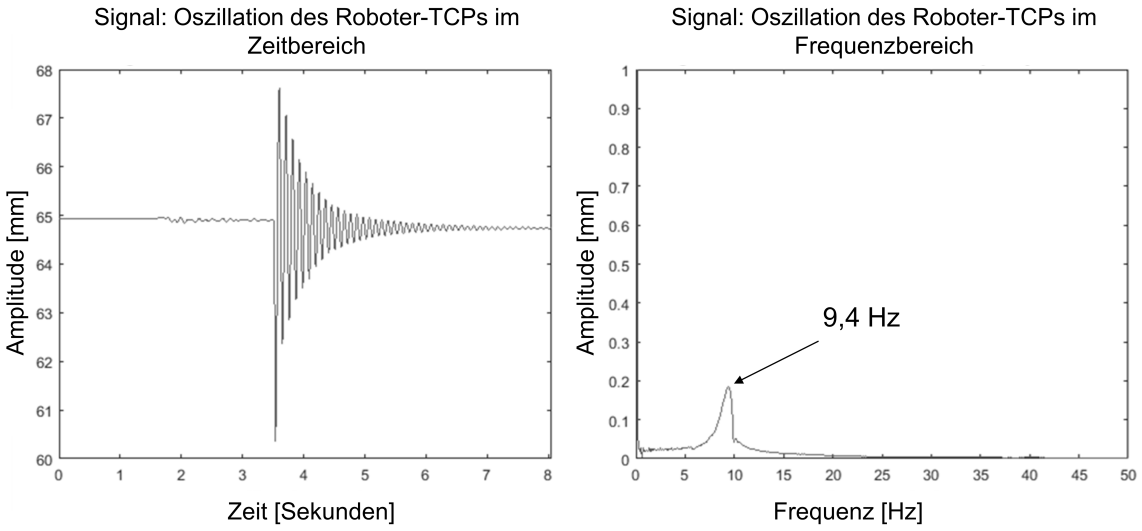


Abbildung 5.10: Schwingung des Roboter-TCPs in z-Achsenrichtung nach Stimulation durch einen Hammer (links). Ergebnis der Fast-Fourier-Transformation des gegebenen Signals (rechts) in Anlehnung an [127].

Daraus kann die effektive Masse m_1 des Roboters wie folgt bestimmt werden.

$$m_1 = \frac{c_1}{(2 \cdot \pi \cdot f_1)^2} \approx 15kg \tag{5.17}$$

Des Weiteren gilt es, die Parameter des Gegenhalters zu bestimmen. Die Schwungmasse m_2 des Gegenhalters wurde konstruktiv, den Spezifikationen entsprechend, auf 2 kg festgelegt. Die Steifigkeit c_2 des verbauten Federelementes wird ähnlich der des Roboters ermittelt. Bei einer Belastung mit 3,5 kg beträgt die Auslenkung 3,12 mm. Daraus resultiert in Gleichung 5.18 $c_2 = 11\frac{N}{mm}$:

$$c_2 = \frac{m_2 \cdot g}{x_2} = \frac{3,5kg \cdot 9,81\frac{m}{s^2}}{3,12mm} \approx 11\frac{N}{mm} \tag{5.18}$$

Es können für das freigeschnittene System aus Abbildung 5.8 die beiden nachfolgenden linearen Differentialgleichungen (5.19 und 5.20) zweiter Ordnung aufgestellt werden. [29] Die Reibung wurde an dieser Stelle vernachlässigt:

$$m_1\ddot{x_1} + x_1(c_1 + c_2) - c_2x_2 = 0 \tag{5.19}$$

$$m_2\ddot{x_2} + c_2x_2 - c_2x_1 = 0 \tag{5.20}$$

Nach Einfügen der Eigenschwingungswerte $x_1 = A_1 \cos \omega t$ und $x_2 = A_2 \cos \omega t$ in Gleichung 5.19 und 5.20 kann das Ergebnis in Matrixnotation (5.21) dargestellt werden.

$$\begin{pmatrix} c_1 + c_2 - m_1\omega^2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 - m_2\omega^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5.21}$$

Unter der Annahme, die Amplituden A_1 und A_2 seien nur dann von Null verschieden, wenn die Determinante der zweireihigen Koeffizientenmatrix Null ist, ergibt sich die quadratische Gleichung für die Frequenzen. Die Lösungen von $\omega_1 \approx 8\,Hz$ und $\omega_2 \approx 13\,Hz$ können mittels der Gleichungen 5.22 und 5.23 bestimmt werden.

$${w_1}^2 = \frac{1}{2}(\frac{c_1 + c_2}{m_1} + \frac{c_2}{m_2}) - \sqrt{\frac{1}{4}(\frac{c_1 + c_2}{m_1} + \frac{c_2}{m_2}) - \frac{c_1c_2}{m_1m_2}} \tag{5.22}$$

$${w_2}^2 = \frac{1}{2}(\frac{c_1 + c_2}{m_1} + \frac{c_2}{m_2}) + \sqrt{\frac{1}{4}(\frac{c_1 + c_2}{m_1} + \frac{c_2}{m_2}) - \frac{c_1c_2}{m_1m_2}} \tag{5.23}$$

Wird das zuvor beschriebene Zweimassensystem durch den Niethammer mit einer Frequenz von $f = 29\,Hz$ angeregt, kann der Amplitudenfrequenzgang unter Verwendung der Gleichung 5.24 und 5.25 in Abbildung 5.11 dargestellt werden.

$$|\hat{x}_1| = \hat{F}_1|\frac{c_2}{(c_1 + c_2 - m_1\Omega^2)(c_2 - m_2\Omega^2) - {c_2}^2}| \tag{5.24}$$

$$|\hat{x}_2| = \hat{F}_1|\frac{c_1 + c_2 - m_1\Omega^2}{(c_1 + c_2 - m_1\Omega^2)(c_2 - m_2\Omega^2) - {c_2}^2}| \tag{5.25}$$

Die Gleichungen beschreiben ein System mit harmonischer Krafterregung und frequenzunabhängiger Amplitude. [29] Das Diagramm in Abbildung 5.11 zeigt die Amplituden des Roboters und des Gegenhalters sowie den Tilgungspunkt. Die Darstellung zeigt zwei

Merkmale. Zum einen liegen die Resonanzbereiche für den Roboter und den Gegenhalter in überlappenden Bereichen. Zweitens liegt der Tilgungspunkt, bei dem der Gegenhalter aufhört zu schwingen, bei ca. 10 Hz. Die Anregungsfrequenz des Niethammers bei 29 Hz liegt bei der gewählten Auslegung des Prozesswerkzeuges außerhalb der Resonanzbereiche der jeweiligen Systeme. Dies ermöglicht den Betrieb des Nietvorgangs in einem sicheren Frequenzbereich, der weit vom Resonanzbereich entfernt ist.

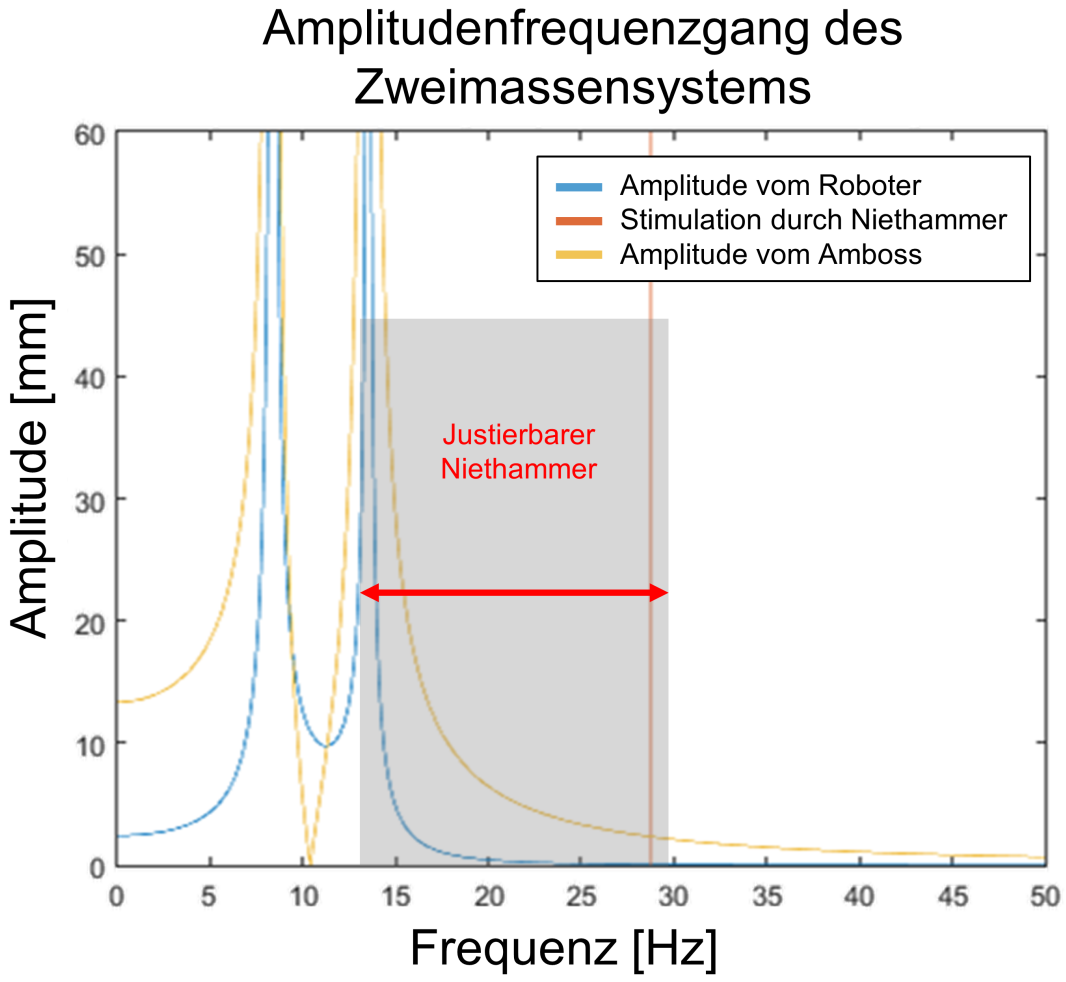


Abbildung 5.11: Amplitudenfrequenzgang des Zweimassensystems von Roboter und Gegenhalter in Anlehnung an [127]

Ziel des entwickelten Ambosswerkzeuges ist die Minimierung der Schwingungen und Kräfte auf den Roboterflansch, um somit dessen Struktur bzw. die Gelenke zu schützen. Die Kraft F_G wird, wie in Abbildung 5.8 veranschaulicht, entsprechend Gleichung 5.26 mit den Geschwindigkeiten der Körper $\dot{x}_1$ und $\dot{x}_2$ bestimmt.

$$|F_G| = |c_2(x_1 - x_2) + k_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)| \tag{5.26}$$

Unter der Annahme, dass es sich um ein dämpfungsfreies System handelt und somit $k_2 = 0$ ist, kann aus der Gleichung 5.26 die Übertragungskraft F_G ermittelt werden (vgl. 5.27), die nachfolgend in Abbildung 5.12 formuliert ist.

$$|F_G| = |c_2(x_1 - x_2)| \tag{5.27}$$

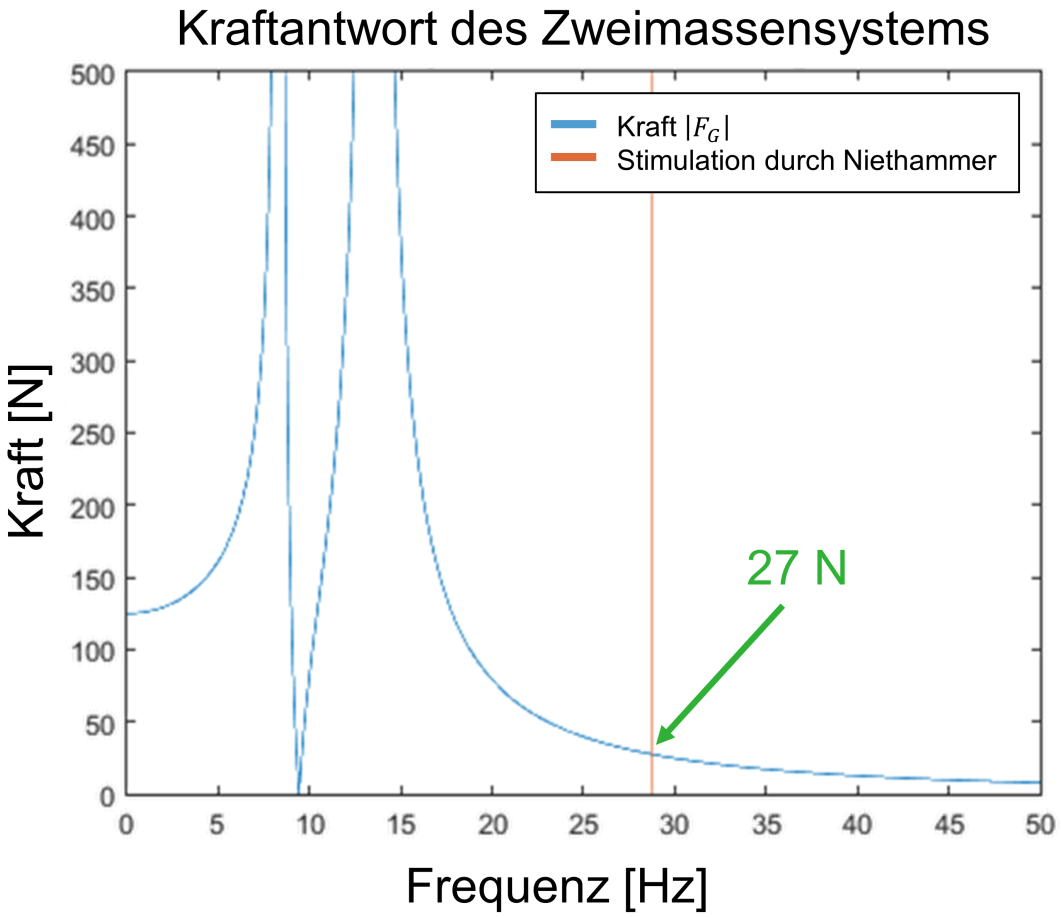


Abbildung 5.12: Zusammenhang zwischen der aufgebrachten Kraft durch den Niethammer und der Übertragungskraft auf den Roboterflansch

Bei einer Anregung des Zweimassensystems durch den Niethammer mit einer Frequenz von $29\,Hz$ lässt sich F_G zu $27\,N$ herabsenken, was wiederum einer Minimierung der Kraft von 78 % entspricht.

Die zuvor aufgezeigten und ermittelten Werte für die Auslegung des Prozesswerkzeugs wurden in ein reales Prototypenwerkzeug implementiert, um die Ergebnisse in der Praxis zu validieren. Zur Überprüfung der Schwingungsisolation durch das Prozesswerkzeug

werden die Kräfte gemessen, die während des Nietvorgangs auf den Roboterflansch wirken. Um eine Aussage darüber treffen zu können, wie stark das Federsystem die Kräfte und Schwingungen reduziert, wurde eine Referenzmessung durchgeführt.

Der Mittelwert der Kräfte für einen Nietvorgang ohne Feder beträgt $\hat{F} = 125\,N$. Zusätzlich treten Spitzenkräfte von bis zu ca. $195\,N$ auf, die bei dauerhafter Beanspruchung den Roboter beschädigen würden. Mit dem entwickelten Nietwerkzeug und den angepassten Parametern zur Minimierung von Kräften und Schwingungen werden schließlich gemittelte Kräfte von ca. $65\,N$ gemessen. Im praktischen Vergleich können so die Kräfte um ca. 50 % minimiert werden. Dadurch können einerseits der Nietprozess erfolgreich durchgeführt, anderseits können auch Schäden am Robotermanipulator, insbesondere an den Getrieben während des Produktionsprozesses aufgrund der hohen Kraftimpulse, vermieden werden.

5.4 KI-basierte Echtzeit-Qualitätsprüfung

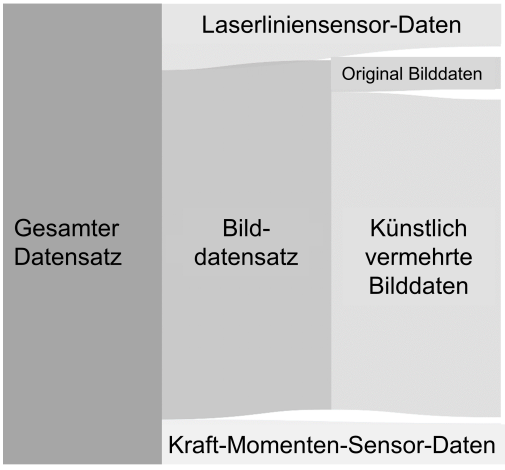
Neben komplexen Fügeverfahren in der Flugzeugsektionsmontage ist die Sicherstellung der Prozessqualität eine wichtige und zugleich arbeitsintensive und zeitaufwändige Aufgabe, zumal eine große Anzahl von Nieten für die Herstellung von Flugzeugen verwendet wird. Zudem werden die Niete häufig in schwer zugänglichen Bereichen eingesetzt, was zu schlechten ergonomischen Arbeitsbedingungen für die Werker bei der Montage, aber auch bei der abschließenden Inspektion führt. Dies macht die Inspektion zu einer anstrengenden Aufgabe, die in Kombination mit Monotonie zu Fehlern, also zur falschen Interpretation der Nietqualität führen kann. Grundsätzlich gilt, dass sicherheitskritische Nietverbindungen überprüft werden. Dies gilt jedoch nicht für alle gefügten Nietverbindungen. Die entwickelte Lösung zielt darauf ab, die Qualitätsprüfung durch einen intelligenten automatisierten Prozess durchzuführen, der die Qualität durch eine Klassifikation basierend auf Bilddaten und physikalischen Parametern wie Höhe, Durchmesser sowie Prozesskräften, die während des Nietens auftreten, bestimmt. Die daraus resultierenden Qualitätsinformationen werden im Rahmen der MTI über eine Mixed-Reality-Brille (Microsoft HoloLens) an den Werker übermittelt. Dies ermöglicht eine direkte Handhabung und Durchführung der Wartungsarbeiten.[5]

[5] Dieses Kapitel wurde als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, Masiak, T., Duppe, B., Schulz, A: Intelligent Real Time Inspection of Rivet Quality supported by Human-Robot-Collaboration, SAE Technical Paper, DOI: https://doi.org/10.4271/2019-01-1886, 2019.

Einrichten und Datenerfassung

Wie zuvor erläutert, ist der Roboter mit einem Laserliniensensor, einem Kraft-Momenten-Sensor sowie einer Industriefarbkamera ausgestattet. Jeder der Sensoren ist für einen Datensatz von Parametern verantwortlich, die für die Qualitätsprüfung der Niete verwendet werden. Während der Kraft-Momenten-Sensor der Erfassung von Kräften und Drehmomenten auf das am Roboter montierte Nietwerkzeug bzw. dem Amboss dient, erfasst der Laserliniensensor die Abmessungen sowie die Form des gestauchten Nietschaftes nach dem Nietvorgang. Zusammen mit den Bildern der Kamera ergibt dies eine Vielzahl von Daten für jeden Nietpunkt, die eine robuste Aussage über die Qualität der Nietverbindung ermöglichen.

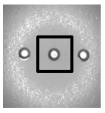
Wie in Abbildung 5.13 dargestellt, wurden insgesamt 2350 echte Datenpunkte erfasst, wobei jeder Datenpunkt einem einzelnen Nietprozess entspricht.



Laserliniensensor-Rohdaten:

	Höhe [µm]	Durchmesser x [µm]	Durchmesser y [µm]
1	-1904	6923	6668
2	-2231	6642	6478
3	-2066	6742	6627
n	…	…	…

Kamera-Rohdaten:



Kraft-Momenten-Sensor-Rohdaten:

	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Tx [Nm]	Ty [Nm]	Tz [Nm]
1	24.36	123.98	-16.12	-1.22	2.61	-1.71
2	20.09	122.01	-18.19	-1.22	2.46	-1.66
3	19.87	118.45	-15.58	-1.17	2.35	-1.63
n	…	…	…	…	…	…

Abbildung 5.13: Sensordaten, die für das Training des Modells verwendet werden. In Anlehnung an [152]

Für jeden Niet werden die Höhe und der Durchmesser des gestauchten Nietschaftes mittels des Laserliniensensors sowie ein Bild mit der Kamera aufgezeichnet, das den Fertigungskopf des Niets fokussiert. Während des MRK-Nietvorgangs wird zudem die auf den Amboss ausgeübte Kraft aufgezeichnet. Die Anwendung eines Supervised-Learning-Algorithmus erfordert ein manuelles Labeling der Daten sowie eine Klassifikation der Nietverbindungen in gut und schlecht. Dies erfolgt durch einen Experten. Aufgrund

der begrenzten Datenverfügbarkeit wurden künstliche Datenvermehrungstechniken wie Rotation und Spiegelung auf die Bilddaten angewendet, wobei diese unabhängig von den eigentlichen Datenpunkten gehalten wurden. Jeder Datenpunkt wird, wie in Abbildung 5.14 dargestellt, als *gute* oder *schlechte* Nietverbindung entsprechend der Airbus-Spezifikation [120] kategorisiert.

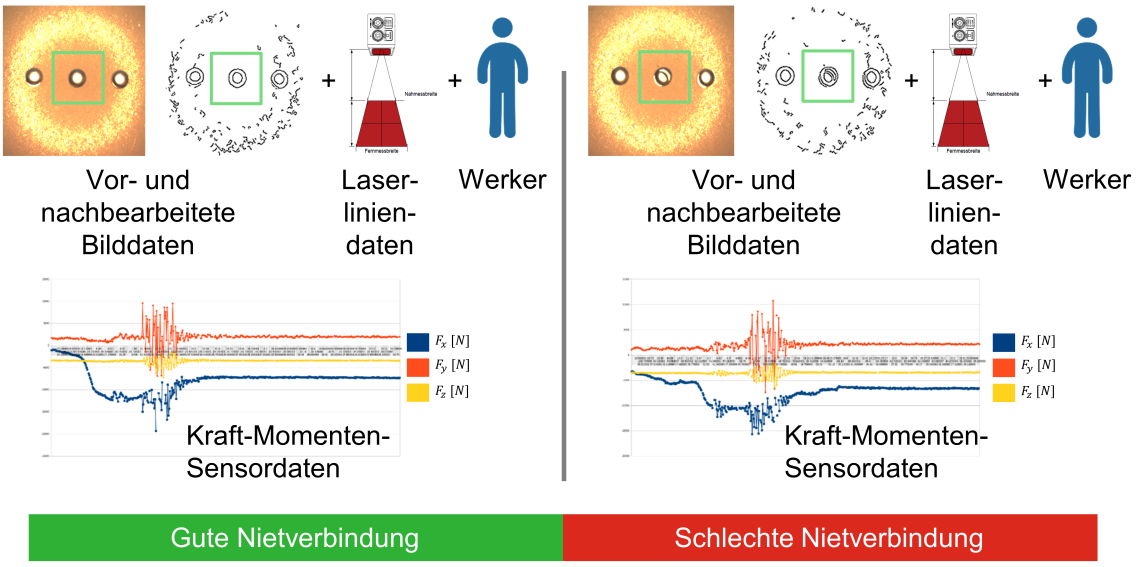


ABBILDUNG 5.14: Bilder, Laserliniensensor- und Kraft-Moment-Sensordaten werden entsprechend den Spezifikationen als gute (links) oder schlechte (rechts) Nietverbindung kategorisiert.

Das Ergebnis der Gleichung 2.20 definiert die Dimensionen für die Klassifikation des Niets als gute oder schlechte Nietverbindung. Neben den physikalischen Abmessungen wird der gefertigte Kopf mittels eines Kamerasystems zur Erkennung von fehlerhaften Nieten visuell geprüft. Im gefertigten Kopf können Fehler aufgrund einer zu kleinen Nietmatrize konzentrische Ringe im Nietkopf entstehen lassen. Bauteilbeschädigungen können im umliegenden Material durch einen schief positionierten Niethammer oder zu große Nietwerkzeuge auftreten. Weitere Fehler können spiral- oder längsförmige Spalten und Risse sowie versetzte oder gestufte Stauchköpfe sein. Wenn die gefügten Niete nicht den Toleranzanforderungen entsprechen, müssen Reparatur- oder Austauschverfahren angewendet werden.

Qualitätskontrolle mittels künstlicher Intelligenz

Die Qualitätsprüfung der Niete gliedert sich in zwei Teile - die Online-Qualitätsprüfung der Niete, basierend auf den Kraft-Momenten-Sensordaten in Echtzeit, und die Offline-Nietprüfung, basierend auf Bildern der Niete. Während der Online-Inspektion wird dem Bediener am Ende des Nietvorgangs bspw. mittels der Mixed-Reality-Brille HoloLens das

Ergebnis der Qualitätsanalyse angezeigt. Im Gegensatz dazu stellt die Offline-Inspektion ein Werkzeug zur Verfügung, um die Endkontrolle der Niete durch Aufnahme von Bildern zu automatisieren. Die Anwendung fortschrittlicher maschineller Lernmethoden von Sensordaten im Nietprozess basierend auf einem Beschleunigungssensor wurde in [154] untersucht. In dieser Arbeit wird hingegen die Nietqualität mithilfe von Kraft-Momenten-Sensor- und Bilddaten sowie der Implementierung einer hybriden Qualitätskontrolle aufgezeigt.

Datenaufbereitung der Kraft-Momenten-Sensordaten Für jeden Nietvorgang bestehen die Rohdaten des Kraft-Momenten-Sensors aus ca. 500 Zeitschritten. Kraft und Drehmoment werden jeweils in 3 Dimensionen aufgezeichnet, was insgesamt 500 Zeitschritte mal 6 Dimensionen ergibt (3000 Datenpunkte für jeden Niet). Abbildung 5.15 zeigt die Rohdaten des Sensors aus dem Nietvorgang von zwei Nietprozessen. Um ein maschinelles Lernmodell zur Klassifikation der Qualität von Nieten zu trainieren, müssen zunächst die Daten homogenisiert werden. Die Vergleichbarkeit der Rohdaten des Sensors ist aus drei Hauptgründen eingeschränkt:

1. Der Nietprozess beginnt nicht genau zur gleichen Zeit.
2. Die Sensorsignale schwingen. Das bedeutet, dass zwei ähnliche Nietvorgänge sehr unterschiedliche Werte haben können.
3. Die Größe der Kräfte des Nietvorgangs kann von Werker zu Werker variieren.

Die Ausrichtung auf der Zeitachse (1) wird durch Glättung der Signale und den anschließenden Abgleich der höchsten Werte erreicht. Insbesondere werden die Daten durch den gleitenden Mittelwert (n=50) geglättet. Die Maxima der x-Richtung der Kraftmessungen der einzelnen Nietvorgänge werden als Ausrichtungspunkt gewählt, wie in Abbildung 5.16 dargestellt. Die standardisierten Sensordaten werden entsprechend diesen Punkten ausgerichtet.

Die oszillierenden Schwingungen (2) werden durch die Verwendung verschiedener Darstellungen der zugrunde liegenden Zeitreihen behandelt. Die erste Darstellung wendet den gleitenden Durchschnitt (MAv) (*Moving Average* = MAv) an und verwendet nur jeden 5. Zeitschritt, die zweite Darstellung nimmt die maximale Aggregation (MAgg) (*Maximum Aggregation* = MAgg) über Intervalle von 10 Zeitschritten. Die dritte Darstellung zeigt wahrnehmungsbedingte wichtige Punkte (PIP) (*Perceptually Important Points* = PIP). Diese Methode bestimmt die Punkte, die für das Muster einer Zeitreihe perzeptiv wichtig sind. [155] Die vorverarbeiteten Sensordaten sind in Abbildung 5.17 dargestellt. Die Vorverarbeitung reduziert die Kraft-Momenten-Sensordaten von ca. 500

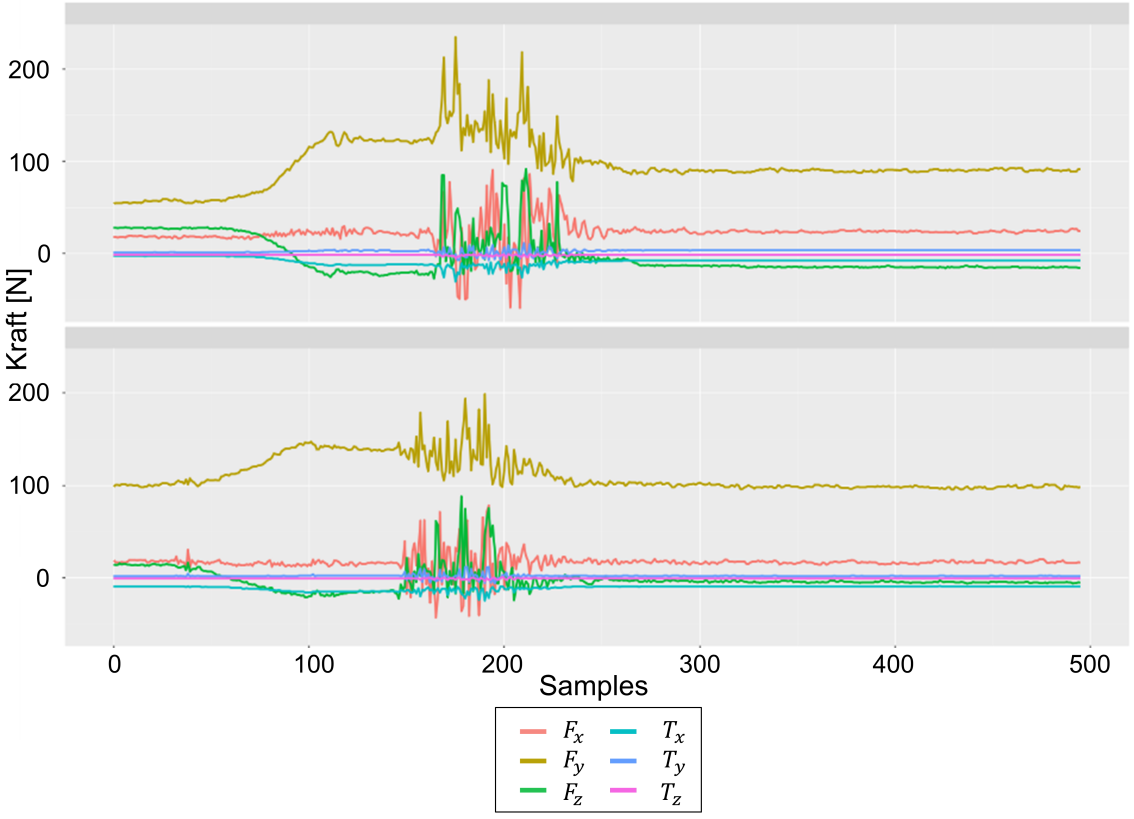


ABBILDUNG 5.15: Rohdaten des Kraft-Momenten-Sensors von zwei guten Nietverbindungen (Niet 9 und 186). Kraft Fx, Fy und Fz in N; Drehmoment Tx, Ty und Tz in Nm [152]

Zeitschritten mal 6 Dimensionen für jeden Niet auf 67 (MAv), 39 (MAgg) und 42 (PIP) Zeitschritte mal 6 Dimensionen.

Um Probleme (3) bezüglich der Vergleichbarkeit der Sensoren zu lösen, werden die Signale standardisiert und der Absolutwert wird verwendet, d. h. $x_{new} = |\frac{x-\mu}{sd}|$, wobei μ den Mittelwert und *sd* die Standardabweichung über alle Signale bezeichnet.

Machine Learning für die Qualitätskontrolle unter Verwendung der Kraft-Momenten-Sensordaten Für die Nietqualitätsprüfung wurden zwei Algorithmen gewählt, um binäre Klassifikatoren zu trainieren. Deep-Learning-Algorithmen und Neuronale Netze mit mehreren Schichten eignen sich gut, da sie bei komplexen Problemen gute Ergebnisse liefern. Darüber hinaus gehören Gradientenverstärkungsverfahren, insbesondere XGBoost, zu den leistungsfähigsten Modellen, weshalb beide Modelle zur Klassifikation der Nietqualität anhand der vorverarbeiteten Kraft-Momenten-Sensordaten getestet wurden. [156]

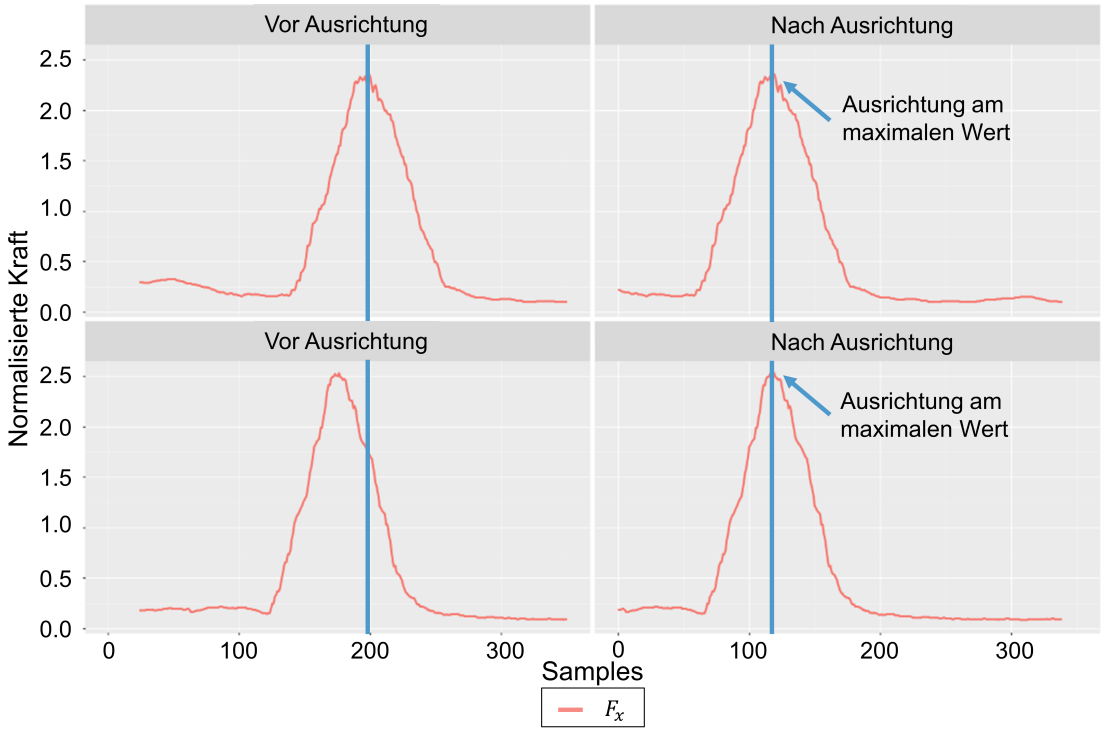


Abbildung 5.16: Ausrichtung der Sensordaten. Geglättete Kraft Fx vor (links) und geglättete Kraft Fx nach der Ausrichtung (rechts) in Anlehnung an [152].

Nietqualitätsklassifikation mittels eines Convolutional-Neural-Networks von Bilddaten Um vergleichbare Daten zu erhalten, wurden die Bilder zentriert und auf eine Größe von 96 x 96 Pixel zugeschnitten. Bei der Vorbehandlung ist somit nur der zu klassifizierende Niet auf dem Bild sichtbar. Störfaktoren wurden somit ausgeblendet. Um die Nietqualität anhand von Bildern zu klassifizieren, wird ein Convolutional Neural Network verwendet. CNNs sind im Bereich der Bildklassifikation weit verbreitet, insbesondere für große Datensätze wie ImageNet. [157] [158] Im vorliegenden Ansatz stehen für das Training des Vorhersagemodells 1175 Bilder zur Verfügung. Aufgrund einer geringen Anzahl an Bilddaten wird die künstliche Vermehrung mittels Spiegeln oder Drehen verwendet, um den Datensatz für den Trainingsprozess zu erweitern. Es wurden verschiedene CNN-Architekturen getestet, die nahezu die gleichen Ergebnisse erzielten. An dieser Stelle wird nur die Architektur mit den robustesten Ergebnissen als Beispiel vorgestellt. Das CNN besteht aus vier 2D-Convolutional-Blöcken und einer vollständig verbundenen Schicht: Die Schicht besteht aus 32 Filtern, die den 96-x-96-Eingang mit RGB-Kanälen nutzen, und ist mit einer zweiten 32-Filterschicht verbunden, gefolgt von einer Max-Pooling-Schicht. Danach werden drei Blöcke von drei Schichten mit einer Max-Pooling-Schicht dazwischen verwendet, wobei jede Schicht in einem Block doppelt so viele Filter aufweist wie die Schichten im vorherigen Block (also 32 - 64 - 128). Alle

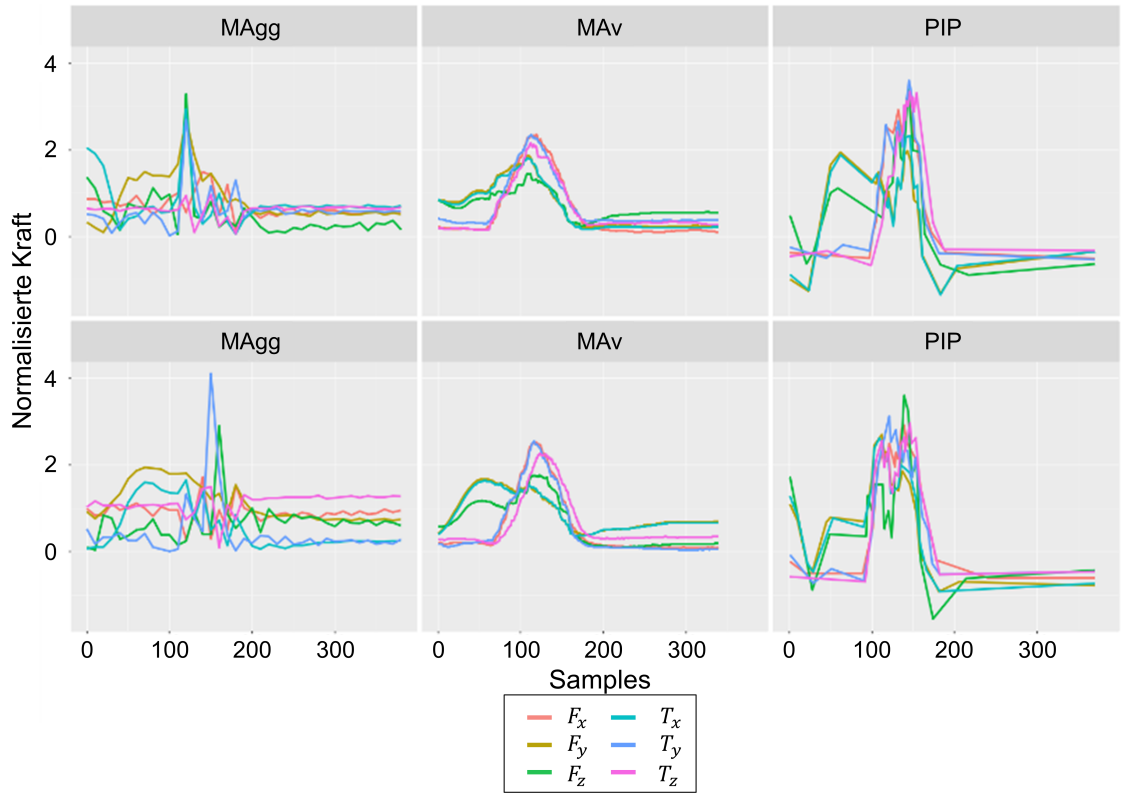


Abbildung 5.17: Die drei verschiedenen Arten der vorverarbeiteten Daten. Die Kraft Fx, Fy, Fz und die Drehmomente Tx, Ty, Tz sind standardisiert. [152]

Max-Pooling-Schichten haben eine Pooling-Größe von 2 x 2. Der vollständig verbundene Layer hat 256 Neuronen und ist mit einem Neuron verbunden, das eine Sigmoid-Aktivierungsfunktion verwendet, um die binäre Klassifikation vorzunehmen. Abbildung 5.18 zeigt eine Skizze dieser Architektur. Um eine Überanpassung zu vermeiden, wird eine Ausfallschicht mit einer Ausfallrate von 25 % verwendet.

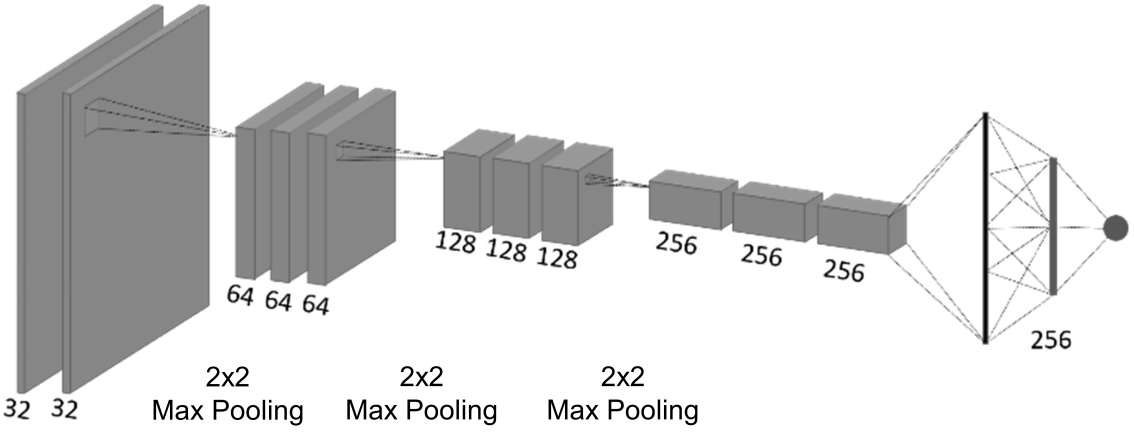


Abbildung 5.18: Architektur des Convolutional-Neural-Network-Klassifikators [152]

5.5 Mensch-Technik-Interaktion in den Phasen Konzeption, Planung, Konfiguration und Betrieb

Entsprechend Kapitel 2.4 wurde basierend auf Onnasch [48] und Scholtz [59] ein Mensch-Technik-Interaktions-Canvas vorgestellt, das am vorliegenden Szenario aus der Flugzeugproduktion durchlaufen werden soll.[6]

Konzeption Mensch-Technik-Interaktion

Die zuvor aufgestellten Leitfragen sollen mithilfe des Canvas in Abbildung 5.19 beantwortet werden. Nachfolgend wird auf die einzelnen Komponenten *Interaktionsklassifikation*, *Roboterklassifikation* und *Teamklassifikation* im ausgewählten Szenario eingegangen.

<table>
<tr><td>Interaktions-klassifikation</td><td colspan="2">(Teil-) automatisierte Konzeptbeschreibung des gesamten Systems
• Druckkalotte und Sektionstonne 19
• Teilautomatisierter Nietprozess zwischen Mensch und Roboter
• Niethammer, Amboss, Roboter, Smart Devices</td><td>Interaktionsform zwischen Mensch und Roboter
• Kollaboration</td><td>Interaktionsrolle des Menschen
• Kollaborateur
• Operateur
• Nicht-Beteiligter</td></tr>
<tr><td>Roboter-klassifikation</td><td>Aufgabe des Roboters
• Informations-austausch
• Präzision
• Entlastung
• Manipulation</td><td>Einsatzgebiet des Roboters
• Industrie</td><td>Morphologie des Roboters
• Funktional</td><td>Autonomiegrad des Roboters (gering – hoch)
• Infoaufnahme
• Infoverarbeitung
• Entscheidungs-findung
• Handlungsaus-führung</td></tr>
<tr><td>Teamklassifikation</td><td>Kommunikationskanal
• Mensch zu Roboter
  • Elektronisch
  • Mechanisch
  • Optisch
• Roboter zu Mensch
  • Mechanisch
  • Visuell</td><td>Räumliche Nähe
• Berührend
• Fernsteuernd</td><td>Zeitliche Nähe
• Synchron
• Asynchron</td><td>Teamzusammen-setzung/ Verhältnis Mensch zu Roboter
• $N_M = N_R$</td></tr>
</table>

Abbildung 5.19: Anwendung der Mensch-Technik-Interaktion bzw. Mensch-Roboter-Interaktion-Taxonomie auf den Niet- und Prüfprozess in der Flugzeugproduktion entsprechend Abbildung 2.13.

[6] Abschnitte dieses Kapitels wurden als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Kanso, A. and Masiak, T.: Collaboration in a Hybrid Team of Human and Robot for Improving Working Conditions in an Aircraft Riveting Process, SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2019-01-137, 2019. Müller, R., Vette, M., Geenen, A., Kanso, A., Masiak, T.: Development of a Human-Robot-Collaboration System using the Example of a Riveting Process in Aircraft Assembly, Journal of Robotics and Automation, URL: https://scholarlypages.org/Articles/robotics/jra-2-009.pdf, 2018.

Interaktionsklassifikation: Aufgrund der gemeinsamen Nietprozessdurchführung im hybriden Team bestehend aus Mensch und Roboter wird die Interaktionsform als Kollaboration eingestuft. Der Mensch übernimmt verschiedene Interaktionsrollen. Während der Prozessausführung tritt er in die Rolle des Kollaborateurs, um gemeinsam mit dem Roboter den Nietprozess auszuführen. Wird die gesamte Station konfiguriert bzw. der Roboter angesteuert, tritt der Mensch als Operateur auf. Werker, denen andere Aufgaben zugeteilt wurden, sind der Rolle des *Nicht-Beteiligten* zugeordnet. In diesem Fall besteht keine direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter. Dennoch benötigt der Mensch ein Verständnis, welche Aufgabe vom Roboter bearbeitet wird bzw. in welchem Status sich das System befindet.

Roboterklassifikation: Im industriellen Einsatz übernimmt der Roboter zusammen mit dem übergeordneten Steuerungssystem eine Vielzahl von Aufgaben während der gesamten Prozessausführung. Der Roboter startet die Zusammenarbeit mit der Referenzierung am Bauteil sowie dem Scan des Ringspantes zur Ermittlung der Position und Orientierung der Nietlöcher. Anschließend wird der Amboss **manipuliert** und **präzise** im Arbeitsraum für den Nietprozess positioniert. Durch das Zusammenspiel von Mensch und Roboter im Nietprozess werden die Menschen **entlastet**, damit diese keine monotonen Überkopfarbeiten durchführen müssen und nicht der Lärmbelastung durch den Niethammer ausgesetzt werden. Während der gesamten Prozessdauer werden mithilfe von Visualisierungen und des Einsatzes von Smart Devices **Informationen** zwischen Mensch und Roboter ausgetauscht. Hinsichtlich der Morphologie des Roboters kommt ein **funktionales**, am Markt käufliches, MRK-fähiges Robotersystem zum Einsatz. Der **Autonomiegrad** des Roboters kann in der gesamten Anwendung zwischen mittel und hoch eingestuft werden. Der Mensch hat zu jeder Zeit die volle Kontrolle über das System und übernimmt den aktiven Part im Team - dennoch werden bspw. Teilentscheidungen wie die Merkmalserkennung der Nietlöcher oder die KI-basierte Qualitätskontrolle, in einem hohen Autonomiegrad ausgeführt.

Teamklassifikation: Die hybride **Teamzusammensetzung** hat im kollaborativen Nietprozess das Verhältnis 1:1. Während der Prozessausführung stehen Mensch und Roboter über den Niet **berührend** in Kontakt, auch wenn beide räumlich durch die Druckkalotte getrennt sind. Der Mensch übernimmt den aktiven Part und führt vorbereitende Aufgaben wie das Bohren, Senken und Auftragen von Dichtmittel durch. Im eigentlich betrachteten Nietprozess arbeitet ein Mensch mit einem Roboter **synchronisiert** und kollaborativ zusammen. Führt der Roboter ebenfalls separate Aufgaben wie bspw. einen Scan zur Merkmalsidentifikation oder zur Qualitätskontrolle durch, arbeiten Mensch und Roboter asynchron.

Zur Kommunikation zwischen Mensch und Roboter kommt eine Vielzahl an smarten Geräten zum Einsatz. Zur **Informationseingabe** kann der Mensch die graphische Oberfläche einer Smartwatch, einer browserbasierten Oberfläche, native Computeranwendungen oder Gesten über eine Mixed-Reality-Brille verwenden. Nebst der smarten Geräte kann der am Roboterflansch montierte Kraft-Momenten-Sensor den Krafteinfluss während des Nietprozesses auslesen, analysieren und so dem Roboter einen höheren Autonomiegrad verleihen. Als **Informationsausgabe** sind verschiedene Kommunikationskanäle zum Menschen denkbar. Neben einer Visualisierung der Roboterkinematik mittels der Mixed-Reality-Technologie können Spots, z. B. einzelne Nietlöcher, über einen Videoprojektor angezeigt werden. Außerdem können native und browser-basierte Anwendungen die aktuelle Pose des Roboters visualisieren. Weiterhin kann der Werker über den Prozessfortschritt oder etwaige Statusmeldungen auf der Smartwatch mittels Vibrationen und Visualisierungen auf dem Laufenden gehalten werden.

Planung und Konfiguration

Die zuvor in Abbildung 4.1 vorgestellte Bedienmethode dient der schnellen und intuitiven Konfiguration des gesamten Systems. In einer effizienten Applikation soll der Werker nicht programmieren müssen, sondern bei Bedarf lediglich eine Rekonfiguration der Station durchführen.

Die Programmierung und Integration von MRK-fähigen Robotersystemen in Verbindung mit zusätzlicher Peripherie ist komplex. Um diese Robotersysteme in ein Mensch-Roboter-Kollaborationskonzept zu integrieren, werden sie oft mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet. Aufgrund komplexer Anwendungsszenarien werden die Robotersysteme in der Regel in speziellen Programmiersprachen implementiert. Dies reduziert die Benutzerfreundlichkeit in der Produktion für den Werker. Ziel ist es daher, einerseits eine intuitive Bedienmethode zu integrieren, die es dem Bediener ermöglicht, den Roboter neu zu konfigurieren oder bei Bedarf den Nietvorgang anzupassen, sowie andererseits entsprechend den Interaktionsmöglichkeiten einzubinden - ganz ohne Programmierkenntnisse. [127]

Wie in Abbildung 5.20 und 5.21 dargestellt, kann die Planung des Nietprozesses in vier Schritte gegliedert werden: Initialisierung, Prozessdefinition, Logik und Prozessausführung. In jedem Schritt wird der Bediener durch verschiedene Mensch-Technik-Interaktionen-Schnittstellen unterstützt.

Die Initialisierung, vgl. Abbildung 5.20 Abschnitt 1, umfasst die Definition der Ein- und Ausgabegeräte der verwendeten Module, z. B. das Robotersystem oder Smart Devices, sowie deren Kommunikationskanäle, die auf das MQTT-Protokoll aufsetzen. Falls

vorhanden, können die Module aus einer Datenbank, ähnlich einem AppStore, geladen werden. Andernfalls müssen die Geräteeigenschaften manuell definiert und initialisiert werden. Im zweiten Schritt (vgl. Abbildung 5.20 Abschnitt 2), der Konfiguration oder Prozessdefinition, wird eine aufgabenorientierte Beschreibung des Montagevorgangs erzeugt. Es werden prozessspezifische Parameter geladen, z. B. definierte An- und Abrückbewegungen oder Wartepositionen während des Nietungsprozesses. Darüber hinaus sind weitere Unterprogramme zur Referenzierung oder Analyse von Prozessdaten integriert. Im dritten Abschnitt (vgl. Abbildung 5.21 Abschnitt 3), dem Logikbereich, müssen Prozesse und Bedingungen der Module konfiguriert werden. Module werden verwendet, um eine aktive Programmierung zu vermeiden und die Konfigurationszeit zu verkürzen. Die integrierten Module sind mittels MQTT-basierten Kommunikationskanälen verbunden, damit der Werker mittels smarten Devices mit dem Robotersystem interagieren kann. Während der Prozessausführung (vgl. Abbildung 5.21 Abschnitt 4) kann die reale Station angesteuert werden. Bei der Durchführung des eigentlichen Prozesses hat der Werker mithilfe smarter Geräte jederzeit die volle Kontrolle über die Station. Bei Bedarf können Prozessdaten während der Laufzeit zur späteren Analyse protokolliert werden.

Betrieb

Während der Prozessausführung steht der Mensch im Mittelpunkt, der die kollaborative Nietaufgabe im Team mit dem Roboter durchführt. Die Aufgaben von Mensch und Roboter werden entsprechend ihrer Fähigkeiten zugeordnet. Intuitive Bedien- und Interaktionsmethoden sind notwendig, um die Akzeptanz der Mitarbeiter zu erhöhen. Im Kontext der MTI ist die Gestaltung des Mensch-Technik-Dialogs ein zentraler Bereich.[54] Es wird zwischen indikativer, sensorischer und physischer Hilfe unterschieden, bei der entweder der Mensch die Maschine unterstützt oder umgekehrt. Die in Abbildung 5.22 und 5.23 dargestellten Module wurden implementiert, um eine Kommunikation und Interaktion innerhalb des hybriden Teams zu ermöglichen und dem Werker zu jeder Zeit die volle Kontrolle über das System zu ermöglichen.

Der Werker kann z. B. eine Smartwatch tragen, um den Roboter oder die Hubvorrichtung zu steuern. Ein farbiger Bildschirmhintergrund der Smartwatch gibt sofortiges visuelles Feedback, sollte sich der Modus des Robotersystems vom Konfigurationsmodus in einen Not-Halt oder den Bewegungsmodus ändern (siehe Abbildung 5.22 links).

Da Werker und Roboter während des Nietvorgangs aufgrund der Druckkalotte keinen Sichtkontakt haben, bietet die Mixed-Reality-Technologie dem Werker eine Art

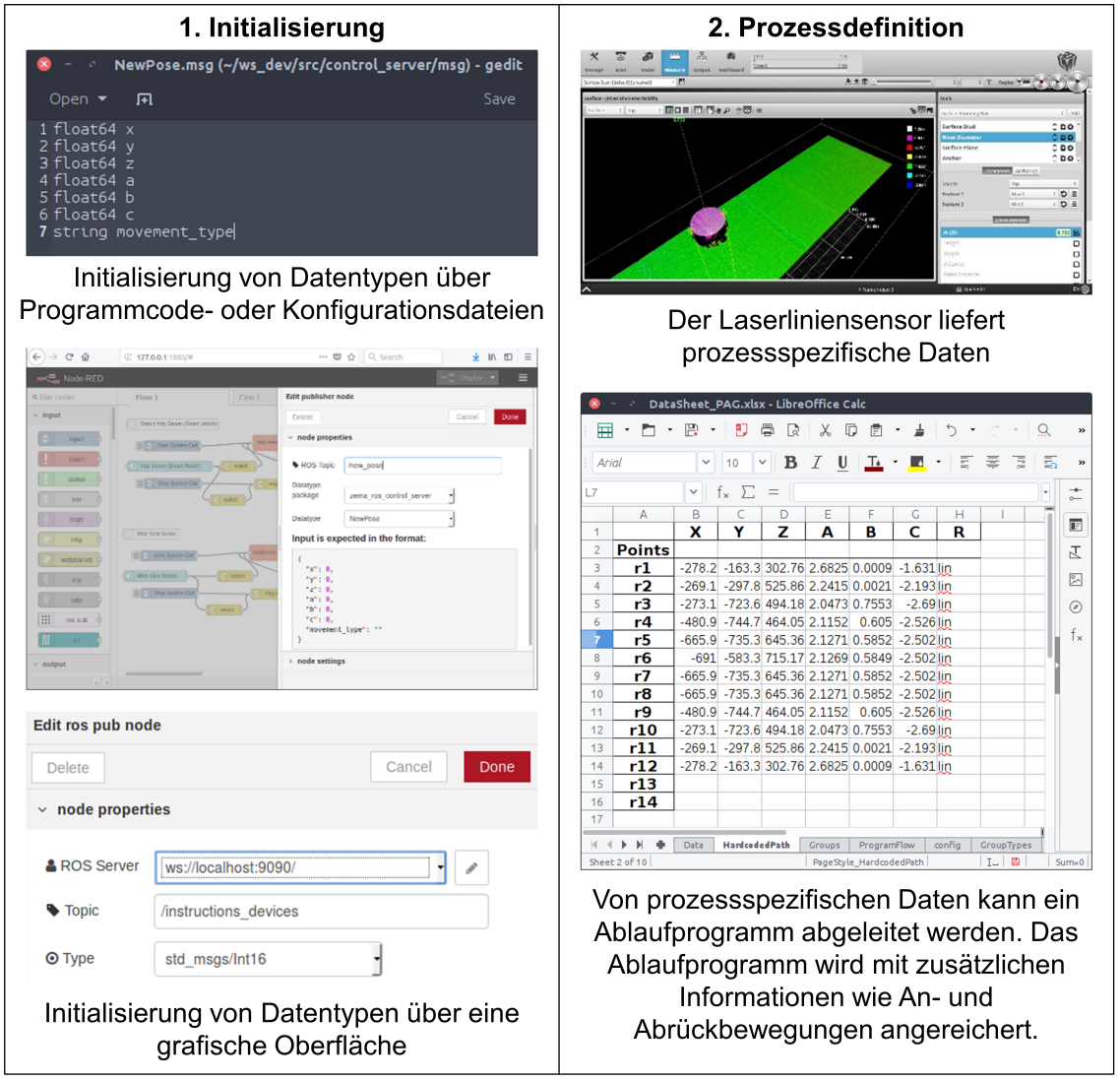


Abbildung 5.20: Verfahren zur Planung und Programmierung eines Montagesystems in Anlehnung an [35] (Abschnitt 1-2 von 4)

Röntgenansicht durch das Bauteil. Die Posedaten des Roboters sowie die Daten der Hubeinheit werden ausgelesen, vom Steuerungskern verarbeitet und an die entsprechenden Client-Anwendungen gestreamt. Dadurch erhält der Werker die Möglichkeit, die Position des Roboters während des Prozesses *live* zu sehen (siehe Abbildung 5.22 rechts). Virtuelle Tasten (ähnlich den Tasten zur Interaktion auf der Smartwatch) können mittels der Microsoft HoloLens zur Steuerung der gesamten Station verwendet werden.

Neben der Mixed-Reality-Visualisierung werden auch Videoprojektoren oder browserbasierte Web-Apps auf mobilen Plattformen wie Tablets, Smartphones oder Computer, zur Interaktion im Rahmen der Werkerassistenz eingesetzt. Die aktuelle Pose, einschließlich zusätzlicher Informationen, kann in einer Browseransicht angezeigt werden, wie in Abbildung 5.23 mittig zu sehen ist.

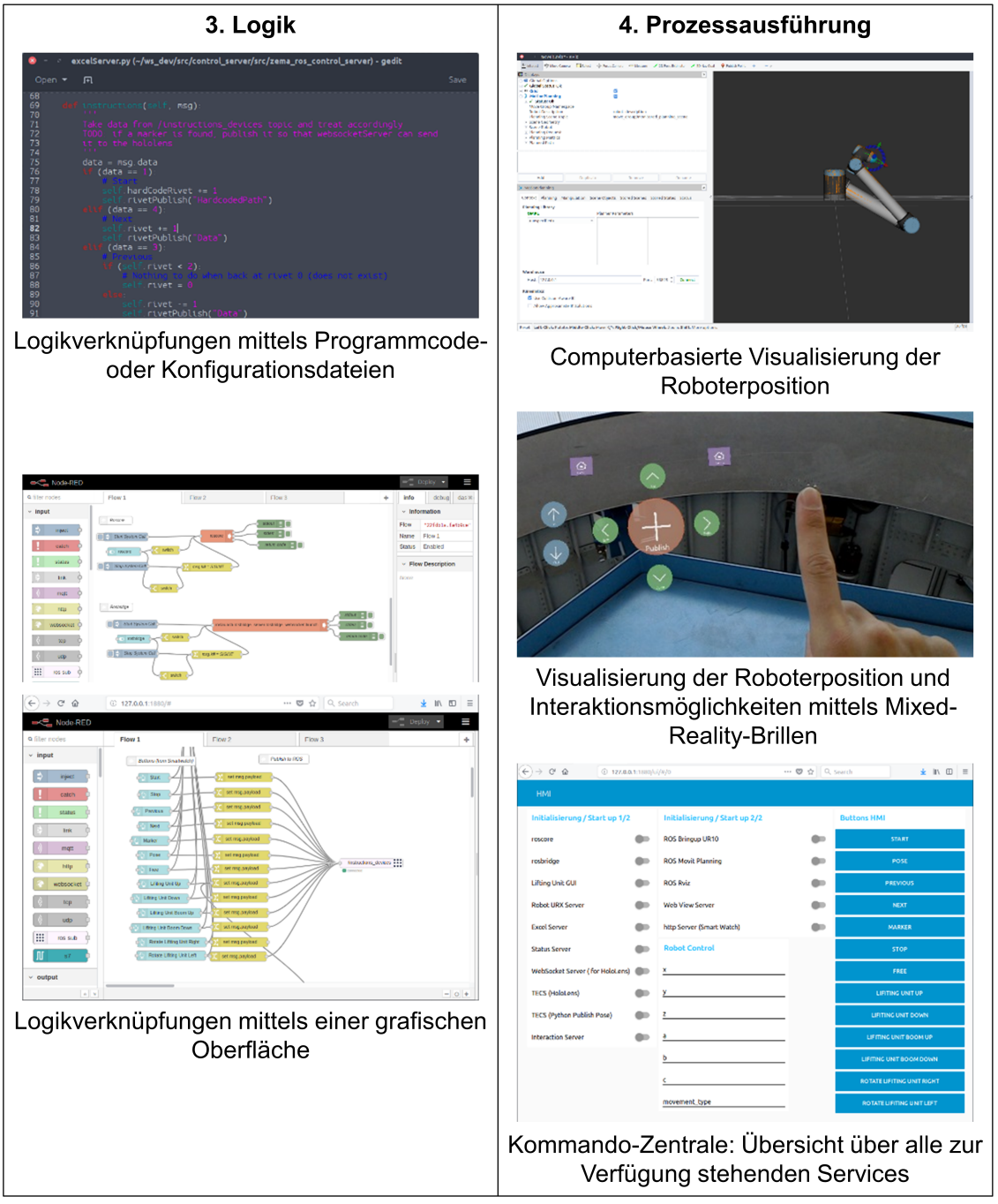


Abbildung 5.21: Verfahren zur Planung und Programmierung eines Montagesystems in Anlehnung an [35] (Abschnitt 3-4 von 4)

Schließlich wurde zur Steuerung der gesamten Station eine graphische Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 5.23 rechts) implementiert, mit der alle Module gestartet und gestoppt werden können. Darüber hinaus kann das Gesamtsteuerungskonzept Daten vom Roboter oder von Sensoren protokollieren, die während oder nach der Prozessausführung mittels künstlicher Intelligenz analysiert werden können.



Abbildung 5.22: Mobile Schnittstellen für die Mensch-Technik-Interaktion mit dem Steuerungssystem, den Betriebsmitteln einschließlich Visualisierungen im Rahmen der Werkerassistenz. Smartwatch (links) und Mixed Reality (rechts) in Anlehnung an [127] [10].

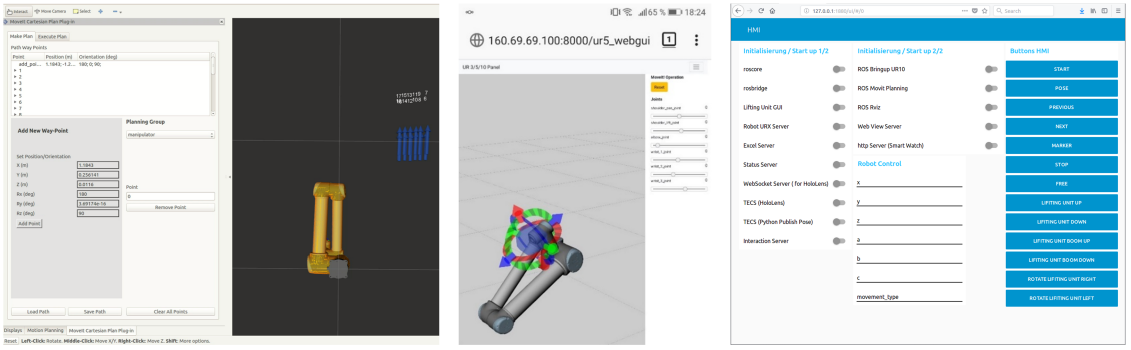


Abbildung 5.23: Computer und mobile Schnittstellen für die Mensch-Technik-Interaktion mit dem Steuerungssystem, den Betriebsmitteln einschließlich Visualisierungen im Rahmen der Werkerassistenz. MTI-Schnittstelle zur Robotervisualisierung und Anpassung der Wegpunkte (links), browser-basierte Robotervisualisierung (Mitte) und Steuerungszentrale zum Starten und Stoppen einzelner Softwarekomponenten (rechts) in Anlehnung an [127] [10].

5.6 Konzept zur Steigerung der Datenintegrität mittels DLT

Angelehnt an die Vision, vernetzte Dienste und Maschinen mittels kabelgebundener oder funkbasierter Technologien mit einem sicheren Kommunikationsprotokoll zu einer smarten Fabrik zusammenzuführen, ähnlich der Darstellung in Abbildung 5.24, wurden im Rahmen dieser Arbeit grundlegende Konzepte entwickelt und anhand des vorliegenden

Szenarios implementiert. Das Vorgehensmodell zur Integration von Sensoren und Algorithmen in Kapitel 4.2 wurde basierend auf den Erkenntnissen der Distributed-Ledger-Technologie in Kapitel 4.3 erweitert.

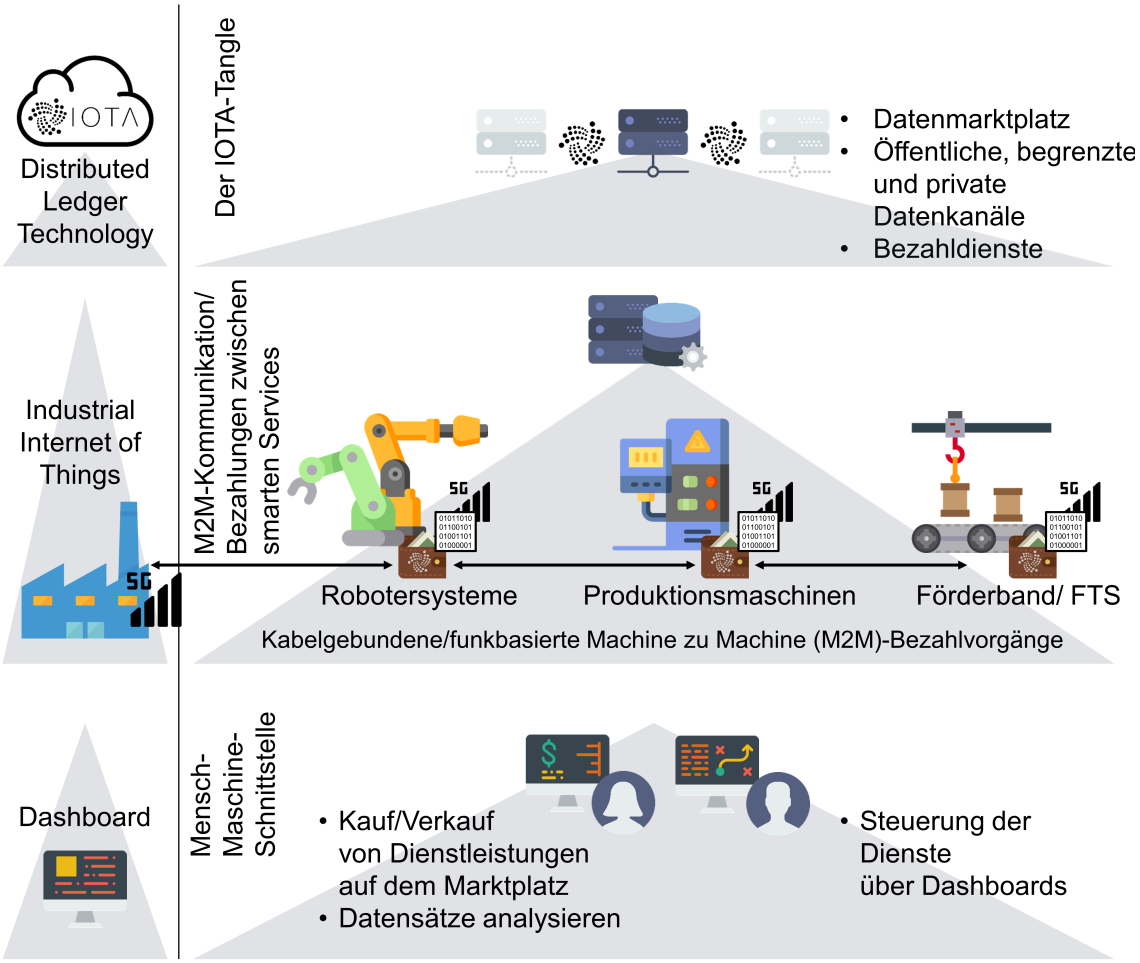


Abbildung 5.24: Vision von vernetzten Diensten und Maschinen mittels kabelgebundener oder funkbasierter Technologien und eines sicheren Kommunikationsprotokolls - hier am Beispiel der 5G-Funktechnologie und dem IOTA-Projekt.

In einer Smart Factory sind alle Produktionsteilnehmer über Ethernet, WLAN, 5G und zum Beispiel die DLT- oder DAG-Technologie miteinander verbunden. In diesem Szenario sind dies zum Beispiel: Kraft-Momenten-Sensordaten, Kameradaten, Laser-Linien-Sensordaten, Betriebsdaten des MRK-fähigen Robotersystems oder dazugehöriger Softwaremodule wie die Analyse mittels Künstlicher Intelligenz. Das IOTA-Protokoll kann in diesem Fall zur Steigerung des Vertraues in Daten und beteiligte Parteien und der Datenintegrität bei der Speicherung von Prozessinformationen in der Blockchain bzw. dem Tangle eingesetzt werden.

Dokumentation mittels DAG Die aktuelle Vorgehensweise in der Flugzeugproduktion sieht vor, die jeweiligen Arbeitsschritte vom ausführenden Werker signieren oder stempeln zu lassen. Während des gesamten Produktionsprozesses erfolgt nach Abschluss der jeweiligen Tätigkeit das manuelle Unterzeichnen der durchgeführten Aufgabe. Mit dem Einführen des teilautomatisierten Nietprozesses kann zugleich eine Digitalisierung des Signaturprozesses erfolgen. Damit wird die analoge Buchhaltung obsolet und das Signieren mittels eines *digitalen Belegbuchs* kann realisiert werden.

Abbildung 5.25 fasst die Prozess- und Sensordaten zusammen, die während des Nietprozesses anfallen und in einer unternehmenslokalen Datenbank gespeichert werden. Für jeden kollaborativ gefügten Niet werden die prozessspezifischen Daten mithilfe eines Kraft-Momenten-Sensors, einer Kamera und eines Laserliniensensors erfasst. Wie zuvor beschrieben werden diese Daten mittels künstlicher Intelligenz analysiert. Weiterhin werden die Rohdaten in unternehmensinternen Datenbanken gespeichert. Gleichzeitig wird ein digitaler Fingerabdruck der jeweiligen Datei abgeleitet, der mithilfe des IOTA-Protokolls im IOTA-Tangle unveränderlich gespeichert werden kann.

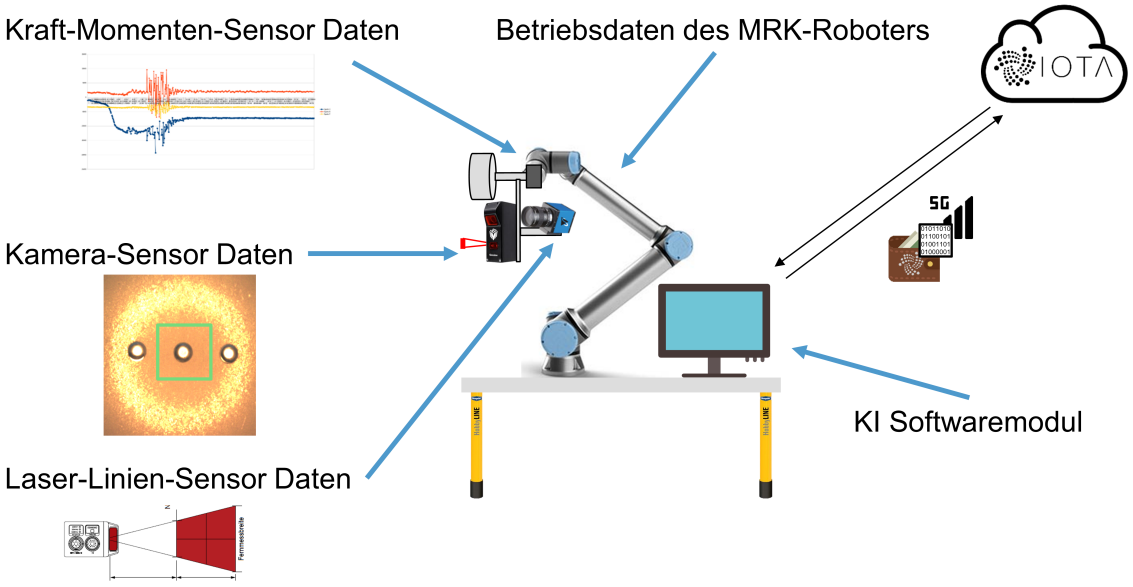


Abbildung 5.25: Prozess- und Sensordaten, die während des Nietprozesses gesammelt und im IOTA-Tangle hinterlegt werden in Anlehnung an [14]

Für diesen ersten Proof of Concept enthält das Datenpaket neben den Prozessdaten auch Metadaten. Diese beinhalten eine eindeutige ID (Typ: integer), die aus dem anfänglichen Scan der Nietlöcher bestimmt wird. Als Prozessdaten werden die Fingerabdrücke/Hashes des Kraft-Momenten-Logs, des Bildes und der Laserliniensensordaten angefügt. Weiterhin können bspw. das Ergebnis der KI Analyse mit 1 für i.O. oder 0 für n.i.O sowie die verwendete Softwareversion 1.1 in einem String zusammengefügt werden. Andere Metadaten wie der Name des Produkts, der Name des Werkers, der Name des Herstellers

oder des Kunden usw. werden zu diesem Zeitpunkt vernachlässigt, um zunächst grundlegende Erfahrungen zu sammeln. Der als .json formatierte Datenstring (vgl. 5.26) wird im Anschluss einem privilegierten Kanal im IOTA-Tangle hinzugefügt.


```
{
  "riveting process": [
    {
      "sensor": "process_execution",
      "data": [
        {
          "rivet_id": "895"
        },
        {
          "force_hash": "8c8c0230785900e6aee01a85e6439533ec65318c"
        },
        {
          "image_hash": "5854de17bfbd97af5afb4e3b5957504b945ac7fe"
        },
        {
          "laserlinesensor_hash": "46315e07e93af4f08052a7a95548f2c8eaaa4a61"
        },
        {
          "ai_analysis": "1"
        },
        {
          "ai_software_version": "1.1"
        }
      ]
    }
  ],
  "timestamp": " 2019-08-20T13:17:25+0000 "
}
```


Abbildung 5.26: Darstellung einer json-formatierten Nachricht, die dem IOTA-Tangle hinzugefügt wird

Die Zuordnung der Maschine zum entsprechenden Kanal erfolgt im implementierten Back-End. Dadurch wird die Maschine von IOTA als Trägermedium entkoppelt. Der Ablauf von der Erfassung der Rohdaten bis zur Validierung, unter Verwendung des IOTA-Protokolls und der entwickelten IOTA-Management-Console ist in Abbildung 5.27 dargestellt. Der Stationscomputer oder etwaige Edge Devices sammeln die zuvor definierten Daten und senden diese mittels standardisierter MQTT-Nachrichten an die entwickelte IOTA-Management-Console. Letztere speichert die Rohdaten in einer unternehmensinternen Datenbank. Das Softwaremodul, der IOTA-Tangle-Communicator, bildet den digitalen Fingerabdruck (Hash) der Rohdaten, setzt den zuvor definierten .json-formatierten Datenstring zusammen und schreibt diesen in einen privilegierten Kanal. Es wird ein privilegierter Kanal verwendet, da es sich nicht um öffentlich einsehbare Informationen handelt. Das Hinzufügen der Transaktion in den IOTA-Tangle erfolgt mittels des MAM-Verfahrens[7].

[7] MAM, kurz für Masked Authenticated Messaging, beschreibt ein Datenkommunikationsprotokoll von der IOTA Foundation, das die Funktionalität der Übermittlung und des Zugriffs auf einen verschlüsselten Datenstrom über den Tangle erlaubt. Weiterführende Informationen sowie Abbildungen können den IOTA-Veröffentlichungen entnommen werden. [153]

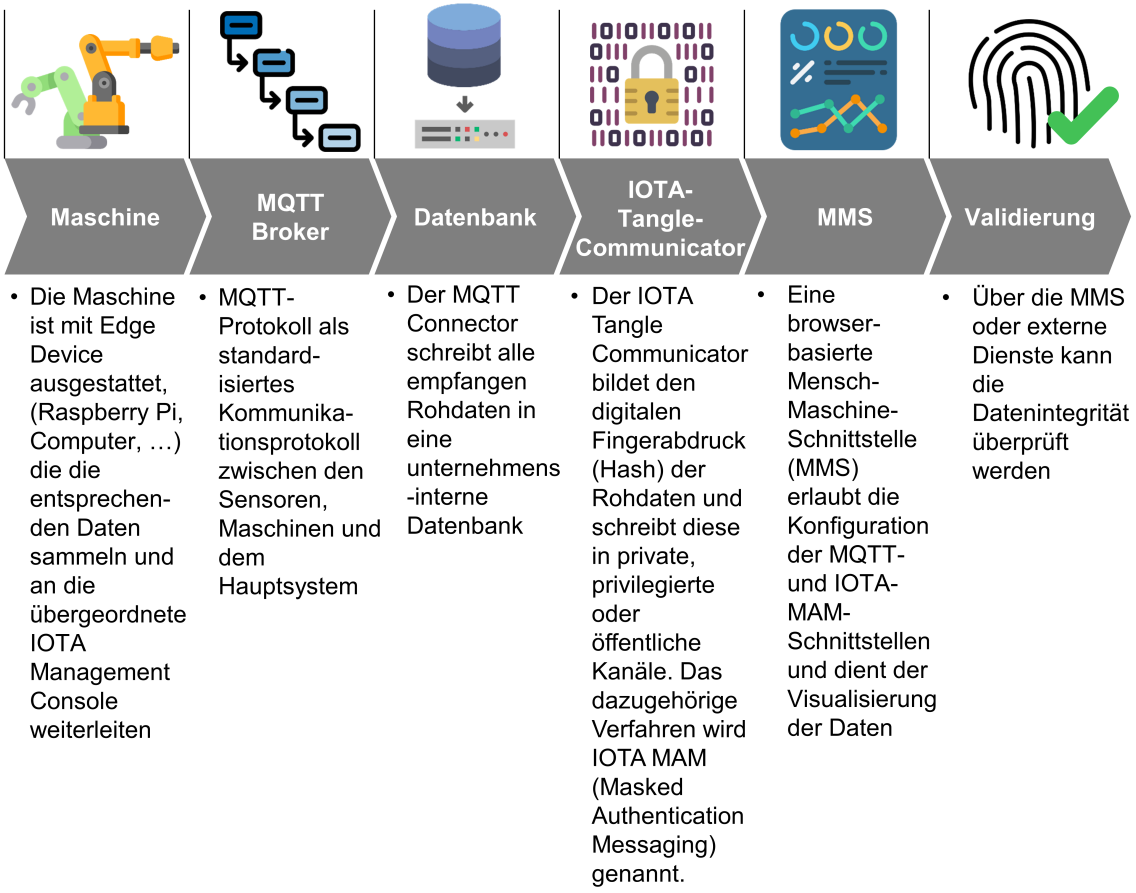


Abbildung 5.27: Ablauf von der Erfassung der Rohdaten bis zur Validierung unter Verwendung des IOTA-Protokolls und der entwickelten IOTA-Management-Console

Mensch-Maschine-Schnittstelle für DAG Mit der entwickelten browser-basierten Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) (vgl. Abbildung 5.28) können alle in Abbildung 5.27 gezeigten Komponenten intuitiv konfiguriert werden. Des Weiteren bietet die Plattform eine Visualisierung der Daten. Die Webseite ermöglicht es den Nutzern, allgemeine Informationen über IOTA anzuzeigen, wie z. B. Links zur Homepage von IOTA für detailliertere Informationen. Autorisierte Benutzer erhalten Zugriff auf die Kernkomponenten der IOTA-Management-Console. Mittels eines Logins kann auf die Rohdaten in der Datenbank oder den Daten im IOTA-Tangle zugegriffen werden. Des Weiteren ist das Anlegen von zusätzlichen Sensordatenstreams im IOTA-Tangle möglich. Mittels extern verfügbaren Services kann abschließend die Datenintegrität überprüft werden.

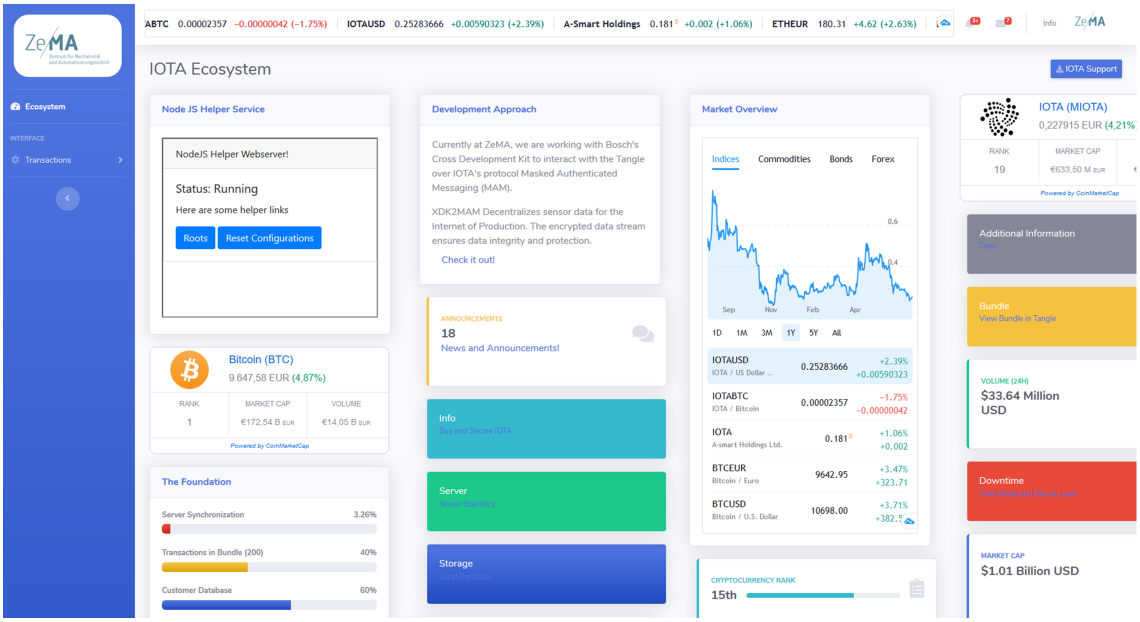


Abbildung 5.28: Visualisierung des IOTA-Management-Console-Dashboards

Abbildung 5.29 zeigt die zuvor definierte Nachricht in der IOTA-Management-Console, respektive der unternehmensinternen Datenbank. Der Datenstream wurde zudem im IOTA-Tangle hinterlegt. Zur Validierung der Daten wurden der externe Service thetangle.org verwendet. Mittels einer einzigartigen Identifikationsnummer kann der Sensordatenstream des Nietprozesses im Tangle identifiziert und die Nachricht für Zugriffsberechtigte lesbar gemacht werden, wie in Abbildung 5.30 dargestellt. Die Verschlüsselung der Informationen erlaubt lediglich berechtigten Personen den Zugriff auf die Daten, während das Hochladen in eine öffentliche Plattform die nachträgliche Manipulation des Datensatzes ausschließt.

{"riveting process":[{"sensor":"process_execution","data":[{"rivet_id":"895"},{"force_hash":"8c8c0230785900e6aee01a85e6439533ec65318c"},
{"image_hash":"5854de17bfbd97af5afb4e3b5957504b945ac7fe"},{"laserlinesensor_hash":"46315e07e93af4f08052a7a95548f2c8eaaa4a61"},{"ai_analysis":"1"},
{"ai_software_version":"1.1"}]}],"timestamp":" 2019-08-20T13:17:25+0000 "}

Abbildung 5.29: Sensordatenstream in der unternehmensinternen Datenbank



Abbildung 5.30: Validierung eines Sensordatenstreams im IOTA-Tangle

Kapitel 6

Validierung des MRK-Systems

Im Rahmen von drei Forschungsprojekten sind zwei aufeinander aufbauende Demonstratoren für das Fügen von Großbauteilen mittels einer Mensch-Roboter-Kollaboration entstanden, an denen der Funktionsnachweis und die Validierung der Forschungsergebnisse erfolgt. Weiterhin erfolgt eine Qualitätskontrolle mittels künstlicher Intelligenz, und Blockchain-basierte Technologien dienen der Steigerung der Datenintegrität.

Abschließend wird die zu Beginn gestellte Forschungsfrage sowie die Thesen zusammenfassend beantwortet. Das Kapitel wird mit einer kritischen Reflexion geschlossen.[1]

6.1 Validierungsszenario

Die Flugzeugindustrie hat großes Interesse an der Erforschung, Umsetzung und Integration von MRK-Prozessen in der Produktion zur gleichzeitigen Steigerung der Effizienz und der Wettbewerbsfähigkeit. Ziel des Einsatzes der MRK in der Produktion ist das Entlasten der Mitarbeiter bei monotonen und unergonomischen Tätigkeiten, um so die körperliche Beanspruchung zu reduzieren und die Arbeitsumfänge attraktiver zu gestalten.

Durch den Einsatz von (teil-)automatisierten Systemen kann die Effizienz durch eine höhere Produktqualität und gleichzeitig geringere Nacharbeit gesteigert werden. (Teil-) automatisierte Prozesse können mittels programmierbarer Parameter optimiert werden,

[1] Abschnitte dieses Kapitels wurden als Paper veröffentlicht: Müller, R., Vette, M., Geenen, A., Kanso, A., Masiak, T.: Development of a Human-Robot-Collaboration System using the Example of a Riveting Process in Aircraft Assembly, Journal of Robotics and Automation, URL: https://scholarlypages.org/Articles/robotics/jra-2-009.pdf, 2018. Müller, R., Vette, Masiak, T., Duppe, B., Schulz, A: Intelligent Real Time Inspection of Rivet Quality supported by Human-Robot-Collaboration, SAE Technical Paper, DOI: https://doi.org/10.4271/2019-01-1886, 2019. Müller, R., Vette-Steinkamp, M., Masiak, T.: Blockchain-basierte Qualitätsdokumentation befähigt eine Mensch-Roboter-Kollaboration in der Flugzeugproduktion, handling, Darmstadt, WEKA BUSINESS MEDIEN GmbH, 2019.

sodass eine erfolgreiche Prozessausführung garantiert werden kann. Mithilfe von Assistenzsystemen wird der Werker durch den Montageprozess geleitet und steht gleichzeitig mit dem System mittels Smarter Devices in Kontakt.

Die aktuelle Situation im ausgewählten Validierungsszenario, die Montage der Druckkalotte zur Sektionstonne in der Flugzeugstrukturmontage, ist in Abbildung 6.1 zusammenfassend dargestellt.

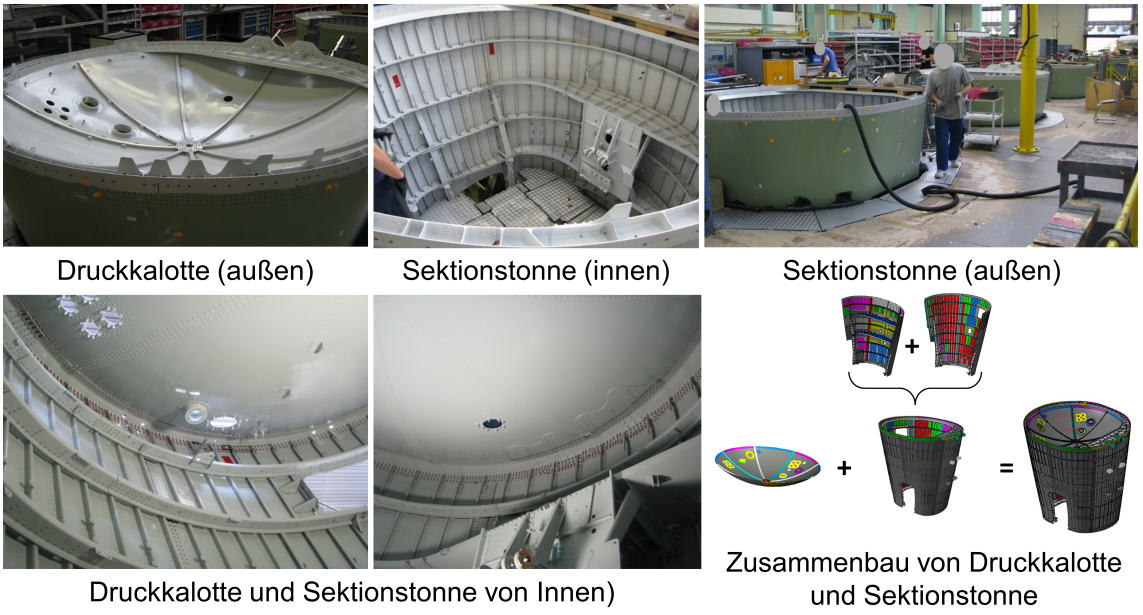


Abbildung 6.1: Die aktuelle Situation in der Sektionsmontage von Flugzeugen [116]

Für die Flugzeugproduktion ergeben sich unterschiedliche Herausforderungen und Motivationen beim Umsetzen dieser Anwendung:

- Ausführung von vielen komplexen Aufgaben auf, in und um der Sektion 19, also dem letzten Abschnitt eines Flugzeuges. Daraus ergibt sich für die Werker eine hohe ergonomische Belastung.
- Bei der Ausführung der Nietprozesse handelt es sich nach TS200 um qualitätsrelevante und sicherheitskritische Prozesse [15] [120].
- Aufgrund der großen Bauteildimensionen, geringen Toleranzen und der teilweise schwer zugänglichen Arbeitsräume wurde die teilautomatisierte Montage in der Praxis bisher nicht gelöst.
- Hohe Teile- und Variantenvielfalt
- Übertragbarkeit der Technologien auf weitere Montageprozesse (z. B. Anwendung des Nietprozesses auf weitere Montageaufgaben, konkret z. B. in der Helikopterproduktion; Einführen automatisierter Qualitätsprozesse in der Flugzeugproduktion)

6.2 Funktionsnachweis

Der Demonstrator bzw. die Entwicklungsumgebung in Abbildung 6.2 beinhaltet alle konzipierten und implementierten Module dieser Arbeit. Innerhalb des Funktionsnachweises werden alle Einzelschritte anhand des Praxisbeispiels aus der Flugzeugproduktion erprobt und validiert.

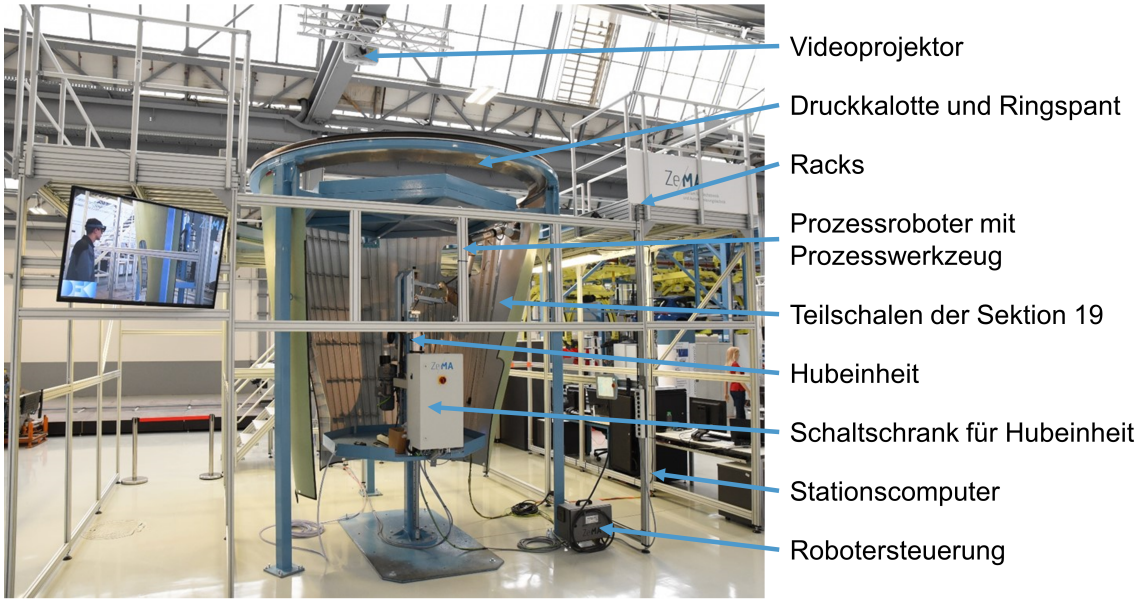


Abbildung 6.2: Demonstrator/ Entwicklungsumgebung zur Validierung des kollaborativen Nietprozesses, der Qualitätskontrolle mittels Künstlicher Intelligenz und der blockchain-basierten Steigerung der Datenintegrität mittels des IOTA-Protokolls am ZeMA.

In der Prozessplanungs- und Entwicklungsphase der vorgestellten **Bedienmethode** wird, entsprechend dem Analyseverfahren *Produkt - Prozess - Betriebsmittel*, eine fähigkeits-basierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter durchgeführt. Während der Mensch die komplexere Aufgabe des Einfädelns der Niet und dem Bedienen des Niethammers nachgeht, wird dem Robotersystem die monotone und nicht ergonomische Aufgabe des Gegenhaltens mithilfe eines Ambosses zugeteilt. Die, in Abbildung 6.2 erkennbaren, Racks dienen der Erreichbarkeit der aufgeständerten Sektion 19 für den Werker. Über eine Treppe und die Racks kann der Werker die Druckkalotte und damit seinen Arbeitsbereich erreichen. Der Prozessroboter, welcher sich innerhalb der Sektionstonne befindet, ist auf einer Hubeinheit montiert. Gemeinsam decken Roboter und Hubeinheit den notwendigen Arbeitsraum für die Gegenhalteaufgabe mit dem Amboss ab. Bei dem Roboter handelt es sich um einen sechs-achsigen Knickarmroboter mit einer seriellen Kinematik. Die Hubeinheit kann neben einem translatorischen Hub und einer rotatorischen Drehbewegung den Roboter über einen Auslegerarm in den Arbeitsbereich heben.

Das **modulare Steuerungssystem** zur Konfiguration des Montagesystems mit multimodalen Interaktionsmöglichkeiten ist auf einem lokalen Stationscomputer installiert. An dieser Stelle laufen alle Informationen der integrierten Betriebsmittel zusammen und werden lokal ausgewertet. Gleichzeitig übernehmen Softwaremodule das Auslesen und die Ansteuerung diverser Komponenten (z .B. Auslesen der Roboterpose, Ansteuern der Hubeinheit, Senden der Roboterpose an Smart Devices).

Bei der Programmierung des Roboters wird die offline Programmiermethode angewendet, d. h. der Roboter wird mittels einer Text-basierten Hochsprache offline programmiert. Mithilfe eines Laserliniensensor referenziert sich das System online an der Sektionstonne und führt den Scan, bzw. die Detektion der Nietlöcher, aus. Weiterhin ist das Robotersystem mit einer Kamera und einem Kraft-Momenten-Sensor ausgestattet, um eine Qualitätsinspektion durchzuführen.

Die Bedienmethode wird individuell auf die teilautomatisierte Nietstation zugeschnitten. Entsprechend dem entwickelten Vorgehensmodell zur Integration von Sensoren, Algorithmen und dessen Erweiterung um die Blockchainkomponenten, kann der Werker die gesamte Station über graphische Oberflächen am Stationscomputer oder Smart Devices in Betrieb nehmen und bedienen. Programmierkenntnisse sind für den Betreiber nicht notwendig - im Falle von neuen Varianten ist dank der implementierten **Mensch-Technik-Interaktion**, lediglich eine Rekonfiguration mittels einer graphischen Oberfläche vonnöten.

Die wichtigste Komponente für die Rekonfiguration bzw. das Einmessen sind die entwickelten **Messstrategien** aus Kapitel 5.2. Diese dienen der Detektion der Nietlöcher für den nachgelagerten Nietprozess von Druckkalotte zum Ringspant der Sektionstonne. Die entwickelten Messstrategien, *Referenzierung reales und virtuelles Modell* zur Referenzierung des Robotersystems am Bauteil sowie die *Merkmalsdetektion durch Interpolation und Best-Fit-Verfahren* dienen der lokalen Detektion der Nietlöcher. Mithilfe dieser Module kann der Werker nach dem Eintakten einer neuen Sektion die automatische Referenzierung des Roboters gegenüber dem Bauteil und dem Scan zur Identifikation der Nietlöcherpose starten.

Die implementierten Module zur Detektion des Nietloches und der Berechnung der Transformationsbeziehung finden beim Produzieren der Daten für das Traning der Künstlichen Intelligenz Einsatz. Während der 2350 durchgeführten Nietprozesse, d. h. dem Scan und Detektion des Nietloches, Berechnen der Transformationen, Positionieren des Ambosses vor dem Nietloch und die finale Ausführung des Nietprozesses sind keine Fehler in den entwickelten Modulen aufgetreten.

Grundvoraussetzung für die Durchführung eines erfolgreichen Nietprozess ist die Einhaltung der Nietspezifikation - Basis dafür ist die Beherrschung der **Toleranzen** im gesamten Montageprozess bzw. den verwendeten Betriebsmitteln.

Die verwendete MEB-Methode ist eine gute Möglichkeit, neuartige Technologien zu untersuchen und dient der Schaffung eines Überblickes, insbesondere bei Prozessen zwischen Mensch und Roboter. Bei dem MEB geht es nicht um die Erstellung eines detaillierten und präzisen Modells, sondern um den Produktionsprozess und seine Strukturen. In Kombination mit dem Einsatz einer Toleranzkette kann die Machbarkeit des Prozesses nachgewiesen werden.

Die gemeinsame Darstellung von Mensch und Roboter im MEB spielt eine wichtige Rolle, insbesondere bei der Betrachtung der soziotechnischen Systembaugruppe. Die Analyse des abgebildeten MRK-Prozesses und die dazugehörigen Toleranzketten im MEB zeigen, die Variation des aktuellen Produktionsprozesses und der Betriebsmittel ermöglicht einen funktionsfähigen Nietprozess. Verbesserungsmöglichkeiten hinsichtlich der Genauigkeit, wie z. B. die Kalibrierung des Roboters auf den Arbeitsraum und die Prozesskontrolle über Kraft-Drehmoment-Sensordaten werden mithilfe dieser Methode aufgezeigt. Auf der menschlichen Seite spielen die Ergonomie und die Prozessumgebung, aber auch die Akzeptanz der MRK-Technolgie eine große Rolle. Abhilfe kann der Einsatz von Smart Devices bringen, die den Werker auf natürliche und intuitive Weise unterstützen.

Die Integration eines ganzheitlichen **Steuerungssystems** mit hochwertigen Bedienoberflächen steigert die Akzeptanz des Bedieners im täglichen Einsatz. Darüber hinaus führt die Implementierung einer natürlichen und intuitiven Mensch-Technik-Interaktions-Schnittstelle für teilautomatisierte Systeme dazu, die Betriebsmittel weniger als *Instrument*, sondern vielmehr als *Partner* für den Werker zu betrachten. Dies ist eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Zusammenarbeit in einem hybriden Team und zusätzlich soll den Mitarbeitern dadurch ein effizienter Betrieb der Station in der Montage ermöglicht werden.

Smart Devices, wie die implementierte Smartwatch oder die Mixed-Reality-Brille, kommunizieren über eine Funkverbindung mit dem Computer und erlauben es dem Werker sich frei in der Station zu bewegen und gleichzeitig die volle Kontrolle über das System zu haben. Neben der Verwendung der Mixed Reality Technologie werden über der Sektion 19 ein Videoprojektor zur Visualisierung von prozessrelevanten Informationen montiert. Während die Smartwatch einen kleinen Interaktionskanal am Handgelenk darstellt, über die der Werker die gesamte Station steuern oder sich über den Betriebszustand informieren kann, lassen sich Informationen ebenfalls direkt in das Sichtfeld des Werkers mithilfe der Mixed Reality Technologie projizieren. Je nach Belieben können die Interaktionen

mit einem Klick auf der Smartwatch oder einem virtuellen Klick in der Mixed Reality Welt ausgeführt werden.

Während der **Prozesswerkzeugentwicklung** werden, auf Basis der Schwingungsanalyse der Roboterkinematik und des Nietwerkzeuges, optimale Parameter ermittelt, welche im Anschluss in das reale Werkzeug übertragen werden. Abbildung 6.3 zeigt die auftretenden Kräfte ohne und mit integriertem Federelement im Nietwerkzeug. Während ohne integriertes Federelement die Kräfte im Mittel $F = 125N$ betragen und Spitzenkräfte bis zu $F = 195N$ auftreten, können diese durch den Einsatz des entwickelten Nietwerkzeugs auf gemittelt $F = 65N$ reduziert werden. Im praktischen Vergleich, siehe Graphen links und rechts in Abbildung 6.3, können so die Kräfte um ca. 50% minimiert werden.

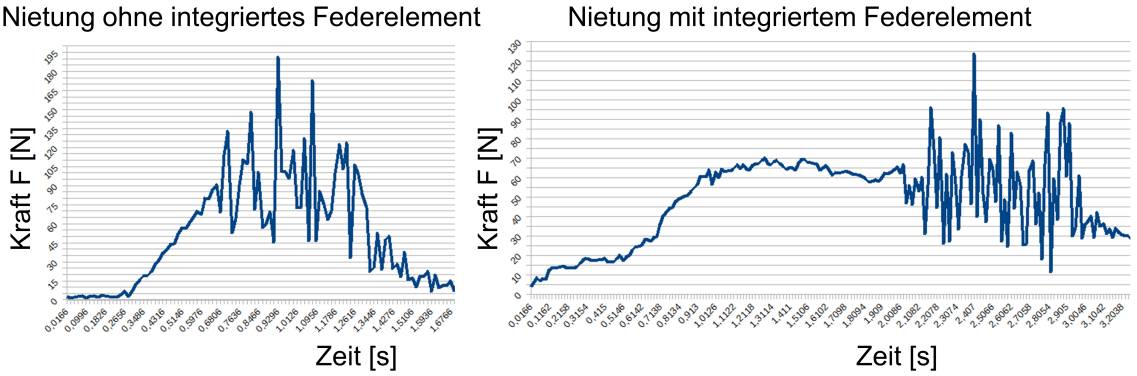


Abbildung 6.3: Messung der Nietprozesskräfte, die in die Roboterkinematik eingeleitet werden. Nietung ohne integriertes Federelement links und Nietung mit integriertem Federelement rechts. [150]

Ein wichtiges Ziel, die Minimierung der durch den Niethammer erzeugten Schwingungen im Roboter, wird somit erreicht. Das modulare Nietwerkzeug und dessen Komponenten sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Das gezeigte Ambosswerkzeug wird am Roboter montiert und in den kollaborativen Nietprozess integriert. Für die Ausführung des Nietprozesses muss das Nietwerkzeug grundlegende Schwingungen für die Kaltumformung des Nietkopfes zulassen. Möglich wird dies durch die Auslegung des Federelements auf der Grundlage der zuvor festgelegten Parameter für das Zweimassensystem. Schlecht eingestufte Schwingungen, die die Robotergelenke beschädigen können, werden eliminiert, die notwendige Schwingfähigkeit bleibt jedoch weiterhin erhalten. Darüber hinaus ist das Federelement ein wichtiger Bestandteil für das Zusammenspiel von Mensch und Roboter und der Steuerung des Robotersystems. Aufgrund seiner Kompressibilität treten zwei Haupteffekte auf. Der erste Effekt ist, dass beim Eindrücken des Niets die Feder im Ambosswerkzeug vom Werker zusammengestaucht wird. Als zweiter Effekt werden während des kollaborativen Nietprozesses negative Schwingungen vom Ambosswerkzeug eliminiert. Weiterhin wird die Ambossmasse des Werkzeugs aufgrund des integrierten Federelement nachpositioniert. Dadurch muss der Roboter keine Online-Positionsnachführung

durchführen. Dies ermöglicht eine einfache Implementierung des Roboters, überträgt alle prozessrelevanten Parameter auf das Werkzeug und führt schließlich zu einem kollaborativen Nietprozess zwischen Mensch und Roboter. Aufgrund des modularen Aufbaus und der Integration aller prozessrelevanten Parameter ist das Nietwerkzeug nicht an einen speziellen Robotertyp gebunden, sondern flexibel adaptierbar.

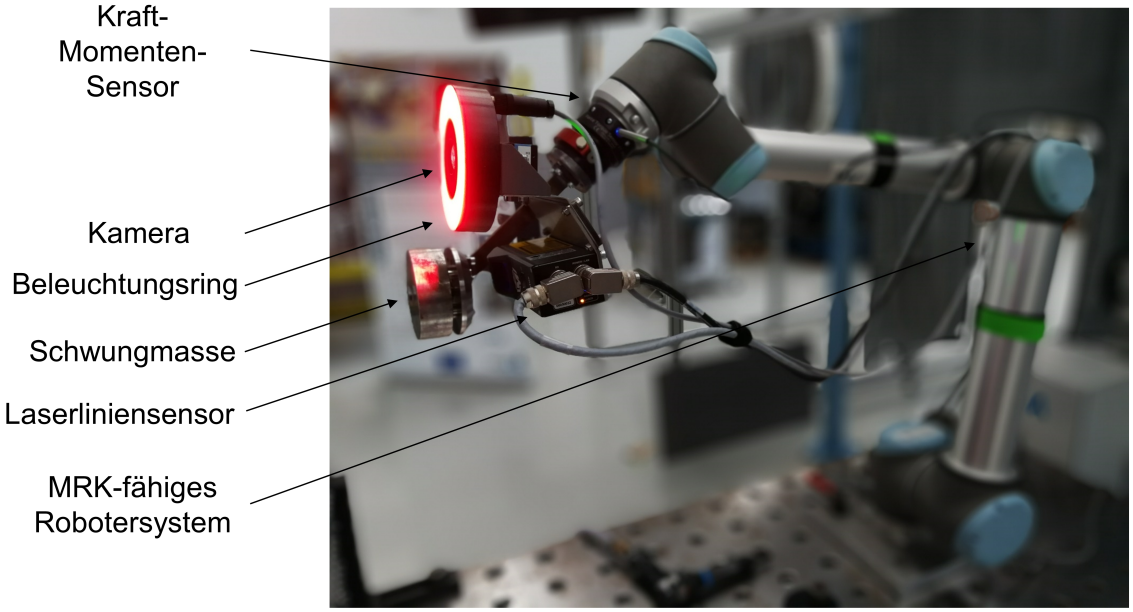


Abbildung 6.4: Das entwickelte modulare Nietwerkzeug besitzt aufgrund der Schwungmasse die Fähigkeit, den Nietprozess kollaborativ mit dem Menschen auszuführen und ist mit diversen Sensoren ausgestattet.

Für die **Qualitätskontrolle mittels künstlicher Intelligenz** werden Niete in einem kollaborativen Prozess zwischen Mensch und Roboter gesetzt. Für jeden Niet werden Kraft-Momenten-Sensordaten und Bildaufnahmen gesammelt. Die Methode des maschinellen Lernens wird, basierend auf der Bewertung der Nietqualität durch einen geschulten Werker, trainiert. Insgesamt liegen 1437 gut und 913 schlecht klassifizierte Nietverbindungen vor. Die Lasersensormessungen dienen der deterministischen Überprüfung der Nietqualität, die unabhängig von einer Qualitätsprüfung mit künstlicher Intelligenz für die Nietprüfung angewendet werden sollten. Für das Training der maschinellen Lernmodelle werden die Daten in Trainingsdaten, Validierungsdaten und Testdaten (50, 25, 25) unterteilt. Während die Daten für das Training des Modells verwendet werden, werden Validierungsdaten für die Parametereinstellung verwendet. Die Testdaten werden zur Bewertung der Leistung der verschiedenen Ansätze genutzt.

Die Online-Klassifikation, auf Basis von Kraft-Momenten-Sensordaten, zeigt Genauigkeiten im Bereich von 82-86% für alle Arten der Vorverarbeitung und der getesteten Verfahren (vgl. Tabelle 6.1).

Die Klassifikation mittels Neuronaler Netze (Mav) schneidet mit einer Genauigkeit von 82.9 % bzw. mittels XGBoost (MAgg) mit einer Genauigkeit von 85.9 % ab. Das *True Positive* Verhältnis bedeutet in diesem Beispiel, dass mittels der Neuronaler Netze (Mav) 87.7 % der guten Niete von dem Klassifikator richtig der Klasse *I.O.* zugewiesen wurden und 75.0 % richtig der Klasse *n.I.O.*.

Das *True Negative* Verhältnis beschreibt den Prozentsatz der defekten Nieten, die vom Klassifikator als schlecht bewertet wurden. Das Ergebnis lässt sich auf ein ungleiches Verhältnis des Datensatzes zwischen guten und defekten Nietverbindungen zurückführen.

Methode / Daten (Preprocessing)	Genauigkeit	True Positive Rate	True Negative Rate
NN / MAv	82.9 %	87.7 %	75.0 %
NN / MAgg	83.5 %	95.1 %	64.3 %
NN / PIP	82.5 %	89.4 %	71.1 %
XGBoost / MAv	83.7 %	90.2 %	73.0 %
XGBoost / MAgg	85.9 %	92.6 %	74.8 %
XGBoost / PIP	83.9 %	91.8 %	70.8 %

Tabelle 6.1: Leistungsmessungen von Modellen des maschinellen Lernens an vorverarbeiteten Kraft-Momenten-Sensordaten [152]

Die Offline-Klassifizierungen auf Basis von Bilddaten (vgl. Tabelle 6.2) hat eine Genauigkeit von 96,8 %.

Methode	Genauigkeit	True Positive Rate	True Negative Rate
CNN	96,8 %	98,4 %	94,1 %

Tabelle 6.2: Leistungsmessung von Modellen des maschinellen Lernens anhand von Bilddaten [152]

Obwohl die Modelle des maschinellen Lernens auf einem relativ kleinen Datensatz trainiert wurden, zeigen gerade die hohen Genauigkeitswerte in der Offline-Klassifikation das Potenzial des vorliegenden Ansatzes. Um einen produktiven Einsatz in der Flugzeugproduktion zu bewerten, muss die Anzahl der Testdaten erhöht werden. Während der Einsatz der KI vielversprechende Ergebnisse liefert, sollte eine industrietaugliche Implementierung als hybrides Verfahren eingesetzt werden. Das heißt, der menschliche Aspekt der Qualitätsprüfung kann durch einen intelligenten, automatisierten Prozess ersetzen werden, der die Qualität durch eine Klassifikation, basierend auf Bildern und

physikalischen Parametern, wie Höhe, Durchmesser und Kraft bestimmt. Die Klassifikation sollte jedoch nicht komplett der KI überlassen werden. Die KI kann die Kraft-Momenten-Sensordaten oder Bilddaten unter der Bedingung einer großen Datenmengen gut analysieren. Dennoch ist ein nachgelagerter Scan der Schließkopfabmessungen der Niet mittels des Laserliniensensors zu empfehlen. Durch die Einbindung einer deterministischen Prüfung kann somit ein hybrides Inspektionsverfahren umgesetzt werden.

Einen besonderen Mehrwert erreicht die Prüfung mittels KI, indem jede gefügte Nietverbindung einer Qualitätsanalyse unterzogen wird. Während im Stand der Technik in der Industrie zwar sicherheitskritische Nietverbindungen aufwendig inspiziert werden, gilt dies jedoch nicht für jede Niet. Nietverbindungen können neben einer zerstörenden Prüfung lediglich oberflächlich mittels einer visuellen oder auditiven Prüfung inspiziert werden. Der Roboter übernimmt die monotone Inspektionsaufgabe, der Werker prüft weiterhin schwer zugängliche Arbeitsbereiche, die für den Roboter nicht zugänglich sind. Mit der Einführung der KI-Qualitätsanalyse kann ohne zusätzlichen Aufwand nicht nur nahezu jede Nietverbindung analysiert werden sondern es besteht erstmals die Möglichkeit mittel der Analyse des Kraft-Momenten-Verlaufes den Nietprozess zur Inspektion heranzuziehen. Zukünftig könnte so bspw. die Anzahl der Nietverbindungen während der Flugzeugproduktion drastisch minimiert werden, wodurch gleichzeitig der Produktionsaufwand/ die Produktionskosten und das Gewicht reduziert werden könnten.

Künstliche Intelligenz Algorithmen können bei der Qualitätssicherung den Menschen unterstützen, indem prozessspezifische Sensordaten zur Bewertung der Qualität verwendet werden. Die anschließende **Qualitätsdokumentation** kann mithilfe von **Blockchain-basierten Technologien** unveränderlich und integer durchgeführt werden und so einen wirklichen Mehrwert schaffen.

Aufbauend auf der zuvor beschriebenen Teilautomatisierung des Nietprozesses und der Inspektion, kann zugleich eine Digitalisierung des Signaturprozesses erfolgen. Der Einsatz eines digitalen Belegbuchs kann so die analoge Buchhaltung obsolet machen. Voraussetzung ist, die notwendige Datenintegrität sicherzustellen. Weiterhin besteht die Möglichkeit ausgewählte Daten zusätzlichen Parteien in einer Zulieferkette zugänglich zu machen.

Um die Datenintegrität sicherzustellen, wird als digitales Belegbuch die blockchain-basierte Technologie namens IOTA verwendet, die auf der sogenannten Distributed-Ledger-Technologie, bzw. genauer gesagt, der Directed Acyclic Graphs (DAG). [105]

Die in der Praxis anfallenden Prozess- und Metadaten, hier sicherheitskritische Nietverbindungen während der Flugzeugproduktion, werden mittels der entwickelten *IOTA-Management-Console*, einer unternehmensinternen Datenbank, sowie in gehashter Form der Blockchain bzw. dem IOTA-Tangle hinzugefügt. Werden die Rohdaten nun zur Validierung der Produktionsqualität zwischen Zulieferer, Behörden oder dem OEM geteilt, kann die Datenintegrität mithilfe der Hashwerte, also dem digitalen Fingerabdruck der Daten, geprüft werden. Sollten die Daten von sicherheitskritischen Nietverbindungen beispielsweise nachträglich manipuliert worden sein, kann dies aufgrund unterschiedlicher Hashwerte aufgedeckt werden.

Das entwickelte Servermodul und die dazugehörige graphische Oberfläche wurden in den stationären Demonstrator sowie den in Abbildung 6.5 dargestellte mobilen Demonstrator implementiert. Die Anbindung des Blockchain-/DAG-/IOTA-Moduls mittels standardisierten MQTT-Schnittstellen erlaubt die schnelle und intuitive Anbindung jeglicher Komponenten an die Blockchain. Neben der Anbindung der Nietstation, wurde weiterhin ein eigens implementierter Sensorplatinenrechner names XDK von der Firma Bosch und ein weiterer roboterbasierter Inspektionsprozesse des Forschungspartners CRETEC GmbH an das System angeschlossen, um die Softwaremodule zu validieren.

6.3 Erprobung im Gesamtsystem

Für die praktische Validierung des Gesamtsystems wurden alle Komponenten, die für den Montageprozess entwickelt wurden, in den realen Demonstrator integriert. Die Verwendung von original Bauteilen und Betriebsmitteln aus der Flugzeugproduktion erlauben die Durchführung von Tests unter möglichst industrienahen Bedingungen.

Neben dem bereits am ZeMA existierenden Flugzeugdemonstrator aus den Forschungsarbeiten von Vette-Steinkamp, der sich mit rekonfigurierbaren Robotersystemen für die Montage von flächigen Flugzeugstrukurbauteilen beschäftigte [35], wurde ein weiterer Demonstrator für Montageprozesse in der Flugzeugproduktion aufgebaut. Schwerpunktthemen sind in diesem Demonstrator limitierte Arbeitsräume und geringe Fertigungstoleranzen, trotz großer Bauteildimensionen sowie die Optimierung von unergonomischen Arbeitsräumen. Weiterhin werden Algorithmen der künstlichen Intelligenz, MTI sowie Planungsprozesse und Toleranzmanagementansätze unter Randbedingungen der Flugzeugproduktion erprobt.

Der Aufbau besteht aus einem $6m$ x $6,5m$ großen begehbaren Rack, welches die Zugänglichkeit der ca. $4m$ hoch positionierten Druckkalotte garantiert. Im Innenbereich des

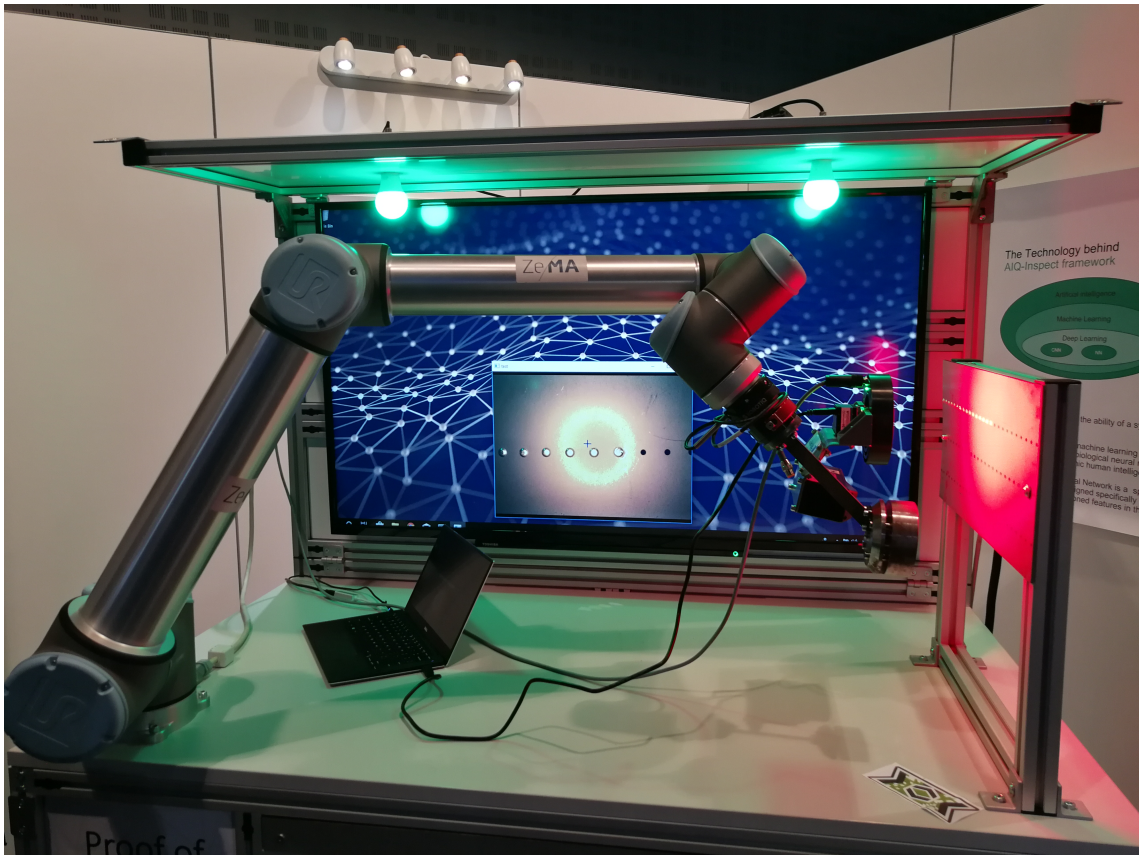


Abbildung 6.5: Mobiler Demonstrator zur Validierung des kollaborativen Nietprozesses, der Qualitätskontrolle mittels künstlicher Intelligenz und der blockchain-basierten Steigerung der Datenintegrität mittels des IOTA-Protokolls am ZeMA.

Racks wurde, entsprechend den realen Bedingungen, die $3m$ x $3m$ breite Druckkalotte und die Sektion 19 aufgeständert positioniert. Der Zugang ist von allen Seiten gewährleistet, damit eine Vielzahl an Prozessen in der Sektion abgedeckt werden können, auch wenn in dieser Arbeit der Fokus auf den Nietprozessen der Druckkalotte zur Sektionstonne gelegt wird.

Wie in der Abbildung 6.6 erkennbar ist, besteht der Demonstrator aus Industriekomponenten und wurde nicht in seinen Dimensionen reduziert - dadurch kann eine technologisch ausgereifte Forschung aufgrund der realen Bedingungen erzielt werden.

Die Validierung des entwickelten Nietwerkzeuges und des Mensch-Roboter-kollaborativen Nietprozesses wurde einerseits in einem modellhaften Aufbau auf einem Montagetisch sowie unter realen Bedingungen in der Sektion 19 durchgeführt. Die mit dem Projektpartner entwickelte Hubeinheit positioniert den Roboter in der Sektionstonne. Letzterer positioniert das Prozesswerkzeug im Arbeitsraum. Das Prozesswerkzeug wurde plattformunabhängig entwickelt und modular aufgebaut, d. h. die gesetzten Anforderungen und Fähigkeiten wurden in das Werkzeug implementiert und können unabhängig des

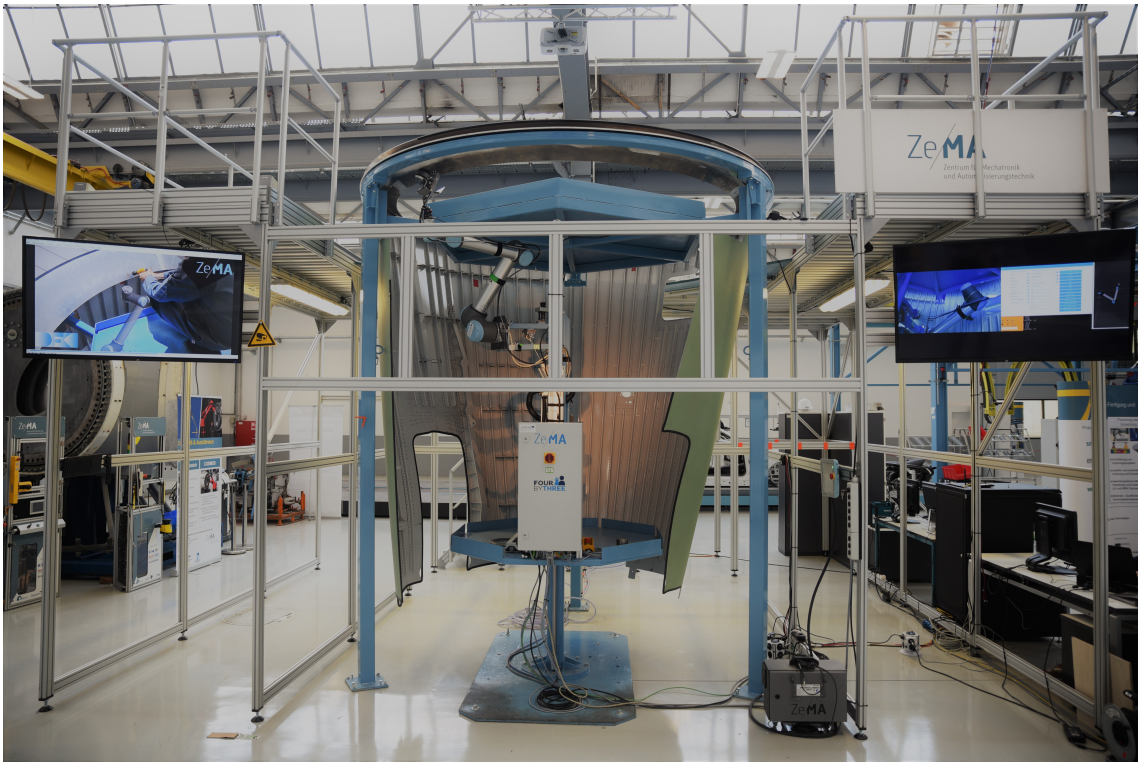


Abbildung 6.6: Gesamtaufbau der Flugzeugnietstation am ZeMA

verwendeten Robotersystem eingesetzt werden. Ein wichtiger Punkt bei der Gestaltung sind die limitierenden Arbeitsraumverhältnisse, wie in Abbildung 6.7 zu erkennen ist.

Nach der Positionierung der Hubeinheit beginnt der Roboter mit dem Scan des Ringspantes zur Identifikation der Nietlöcher (vgl. Abbildung 6.8). Der Laserliniensensor wurde für eine optimale Ausrichtung seitlich mit einer leichten Neigung am Werkzeug angeflanscht.

Während der Nietprozessausführung minimiert das entwickelte Nietwerkzeug aufgrund seines integrierten Federelementes die Schwingungen und Kräfte im Prozess, diese werden wiederum vom Kraft-Momenten-Sensor aufgezeichnet. Die Sensordaten von Kraft-Momenten-Sensor und Kamera können mittels künstlicher Intelligenz analysiert werden. In Kombination mit einem Scan der Stauchkopfdimensionen, mithilfe des Laserliniensensors, wird eine hybride Qualitätssicherung der gesetzten Nietverbindungen umgesetzt.

Aufbauend auf der zuvor beschriebenen Teilautomatisierung des Nietprozesses und der KI basierten Inspektion, kann zugleich eine Digitalisierung des Signaturprozesses erfolgen. Um die Datenintegrität sicherzustellen wird als digitales Belegbuch eine Blockchain-basierte Technologie namens IOTA verwendet. Mithilfe dieser Technologie können Sensor-Rohdaten zur Validierung der Produktionsqualität sicher zwischen Zulieferer, Behörden



Abbildung 6.7: Validierung des Nietwerkzeuges. Das Nietwerkzeug wird von einem MRK-fähigen Robotersystem im Arbeitsraum positioniert.

oder dem OEM geteilt werden. Werden die Daten von sicherheitskritischen Nietverbindungen bspw. nachträglich manipuliert, kann diese aufgrund unterschiedlicher Hashwerte, also einem abweichenden digitalen Fingerabdruck, aufgedeckt werden.

Basierend auf dem vorgestellten Bedienkonzept wird die Interaktion zwischen Mensch und Roboter durch den Einsatz von Smart Devices und graphischen Oberflächen abgerundet, die den Werker dazu befähigen die gesamte Station auch ohne Programmierkenntnisse zu bedienen. Abbildung 6.9 zeigt abschließend den Einsatz einer Smartwatch zur Steuerung der Station sowie eine Mixed-Reality-Brille, welche dem Werker ein virtuelles Hologram seines Teampartners, dem Roboter, anzeigt.

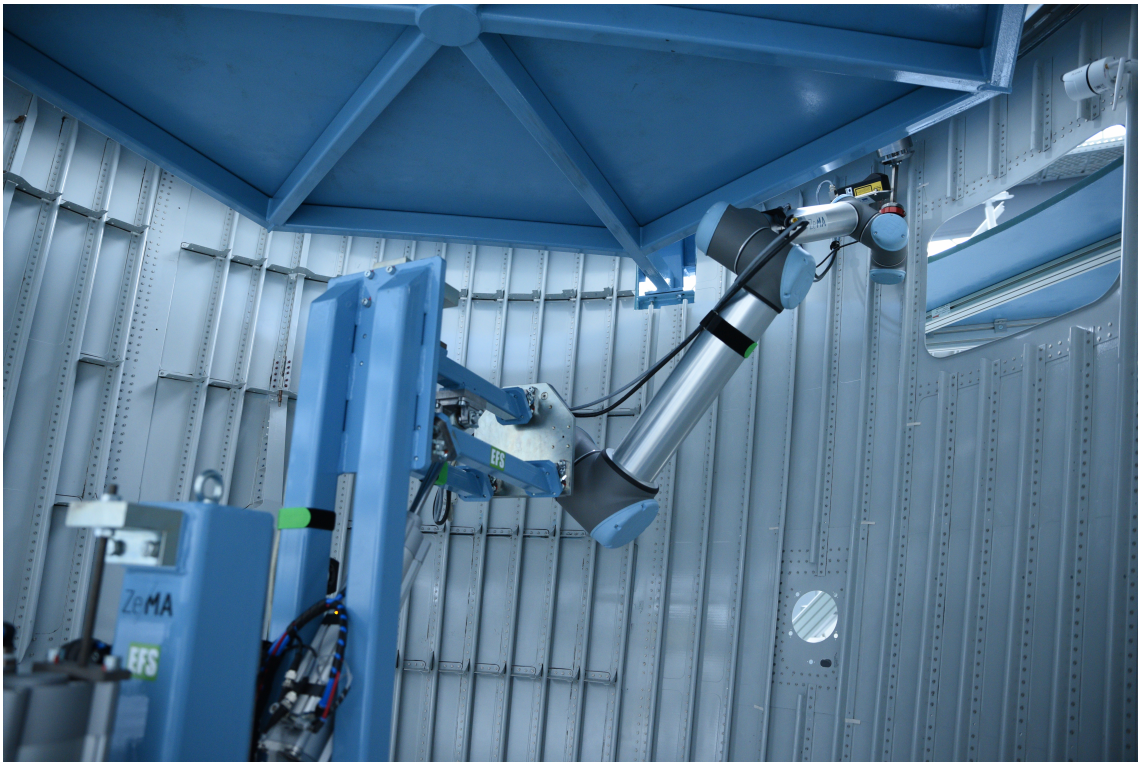


Abbildung 6.8: Validierung des Prozessablaufes in der Sektion 19. Das MRK-fähige Robotersystem wird von einer Hubeinheit im Arbeitsraum positioniert.

6.4 Beantwortung der Forschungsfrage

Zu Beginn dieser Arbeit wurde auf die Herausforderungen und den Wunsch auf Automatisierung in der Flugzeugproduktion eingegangen, um die Effizienz in Montageprozessen und die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu steigern. Gleichzeitig sollen die Mitarbeiter in der Flugzeugproduktion bei monotonen und ergonomisch negativ zu bewertenden Tätigkeiten entlastet werden.

Aus diesen Anforderungen wurde die übergeordnete Forschungsfrage *Mit welchen Subsystemen muss ein MRK-fähiges Robotersystem ausgestattet sein, um einen teilautomatisierten Prozess im hybriden Team unter Randbedingungen der Flugzeugstrukturmontage zu ermöglichen?* abgeleitet.

Die Thesen der Arbeit decken die Ausarbeitung eines MRK-Konzeptes, eines Interaktionskonzepts für das hybride Team, den Einsatz der künstlichen Intelligenz zur Qualitätssicherung und der integeren Qualitätsdokumentation mittels blockchain-basierten Technologien ab. Die eingangs aufgestellten Thesen werden durch den Demonstrator nachgewiesen und beantwortet.



Abbildung 6.9: Validierung der Mensch-Technik-Interaktion sowie Integration einer Bedienmethode und Smart Devices.

Ziel des Anwenders ist die Steigerung der Effizienz, die Optimierung der Ergonomie bei gleichzeitiger Beherrschung der Variantenvielfalt und der Steigerung der Stückzahlen. Aufgrund des Zusammenspiels des MRK-fähigen Robotersystems, Algorithmen der künstlichen Intelligenz und den blockchain-basierten Technologien darf sich die Komplexität in der Flugzeugsektionsmontage nicht erhöhen. Die Integration einer natürlichen MTI und der Möglichkeit der Rekonfiguration des Montagesystems soll einen wirtschaftlichen Einsatz garantieren.

Die erste These *Ein Robotersystem muss mit zusätzlichen Komponenten ausgestattet werden, um einen Nietprozess kollaborativ abzubilden* wird mittels des Demonstratoraufbaus, den Komponenten der teilautomatisierten Nietstation und der Entwicklung eines prozessspezifischen Nietwerkzeugs nachgewiesen.

Die wesentlichen Elemente des teilautomatisierten Systems lassen sich über die sieben aufgezeigten Kernkomponenten abdecken. Aufgrund der Einstufung der Station als eine MRK werden entsprechende Sicherheitsanforderungen an das System gestellt. Um die großen Bauteildimensionen zu beherrschen, wird neben einem Robotersystem eine zusätzliche Kinematik zum Abdecken des gesamten Arbeitsraumes benötigt. Das

angepasste Steuerungssystem erlaubt das Auslesen von Sensoren und Ansteuern von Aktoren. Die Sensoren dienen der Referenzierung, Merkmalsdetektion und liefern die Messdaten für die Algorithmen der künstlichen Intelligenz zur abschließenden Qualitätsdokumentation. Weiterhin wird ein angepasstes Bedienkonzept für die Interaktion zwischen Mensch und Roboter benötigt.
In der aktuellen Strukturmontage werden die Nietprozesse von zwei technisch erfahrenen Werkern durchgeführt, um die hohen Qualitätsanforderungen zu erfüllen. Der Mensch kann sich während des Nietprozesses an seinen Teampartner adaptieren und so die Orientierung oder Gegenkraft der Werkzeuge anpassen. Er ist in der Prozessausführung lern-, anpassungsfähig und mobil. Für die Übertragung des manuell ausgeführten Nietprozesses wird der Entwicklung eines prozesspezifischen Werkzeuges einen hohen Stellenwert zugeschrieben. Die Kernkomponente des modular aufgebauten Nietwerkzeuges besteht aus dem Amboss (Gegenhalter) und der Fähigkeit, die im Prozess auftretenden Kräfte mittels einer integrierten Feder zu minimieren. Dies ermöglicht die Abbildung eines kollaborativen Nietprozesses im hybriden Team von Mensch und Roboter und beantwortet zugleich die erste These. Zur Referenzierung und Merkmalsdetektion wurden zusätzliche Sensoren in das Nietwerkzeug integriert, damit der Roboter automatisiert Teilprozesse, wie bspw. den Scan der Nietlöcher, durchführen kann.

Die modularisierte Betrachtung aller Komponenten und die Entwicklung eines dazugehörigen Steuerungssystems erlaubt die *Umsetzung einer natürlichen Interaktion zwischen Mensch und Roboter*. Grundlage ist das ganzheitlich entwickelte und implementierte Bedienkonzept, welches bei der fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung beginnt, die Schnittstellen zwischen Mensch und Roboter definiert, die Arbeitsvorbereitung erlaubt sowie den eigentlichen Nietprozess und die abschließende Qualitätssicherung begleitet.

Das Mensch-Roboter-Interaktion-Taxonomie Canvas nach Onnasch [48] unterstützt mithilfe der visuellen Aufbereitung bei der Konzeption und Bewertung der entwickelten MTI. Grundsätzlich gilt - *Konfigurieren statt Programmieren*, um Stillstandszeiten zu reduzieren. Dem Werker stehen je nach Situation oder Prozessschritt graphische Oberflächen zur Bedienung auf unterschiedlichen Endgeräten zur Verfügung. Während der Arbeitsvorbereitungen wird der Nietprozess in einer nativen Computeranwendung betrachtet und kann gegebenenfalls korrigiert werden. Während des Nietprozesses hat der Werker mittels Smart Devices die volle Kontrolle über die Station. Smart Devices liefern prozessspezifische Informationen, wie bspw. die Position des Roboters und der aktuell zu bearbeitenden Niet mittels eines Hologramms in der Mixed-Reality-Brille. Der Werker kann sich auf die Prozessausführung konzentrieren und bekommt relevante Informationen, wie die Bewertung der Nietqualität, in seinem Sichtfeld eingeblendet.

Das offene Steuerungssystem erlaubt das einfache Konfigurieren der Station und den Austausch von Modulen, sodass Modulaktualisierungen und Erweiterungen eingepflegt werden können. Durch das Einbringen neuer Module können zusätzliche Prozesse abgedeckt oder neue Technologien hinzugefügt werden. Dies dient einer kontinuierlichen Weiterentwicklung des gesamten Systems.

Die dritte These, *Algorithmen der Künstlichen Intelligenz sind fähig die Nietprozessqualität zu bewerten*, wurde in einer praktischen Versuchsdurchführung bestätigt. Parallel zur Versuchsdurchführung wurde das *Vorgehensmodell zur Integration von Sensoren und Algorithmen* entwickelt, welches auf dem aus der Literatur bekannten Six-Sigma Modellen basiert.

Die implementierte Künstliche Intelligenz arbeitet nach dem Supervised-Learning-Modell, d. h. in einem separaten Schritt werden Prozessdaten eines Mensch-Roboter-kollaborativen Nietprozess mithilfe der Sensoren aufgezeichnet. Die Daten werden beschriftet und das während der Trainingsphase erstellte Modell wird auf dem Stationscomputer installiert. Die erzielten Genauigkeiten sind für die Anwendung in der Qualitätssicherung vielversprechend. Die Anwendung zur Klassifikation der Qualität kann dabei im Bereich der Flugzeugsektionsmontage liegen, ist aber auch auf weitere Qualitätssicherungsprozesse einfach übertragbar und bietet daher viel Potential in der Industrie.

Abschließend soll die These, *blockchain-basierte Technologien können für eine integere Qualitätsdokumentation eingesetzt werden*, beantwortet werden. Blockchain-basierte Technologien werden in den unterschiedlichsten Bereichen erprobt, um Transaktionen einer Kryptowährung oder Datentransaktionen durchzuführen. Während viele Kryptowährungen oder Blockchainsysteme der Schaffung von alternativen Währungen dienen, eignen sich spezielle DAG-basierte Systeme für die Sicherung von Vertrauen und der Datenintegrität über die Unternehmensgrenzen hinaus und können so einen wirklichen Mehrwert schaffen. Eine besondere Eigenschaft der Blockchain-Technologie ist die manipulationssichere Aufbewahrung von Daten in der verteilten Datenbank. In Kombination mit dem Ableiten eines digitalen Fingerabdrucks, also dem Hash einer Datei, wie z. B. einem Bild oder dem Kraft-Momenten-Log, erfolgt eine sichere Digitalisierung des Signierprozesses. Die Hashfunktion liefert eine einzigartige Kennzeichnung einer Datenmenge, die anstelle der Rohdaten in der Blockchain hinterlegt wird. Das hier integrierte Modul, basierend auf der IOTA-Technologie, ist eine disruptive Technologie zur Vernetzung von Industrie-4.0-Anlagen und bietet Möglichkeiten neuer Pay-per-Use-Geschäftsmodelle oder der Nachverfolgbarkeit von Produkten in einer Lieferkette.

Die Technologie wurde in dieser Arbeit zur Digitalisierung eines manuellen Signierprozesses eingebunden. Die während der Prozessausführung gesammelten Sensordaten werden in unternehmensinternen Datenbanken abgelegt. Gleichzeitig wird durch das Erstellen

eines digitalen Fingerabdrucks, der wiederum in der Blockchain hinterlegt wird, die Integrität der Daten sichergestellt. Werden die Qualitätsdaten zu einem späteren Zeitpunkt mit Zulieferern, OEMs oder den Behörden geteilt, kann zu jeder Zeit die Echtheit der Daten mithilfe des digitalen Fingerabdrucks, der unveränderlich in der Blockchain abgelegt ist, nachgewiesen werden.

6.5 Reflexion der Forschungsarbeit

Die Validierung soll mit einer kritischen Reflexion der Forschungsarbeit schließen, bevor die Zusammenfassung und der Ausblick der Arbeit erfolgt.

Die beschriebenen Methoden und entwickelten Konzepte sind für einen Nietprozess in der Flugzeugstrukturmontage geeignet und wurden anhand deren Randbedingungen validiert. Einzelne Konzepte sind allgemeingültig und können auf weitere Anwendungen angewandt und übertragen werden, wie z. B. die Qualitätsklassifikation mittels künstlicher Intelligenz oder die Qualitätsdokumentation mithilfe von blockchain-basierten Technologien. Die Übertragbarkeit der Forschung in die Praxis wird durch den engen Praxisbezug der Arbeit gewährleistet.

Dennoch gilt, selbst Neuentwicklungen haben Optimierungspotential und eröffnen etwaige neue Forschungsfelder. Nachfolgend werden die wichtigsten bekannten Verbesserungspotenziale aufgezeigt.

Mensch-Roboter-Kollaboration Grundsätzlich werden aufgrund der industrienahen Forschung, soweit möglich, Industriekomponenten im Forschungsdemonstrator verwendet. Das verwendete Robotersystem war zur Zeit des Demonstratoraufbaus noch nicht in einer MRK-zertifizierten Version verfügbar. Der Hersteller hat das verwendete System jedoch in der Zwischenzeit aktualisiert und Optimierungen hinsichtlich der Sicherheit für die Industrie nachgepflegt.

Aufgrund der Klassifikation als MRK kommt in dieser Anwendung das MRK-fähige Robotersystem UR10 vom Hersteller Universal Robots zum Einsatz. Mensch und Roboter sind prozessspezifisch aufgrund der metallischen Druckkalotte getrennt. Die ohnehin notwendige Arbeitsraumabsicherung mittels eines Laserscanners, stellt die Möglichkeit der Integration eines klassischen Industrieroboters in Aussicht. An dieser Stelle müsste ebenfalls eine zusätzliche Risikoanalyse durchgeführt werden, die aufzeigt, ob ein Industrieroboter bei einer fehlerhaften Ansteuerung durch die Druckkalotte dringen und so den Werker verletzten könnte.

Mensch-Technik-Interaktion Hinsichtlich der Implementierung verschiedenster Konsumerprodukte, die im Rahmen der MTI erprobt wurden, kommen Industriekomponenten wie eine SPS schnell an ihre Grenzen. Aus diesem Grund wurde ein serviceorientiertes und broker-basiertes Steuerungsystem aufgebaut. Die Softwarekomponenten wurden so standardisiert wie möglich implementiert, dennoch handelt es sich an dieser Stelle nicht um zertifizierte Softwaremodule. Gleiches gilt für die verwendeten Konsumerprodukte, wie der Smartwatch, der Mixed-Reality-Brille oder weiteren Smart Devices. Während die Geräte eine optimale Basis für eine schnelle Integration und Erprobung auf dem Forschungsboden liefern, sind Geräte wie die Mixed-Reality-Brille HoloLens von Microsoft aufgrund ihres noch hohen Gewichtes und ihrer teilweise geringen Batterielaufzeiten noch nicht für eine ganztägige Nutzung in der Industrie ausgelegt.

Künstliche Intelligenz Das entwickelte Künstliche Intelligenzmodell zeigt großes Potenzial für unterschiedlichste Bereiche in der Industrie. Besonders das entwickelte hybride Verfahren der Qualitätssicherung basierend auf KI- und deterministischen Algorithmen sollte als Standard gelten, denn immer noch können KI-Modelle als Black Box eingestuft werden. Durch den Einsatz von deterministischen Algorithmen sind KI-Modelle seitens der Industrie beherrschbarer.

In dieser Arbeit wurde ein Supervised-Learning-Modell basierend auf generierten Prozessdaten erstellt. Die gesammelten Daten wurden in einem aufwendigen manuellen Schritt beschriftet und anschließend für das Training des Modells verwendet.

Die Beschriftung von Daten in realen Anwendungen kann eine komplexe und zeitaufwändige Aufgabe sein, vor allem da die Qualität der Datenbeschriftungen einen großen Einfluss auf die Modellleistung hat. Es ist wichtig, die Daten fehlerfrei zu kennzeichnen.

Grundsätzlich eignet sich das Vorgehen gut für die Durchführung von Machbarkeitsstudien und das Sammeln von Erfahrungen, jedoch sollten Anwendungsfälle in der Industrie im Anschluss um eine Feedbackschleife erweitert werden. Das heißt am Beispiel einer binären Klassifizierung mit positiven und negativen Klassen: Wenn das erste Klassifikationsmodell trainiert wird, werden beschriftete Daten verwendet, die mithilfe von Heuristiken von Experten beschriftet wurden. Anhand dieser Daten wird durch den maschinellen Lernalgorithmus ein erstes Modell erzeugt. Dieses Modell kann zur Klassifikation eingesetzt werden. Nach der Inbetriebnahme können dem trainierten Modell neue oder unbekannte Daten vorgelegt werden, um eine Vorhersage bzw. Klassifikation zu erhalten. Basierend auf einem Schwellenwert kann eine Feedbackschleife erstellt werden, damit die neuen Daten automatisiert beschriftet werden. Die Feedbackschleife

sollte zudem über einen Mechanismus verfügen, der die neu beschrifteten Daten zur Absicherung einem Experten vorlegt. Aufgrund der Feedbackschleife kann in regelmäßigen Abständen ein neues Modell mit einer größeren Datenbasis trainiert werden, um die Genauigkeit des Gesamtmodells zu steigern.

Blockchain - DLT - DAG Das ausgewählte Blockchain-Framework IOTA, basierend auf der DAG-Technologie, ermöglicht Wertetransaktionen unter Verwendung des IOTA-Tokens/der Kryptowährung oder sogenannter Zero-value Transaktionen, d. h. des Sendens von Meta-Transaktionen. Letztere Transaktionen beinhalten keine Token, sondern einen Datenstream. Die Daten können dabei von beliebiger Natur sein. Die Daten können weiterhin in öffentlichen, privilegierten oder privaten Kanälen veröffentlicht werden.

In dieser Arbeit sieht das Konzept das Veröffentlichen von Hashes in privilegierten Kanälen zwischen Zulieferern und OEM vor. Während des Nietprozesses werden die Rohdaten in unternehmensinternen Datenbanken gespeichert. Gleichzeitig wird zur Sicherung der Datenintegrität der digitale Fingerabdruck in der Blockchain abgelegt. Werden in der Zukunft die originalen Datensätze, also der Kraft-Momenten-Verläufe oder die Daten der visuellen Prüfung aufgrund von Problemen mit einem Flugzeug seitens des OEMs oder anderen Parteien angefragt, können zum einen die Daten aus der unternehmensinternen Datenbank übermittelt werden und zum anderen die Datenintegrität mithilfe der Fingerabdrücke in der Blockchain validiert werden.

Im Rahmen dieses Proof of Concepts handelt es sich um eine erste Integration der Technologie in einem speziellen Anwendungsfall und steht somit am Anfang der Erprobungsphase. An dieser Stelle kann gesagt werden, dass die Digitalisierung eines Belegbuches mittels blockchain-basierter Technologien möglich ist, dies jedoch lediglich einen ersten Meilenstein darstellt.

Je nach Anwendungfall stellt sich die Frage nach dem Ort der Datenspeicherung. Es muss immer zwischen den Nutz- und den Overheaddaten unterschieden werden. Wie in der Konzeptentwicklung beschrieben, sollten die eigentlichen Nutzdaten immer in einer unternehmensinternen Datenbank vorgehalten werden, da diese die wertvollen Daten repräsentieren. Zur Erhöhung des Vertrauens und der Sicherung der Datenintegrität wird lediglich der Hash in der Blockchain hinterlegt, dies wird auch als On-chain-Datenverarbeitung bezeichnet. Weiterhin besteht die Möglichkeit der Veröffentlichung von Rohdaten in der Blockchain. Die Anforderungen müssen je nach Anwendung ausgelegt werden; bei einer unternehmensinternen Vorhaltung der Daten kann ebenfalls der Aufbau einer unternehmensinternen IT-Infrastruktur notwendig sein.

Gemein haben viele Blockchain-Frameworks, dass diese erst in einem Beta-Status vorliegen. Das IOTA-Projekt ist vielversprechend, jedoch unterscheidet es zwischen Softwaremodulen im Forschungs- und Entwicklungsstatus. Viele Softwaremodule, die sich in der Entwicklung befinden, liegen noch nicht in einer industrietauglichen und stabilen Version vor. Weiterhin führen die Hersteller und Betreiber teilweise sogenannte Snapshots der Blockchains durch. In diesem Fall werden die ältesten Abschnitte der Blockchain verworfen, um Ressourcen auf den Blockchainservern freizugeben. Bei industriellen Anwendungen, in denen bspw. die Datenintegrität über mehrere Jahre gewährleistet werden soll, muss an dieser Stelle auf Betreiber von sogenannten Permanodes zurückgegriffen werden. Diese halten die verschlüsselten Daten der Blockchain permanent vor. Ein Zugriff auf diese kann jedoch zukünftig gegebenenfalls Kosten verursachen.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung Die Vollautomatisierung in der Flugzeugproduktion bleibt aufgrund der komplexen Fügeprozesse eine Herausforderung und ist daher weitgehend durch manuelle Prozesse von geschulten Experten geprägt. Der Einsatz von MRK-fähigen-Robotersystemen stellt eine effektive Lösung zur Verbesserung der Produktion und Qualitätsabsicherung in der Sektionsmontage dar. Insbesondere das Ausführen von unergonomischen Tätigkeiten, wie das Positionieren des Ambosses in einer Überkopfhaltung in der Sektion 19, können so optimiert werden.

Der entwickelte MRK-Nietprozess wird in dem am ZeMA aufgebauten Demonstrator validiert. Die Station ist eine Nachbildung der Sektion 19 aus der Flugzeugsektionsmontage. Um die Einhaltung der strengen Toleranzen und Anforderungen der Flugzeugproduktion zu gewährleisten, wurde ein Laserliniensensor integriert, der die Messgenauigkeit bei der Bestimmung der Position der Löcher für den Nietvorgang erhöht. Weiterhin erfolgt die Nietlocherkennung durch Interpolation und Best-Fit-Methode zur Steigerung der Genauigkeit.

Für den anschließenden Nietvorgang wurde ein Gegenhaltewerkzeug für den Roboter entwickelt. Die Werkzeugparameter wurden identifiziert und in das Nietwerkzeug übertragen. Die Entwicklung des Nietwerkzeugs mit optimierten Parametern zur Minimierung von Kräften und Schwingungen senkt die durchschnittlichen Kräfte auf ca. 65 N. Im praktischen Vergleich können die Kräfte somit um ca. 50 % reduziert werden.

Die Integration eines Steuerungssystems und hochwertiger Bedienoberflächen erhöht die Akzeptanz des Bedieners im täglichen Einsatz. Darüber hinaus führt die Implementierung einer natürlichen und intuitiven MTI für teilautomatisierte Systeme dazu, dass die robotischen Betriebsmittel weniger als *Instrument*, sondern vielmehr als *Partner* für den Werker betrachtet werden. Dies ist eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Zusammenarbeit im Hybrid-Team und ermöglicht den Mitarbeitern eine effiziente Konfiguration der Station in der Montage.

Heutzutage muss der Mensch eine belastende, ermüdende und zeitaufwändige Inspektionsaufgabe manuell mithilfe spezieller Prüfkartenunterlagen durchführen. Aufgrund der hohen Anzahl von Nieten in Flugzeugen wird nicht jeder Niet auf Absplitterungen und korrekte Abmessungen überprüft, wie in den technischen Spezifikationen beschrieben. Es heißt, *Irren ist menschlich*; leider können in diesem Szenario schon kleine Fehler zu katastrophalen Ergebnissen führen. Während des Nietprozesses werden die Daten von verschiedenen Sensoren wie Laserliniensensor, Kamera und Kraft-Momenten-Sensor zur Online-Analyse mit KI-Methoden erfasst. Die gesammelten Daten werden durch einen überwachten Lernprozess geleitet, um das Modell des maschinellen Lernens zu erstellen. Anschließend wird dieses Modell zur Qualitätsanalyse im Rahmen des Nietprozesses eingesetzt. Schließlich wird Mixed Reality als Medium verwendet, um dem Werker die endgültigen Qualitätsergebnisse zu visualisieren.

Abschließend wird eine blockchain-basierte Technologie verwendet, um die Datenintegrität und das Vertrauen über Unternehmensgrenzen hinweg zu erhöhen und sicherheitskritische Informationen zwischen Zulieferern, Behörden und den OEMs auszutauschen. Die Nietprozesse in der Flugzeugbranche werden als sicherheitskritische und dokumentationspflichtige Bauteile angesehen. Aus diesem Grund erfolgt eine detaillierte Dokumentation, wer bspw. einen Montageprozess durchgeführt hat. Während der teilautomatisierten Ausführung des Nietprozesses wird neben einer Logdatei des Kraft-Momenten-Verlaufes ein Bild der Niet sowie dessen Abmessungen aufgezeichnet. Von diesen Sensordaten wird ein digitaler Fingerabdruck abgeleitet, der in einem privilegierten Kanal der Blockchain zwischen Zulieferer und OEM hinterlegt wird. Die Blockchain dient an dieser Stelle als manipulationssichere und verteilte Datenbank zur Steigerung der Datenintegrität und Sicherung des Vertrauens zwischen mehreren Parteien.

Die Aufgabenteilung nach den jeweiligen Fähigkeiten von Mensch und Roboter in Kombination mit teilautomatisierten Systemen stellt eine innovative Möglichkeit für neue Automatisierungsprozesse dar. Letzteres ist ein besonders vielversprechender Schritt, um Hochlohnländern zu helfen, wirtschaftlich wettbewerbsfähig zu bleiben.

Ausblick Die entwickelte teilautomatisierte Nietstation ist im aktuellen Stand fähig, Nietprozesse an Teilschalen oder dem Ringspant zwischen Druckkalotte und Sektionstonne durchzuführen. Die MTI erlaubt eine einfache und intuitive Konfiguration der Station. Algorithmen können bei der Qualitätssicherung den Menschen unterstützen, indem Sensordaten zur Bewertung der Qualität verwendet werden. Die anschließende Dokumentation kann mithilfe von blockchain-basierten Technologien durchgeführt werden.

Neuentwicklungen bieten Optimierungspotential und eröffnen gleichzeitig neue Felder für zukünftige Forschungstätigkeiten. Im Rahmen des Forschungsprojektes Robotix Academy erfolgt eine Verstetigung der Erkenntnisse aus dem Bereich Mensch-Roboter-Kollaboration und der Mensch-Technik-Interaktion. Weiterhin werden die MTI sowie Themen der künstlichen Intelligenz im Forschungsprojekt Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum Saarbrücken untergebracht. Die Blockchain-Thematiken zeigen lediglich einen Ausschnitt des Möglichen und bieten an dieser Stelle großes Potential in der Vernetzung von Maschinen, neuen Geschäftsmodellen und als Datenbasis für KI-Modelle.

Weiterführende Arbeiten beschäftigen sich mit dem Transfer der Nietstation auf den Industrieboden. Ziel ist die Implementierung und weiterführende Validierung der Konzeptionen in unterschiedlichen Bereichen der Flugzeugproduktion. Während die vorgestellten Entwicklungen die Montage der Sektion 19 fokussieren, erfolgt der Transfer auf Montageprozesse in der Rumpfmontage von Flugzeugen.

Literaturverzeichnis

[1] ElMaraghy, H. A.: *Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms.* International journal of flexible manufacturing systems 17, H. 4, S. 261-276, 2005.

[2] Müller, R., Vette, M., Quinders, S.: *Handhabung großer Bauteile zur Flugzeugmontage mittels eines Verbunds kinematischer Einheiten unterschiedlicher Struktur.* VDI-Tagung Bewegungstechnik, Aachen, VDI Verlag, S. 3-18, 2012.

[3] Anselm, Dieter: *Die PKW-Karosserie: Konstruktion, Deformationsverhalten, Unfallinstandsetzung.* Würzburg, Vogel, 1997, ISBN: 3802317068.

[4] Walla, Waldemar: *Standard- und Modulbasierte digitale Rohbauprozesskette. Frühzeitige Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforde-rungen im Karosserierohbau der Automobilindustrie.* Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015.

[5] Scholer, Matthias: *Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Automobilmontage mittels durchgängigem modularem Engineering -Am Beispiel der Mensch-Roboter-Kooperation in der Unterbodenmontage-.* Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2018, DOI: 10.22028/D291-27801.

[6] Hollenstein, Oliver: *Da liegt was in der Luft.* Hamburg, Zeit Online, 2018, URL: https://www.zeit.de/2018/25/airbus-produktion-roboter-auftraege/komplettansicht, zuletzt geprüft 01.11.2019.

[7] Huber, Walter: *Industrie 4.0 in der Automobilproduktion: Ein Praxisbuch.* Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016, DOI: 10.1007/978-3-658-12732-9.

[8] Krüger, J. and Lien, T. K. and Verl, A.: *Cooperation of human and machines in assembly lines.* CIRP Annals, Seite 628-646, 2009, DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.009.

[9] Lay, G.; Schirrmeister, E.: *Sackgasse Hochautomatisierung? Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion.* Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung. PI-Mitteilungen 22, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung -ISI-, Karlsruhe, 2001, URL: http://publica.fraunhofer.de/documents/N-5726.html, zuletzt geprüft 01.11.2019.

[10] Müller, R., Vette, M., Kanso, A. and Masiak, T.: *Collaboration in a Hybrid Team of Human and Robot for Improving Working Conditions in an Aircraft Riveting Process.* SAE Technical Paper, 2019, DOI: 10.4271/2019-01-137.

[11] Eiselin, Stefan: *Bis heute ist Flugzeugbau viel Handarbeit. Das will Airbus ändern. In Hangar 245 in Finkenwerder wird die Zukunft bereits Realität.* aeroTELEGRAPH, Zürich, 2019, URL: https://www.aerotelegraph.com/eroeffnung-hanga-245-automatiseirung-airbus-testet-in-hamburg-das-werk-der-zukunft, zuletzt geprüft: 07.10.19.

[12] Franke, Jörg: *Skriptum Industrie 4.0 für Ingenieure.* MHI Wissenschaftliche Gesellschaft Montage Handhabung Industrierobotik, 2019.

[13] Anggia, Ashri: *Manufacturing Economy. Secure Audit Trails in Distributed Manufacturing Supply Chains.* WZL RWTH Aachen, Aachen, 2018.

[14] Müller, R., Vette-Steinkamp, M., Masiak, T.: *Blockchain-basierte Qualitätsdokumentation befähigt eine Mensch-Roboter-Kollaboration in der Flugzeugproduktion.* handling, Darmstadt, WEKA BUSINESS MEDIEN GmbH, 2019, URL: https://www.handling.de/industriekommunikation/dokumentation-mit-ki-in-der-flugzeugproduktion.htm, zuletzt geprüft: 25.11.19.

[15] TS200-44: *Qualified Manufacturers for SAE ITC Aerospace Industry Standard Parts (AS, AGS and ESC Series).* SAE Industry Technologies Consortia, United States, 2017, URL: https://saemobilus.sae.org/content/TS200-44/, zuletzt geprüft: 23.09.19.

[16] Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller: *Lehrstuhl für Montagesysteme an der Universität des Saarlandes.* Saarbrücken, 2019, URL: https://www.uni-saarland.de/?id=56957, zuletzt geprüft 22.11.2019.

[17] VDI 2860: *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.* Verein Deutscher Ingenieure, 1990.

[18] VDI 2815: *Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung; Einführung, Grundlagen.* Verein Deutscher Ingenieure, 1978.

[19] Lotter, Bruno und Wiendahl, Hans-Peter: *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis.* Dordrecht, 2nd ed. VDI-Buch, Springer, 2012, ISBN: 3642290612.

[20] DIN 8593-0: *Fertigungsverfahren Fügen; Teil 0: Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe.* Deutsche Norm, 2003.

[21] Feldhusen, Jörg und Grote, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre; Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.* Berlin, Heidelberg, 8., vollst. überarb. Aufl. 2013, Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[22] DIN 8580: *Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung.* Deutsche Norm, 2003.

[23] Reithmaier, L. W., Sterkenburg, Ronald: *Standard aircraft handbook for mechanics and technicians.* New York, 7th ed., McGraw-Hill Education, 2014, ISBN: 0071826807.

[24] Wiendahl, Hans-Peter and Nyhuis, Peter and Reichardt, Jürgen: *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten.* München, 2. überarb. und erw. Aufl., Hanser, 2014, ISBN: 9783446438927.

[25] Nyhuis, Peter: *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten.* Garbsen, PZH, Produktionstechn. Zentrum, 2008, ISBN: 3939026964.

[26] Reinhart, Gunther und Zäh, Michael: *Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Montage.* Düsseldorf, wt Werkstattstechnik online, 2008.

[27] Cisek, Robert and Habicht, Christian and Neise, Patrick: *Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2002, DOI: 10.3139/104.100566.

[28] Wiendahl, H.-P., *Wandlungsfähigkeit. Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik.* Düsseldorf, wt Werkstattstechnik online, 2002.

[29] Corves, Burkhard, *Grundlagen der Maschinen- und Strukturdynamik.* Aachen, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, RWTH Aachen University, 2012, zuletzt geprüft: 18.05.2020.

[30] Ziegler, Wolfgang, *Handhabungs- und Montagetechnik.* Düsseldorf, Fachhochschule Düsseldorf, 2009, zuletzt geprüft 30.01.2019.

[31] DIN 8373: *Industrieroboter. Wörterbuch.* Deutsche Norm, 1994.

[32] Böge, A. (Hrsg.): *Handbuch Maschinenbau.* Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

[33] VDI 2861 Blatt 2: *Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter. Einsatzspezifische Kenngrößen.* Verein Deutscher Ingenieure, 1990.

[34] KUKA Aktiengesellschaft: Augsburg, Deutschland, 2019, URL: www.kuka.com, zuletzt geprüft 01.11.2019.

[35] Vette-Steinkamp, Matthias: *Rekonfigurierbares Robotersystem füur die Montage von flächigen Flugzeugstrukturbauteilen.* RWTH Aachen, Shaker Verlag GmbH, 2018.

[36] Müller, R. et al.: *Kinematik, Dynamik und Anwendungen in der Robotik.* Saarbrücken, ZeMA gGmbH - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik, 2019.

[37] Universal Robots A/S: Energivej 25, 5260 Odense, Dänemark, 2019, URL: https://www.universal-robots.com/, zuletzt geprüft 01.11.2019.

[38] VDI 2861 Blatt 1: *Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter. Achsbezeichnungen.* Verein Deutscher Ingenieure, 1990.

[39] Wüst, Klaus: *Grundlagen der Robotik.* Gießen, Skriptum Technische Hochschule Mittelhessen, 2004.

[40] Weber, Wolfgang: *Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung ; mit 33 Übungsaufgaben sowie einer begleitenden Internetseite.* München, Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2013, ISBN: 9783446410312.

[41] Craig, J. J.: *Introduction to Robotics: Mechanics and Control.* Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005, ISBN: 0133489795.

[42] Brillowski, Klaus: *Einführung in die Robotik: Auslegung und Steuerung serieller Roboter.* Aachen, Shaker Verlag, 2004, ISBN: 3-8322-3416-0.

[43] Denavit, S., Hartenberg, R.S.: *A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices.* Journal of applied mechanics 77, H. 2, S. 215-221, 1955.

[44] Weck, Manfred, Brecher, Christian: *Automatisierung von Maschinen und Anlagen.* Berlin, 6., neu bearb. Aufl., Springer, 2006, ISBN: 3-540-22507-2.

[45] Müller, R. et al.: *Innovative Produktionsassistenz für die Montage - Intelligente Werkerunterstützung bei der Montage von Großbauteilen in der Luftfahrt.* Düsseldorf, Springer, Werkstatt online, Heft 9, 2014.

[46] Thiemermann, Stefan: *Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter.* Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart, 2005.

[47] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: *Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration mit Assistenzrobotern.* Stuttgart, 2013, URL: https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/roboter–und-assistenzsysteme/montage-automatisierung/sichere-mensch-roboter-kollaboration-mit-assistenzrobotern.html, zuletzt geprüft 03.08.2019.

[48] Onnasch, L., Maier, X., and Jürgensohn, T.: *Mensch-Roboter-Interaktion - Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle.* Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2016, DOI = 10.21934/BAUA:FOKUS20160630.

[49] Balan, L., Bone, G.: *Real-time 3D Collision Avoidance Method for Safe Human and Robot Coexistence.* IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., IEEE, 2006: pp. 276–282, 2006.

[50] Flacco, F., Kroger, T., De Luca, A., Khatib, O.: *A depth space approach to human-robot collision avoidance.* Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom. pp. 338–345., 2012.

[51] Haddadin, S., Albu-Schaffer, A., De Luca, A., Hirzinger, G.: *Collision detection and reaction: A contribution to safe physical human-robot interaction.* IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS, IEEE: pp. 3356–3363, 2008.

[52] Antonopoulos, Andreas M., *Bitcoin und Blockchain - Grundlagen und Programmierung: Die Blockchain verstehen, Anwendungen entwickeln.* Heidelberg, 2. Auflage, O'Reilly, 2018, ISBN: 9783960090717.

[53] Bicchi, A., Bavaro, M., Boccadamo, G., De Carli, D., Filippini, R., Grioli, G., Piccigallo, M., Rosi, A., Schiavi, R., Soumen Sen, Tonietti, G.: *Physical human-robot interaction: Dependability, safety, and performance.* 10th IEEE Int. Work. Adv. Motion Control, IEEE: pp. 9–14, 2008.

[54] Müller, Rainer, Franke, Jörg, Henrich, Dominik, Kuhlenkötter, Bernd, Raatz, Annika, Verl, Alexander: *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration.* München, Hanser, ISBN: 9783446450165, 2019.

[55] Jacko, Julie A. and Sears, Andrew: *The human-computer interaction handbook: Fundamentals, evolving technologies and emerging applications.* Mahwah, Erlbaum, 2003, ISBN: 0805844686.

[56] Sheridan, T.: *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control.* MIT Press, Cambridge, MA, 1992.

[57] Beer, J., Fisk, A., Rogers, W.: *Toward a Framework for Levels of Robot Autonomy in Human-Robot Interaction.* Journal of Human-Robot Interaction, 3, 74–99, 2014.

[58] Yanco, H. A., Drury, J. L.: *A taxonomy for human-robot interaction.* AAAI Fall Symposium on Human-Robot Interaction, S. 111–119, 2002.

[59] Scholtz, Jean: *Human Robot Interactions: Creating Synergistic Cyber Forces.* AAAI Technical Report FS-02-03, 2005.

[60] Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK: Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH: *Mensch-Technik-Interaktion. Leitfaden für Hersteller und Anwender. Band 3.* Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin, 2013.

[61] McCarthy, John: *What is artificial intelligence?.* Stanford University, Stanford, 2007, URL: http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai.pdf, zuletzt geprüft 01.11.2019.

[62] Büst, René: *Daten sind das neue Öl.* Wirtschaftsinformatik & Management, Volume 5, Seite 40-46, 2013, DOI: 10.1365/s35764-013-0277-4.

[63] Denkena, Wiebke, *Daten sind das neue Öl? Lasst uns die richtigen Metaphern verwenden!.* Berlin, netzpolitik.org e. V., 2013, URL: https://netzpolitik.org/2018/daten-sind-das-neue-oel-lasst-uns-die-richtigen-metaphern-verwenden/, zuletzt geprüft: 19.09.19.

[64] Weber, M., Burchardt, A.: *Künstliche Intelligenz. Wirtschaftliche Bedeutung, gesellschaftliche Herausforderungen, menschliche Verantwortung.* DFKI, Bitkom e. V., 2017, URL: https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Entscheidungsunterstuetzung-mit-Kuenstlicher-Intelligenz.html, zuletzt geprüft 05.08.2019.

[65] Russell, S.J.; Norvig, P.: *Artificial intelligence. A modern approach. 3. edition. Global edition.* Upper Saddle River: Pearson, 2016, ISBN: 1292153962.

[66] Bellman, Richard: *An Introduction to artificial intelligence: Can computers think?.* San Francisco, Boyd & Fraser, 1978, ISBN: 0878350667.

[67] Haugeland, John: *Artificial Intelligence: The Very Idea.* MIT Press, 1985.

[68] Rich, Elaine, Knight, Kevin: *Artificial intelligence.* New York, McGraw-Hill, 1991, ISBN: 0071008942.

[69] Kurzweil, Ray: *The age of intelligent machines.* Cambridge; MIT Press, 1990, ISBN: 0262111217.

[70] Poole, D.,Mackworth, A. K., Goebel, R.: *Computational intelligence: A logical approach.* Oxford, Oxford University Press, 1998.

[71] Nilsson, Nils J.: *Artificial intelligence: A new synthesis.* San Francisco, Morgan Kaufmann, 1998, ISBN: 1558605355.

[72] Charniak, Eugene and McDermott, Drew V.: *Introduction to artificial intelligence.* Addison-Wesley, 1985, ISBN: 0201119455.

[73] Winston, Patrick Henry, *Artificial intelligence.* Addison-Wesley, 1992, ISBN: 0201533774.

[74] Craglia, M. (Ed.), Annoni, A., Benczur P., Bertoldi, P., Delipetrev, P., De Prato, G., Feijoo, C., Fernandez Macias, E., Gomez, E., Iglesias, M., Junklewitz, H., Lopez Cobo, M., Martens, B., Nascimento, S., Nativi, S., Polvora, A., Sanchez, I., Tolan, S., Tuomi, I., Vesnic Alujevic, L., *Artificial Intelligence: A European Perspective.* Luxembourg, 2018, DOI: 10.2760/11251.

[75] Samuel, Arthur L.: *Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers.* IBM Journal of Research and Development, 44:1.2, 1959.

[76] Mitchell, Tom Michael: *Machine learning.* New York, McGraw-Hill, McGraw-Hill series in computer science, 1997, ISBN: 0071154671.

[77] Chui, M., Kamalnath, V., Fernandes, R.: *An executive's guide to AI.* McKinsey, 2019, URL: https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-analytics/our-insights/an-executives-guide-to-ai, zuletzt geprüft 05.08.2019.

[78] Seemann, Jannis: *Machine Learning von A-Z: Lerne Python & R für Data Science!.* Udemy, 2019, URL: https://www.udemy.com/course/machine-learning-komplett/, zuletzt geprüft: 14.10.19.

[79] Kreutzer, Ralf T., Sirrenberg, Marie: *Künstliche Intelligenz verstehen.* Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2019, ISBN: 978-3-658-25560-2.

[80] LeCun, Y., Haffner, P., Bottou, L., Bengio, Y.: *Object recognition with gradient-based learning.* Shape, contour and grouping in computer vision (pp. 319-345). Springer, Berlin, Heidelberg, 1999.

[81] O'Shea, K., Nash, R.: *An Introduction to Convolutional Neural Networks.* ArXiv e-prints, Aberystwyth University, 2015.

[82] Y. LeCun, K. Kavukcuoglu, and C. Farabet: *Convolutional networks and applications in vision.* IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp. 253–256, Paris, France, 2010.

[83] Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hilton: *Deep Learning.* Nature 251, pages 436-444, May, 2015.

[84] Pöcheim, S.: *Convolutional Neural Networks.* Technische Universität München, 2017, URL: https://wiki.tum.de/display/lfdv/Convolutional+Neural+Networks, zuletzt geprüft 06.08.2019.

[85] Géron, Aurélien: *Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems.* O'Reilly Media Inc., 2017.

[86] Pöcheim, S.: *Layers of a Convolutional Neural Network.* Technische Universität München, 2017, URL: https://wiki.tum.de/display/lfdv/Layers+of+a+Convolutional+Neural+Network, zuletzt geprüft 06.08.2019.

[87] Friedman, J. H.: *Greedy function approximation: a gradientboosting machine.* Annals of Statistics, 29(5):1189–1232. Stanford University, 2001, URL: https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.aos/1013203451, zuletzt geprüft: 14.05.19.

[88] Nishida, Kan: *Introduction to Extreme Gradient Boosting in Exploratory.* Medium, 2017, URL: https://blog.exploratory.io/introduction-to-extreme-gradient-boosting-in-exploratory-7bbec554ac7, zuletzt geprüft 09.10.2019.

[89] *XGBoost Documentation*: 2019, URL: https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/tutorials/model.html, zuletzt geprüft 07.08.2019.

[90] Natarajan, H., Krause, S., Gradstein, H.: *Distributed ledger technology (DLT) and blockchain.* World Bank FinTech note No. 1, working paper, 2017.

[91] Elnaj, S.: *The Bitcoin hype and the potential disruptive power of blockchain technology.* 2018, URL: https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2018/02/06/the-bitcoin-hype-and-the-potential-disruptive-power-of-blockchain-technology, zuletzt geprüft: 13.09.19.

[92] Swan, M.: *Blockchain: blueprint for a new economy.* Sebastpol, CA: O'Reilly, 2015.

[93] Hosp, Julian: *Kryptowährungen: Bitcoin, Ethereum, Blockchain, ICOs & Co. einfach erklärt.* München, 2. Auflage, FinanzBuch Verlag, 2018, ISBN: 9783960922483.

[94] World Bank Group: *Distributed Ledger Technology (DLT) and Blockchain.* Washington, International Bank for Reconstruction and Development / the World Bank, FinTech Note No. 1, 2017.

[95] Fertig, Tobias und Schütz, Andreas: *Blockchain für Entwickler.* HAW Würzburg-Schweinfurt, Rheinwerk Computing, 2019, ISBN: 9783836263900.

[96] Iansiti, Marco, Lakhani, Karim R.: *The Truth About Blockchain: It will take years to transform business, but the journey begins now..* Harvard Business Review, 2017, URL: hbr.org/2017/01/the-truth-about-blockchain, zuletzt geprüft: 11.10.19.

[97] Masiak, Christian: *Financing SMEs and Entrepreneurial Opportunities: Firm- and Regional-Level Investigations from Europe.* Universität Trier, 2018, URL: https://tricat.uni-trier.de/permalink/f/1u344d2/TRI_ALEPH002309783, zuletzt geprüft: 26.11.19.

[98] Figueredo do Nascimento, S., Roque Mendes Polvora, A., Anderberg, A., Andonova, E., Bellia, M., Cales, L., Inamorato dos Santos, A., Kounelis, I., Nai Fovino, I., Petracco Giudici, M., Papanagiotou, E., Sobolewski, M., Rossetti, F., Spirito L.: *Blockchain Now And Tomorrow.* Publications Office of the European Union, 2019, DOI: 10.2760/901029, URL: https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/blockchain-now-and-tomorrow, zuletzt geprüft: 18.09.19.

[99] Back, Adam: *Hashcash- A Denial ofServiceCounter-Measure.* 2002, URL: http://www.hashcash.org/papers/hashcash.pdf, zuletzt geprüft: 15.10.19.

[100] Dominik Schiener, David Sønstebø & Serguei Popov: *Minimum weight magnitude. About proof of work.* IOTA Foundation, Berlin, 2019, URL: https://docs.iota.org/docs/dev-essentials/0.1/concepts/minimum-weight-magnitude, zuletzt geprüft: 15.10.19.

[101] Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht - BaFin: *Blockchain-Technologie.* Bonn, 2019, URL: https://www.bafin.de/DE/Aufsicht/FinTech/Blockchain/blockchain_node.html, zuletzt geprüft: 15.10.19.

[102] Blocher, Walter, Hanl, Andreas, Michaelis, Jochen: *Revolutionieren Kryptowährungen die Zahlungssysteme?.* Universität Magdeburg, Magdeburg, 2017, URL: https://www.uni-marburg.de/fb02/makro/forschung/magkspapers/paper_2017/48-2017_blocher.pdf, zuletzt geprüft: 15.10.19.

[103] Franco, Pedro: *Understanding Bitcoin.* Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd, 2014, ISBN = 9781119019138.

[104] Benčić, Federico Matteo and Žarko, Ivana Podnar: *Distributed Ledger Technology: Blockchain Compared to Directed Acyclic Graph.* University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, 2018, URL: http://arxiv.org/pdf/1804.10013v1, zuletzt geprüft: 02.11.19.

[105] d Dominik Schiener, David Sønstebø & Serguei Popov: *IOTA Foundation. What is IOTA?* IOTA Foundation, Berlin, 2019, URL: https://www.iota.org/get-started/what-is-iota, zuletzt geprüft: 17.09.19.

[106] The Cryptocurrency Consultant: *IOTA - Einführung Und Überblick: Technologie.* Medium, 2019, URL: https://medium.com/@thecryptoconsultant/iota-einführung-und-überblick-86ab712cf4ab, zuletzt geprüft: 17.09.19.

[107] Thornton, A.: *Variation Risk Management. Focusing Quality Improvements in Product Development and Production.* Hoboken, NJ: Wiley, 2004.

[108] Schleich, B. and Wartzack, S.: *Tolerance Analysis of Rotating Mechanism Based on Skin Model Shapes in Discrete Geometry.* Procedia CIRP 27, p. 10–15, 2015, DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.036.

[109] Müller, R., Esser, M. and Janssen, Ch.: *Umfassendes Toleranzmanagement. Eine Notwendigkeit für wirtschaftliche Montageprozesse.* wt Werkstattstechnik online 99 (9), p. 632–636, 2009.

[110] Whitney, D.: *Mechanical Assemblies. Their Design, Manufacture, and Role in Product Development.* New York, Oxford University Press, 2004.

[111] Tillmann, M.: *Innovative Prozesskettenoptimierung (IPO).* Aachen, Apprimus-Verlag, 2009.

[112] Krogstie, L., Walter, M., Wartzack, S. and Martinsen K.: *Towards a more Comprehensive Understanding of Tolerance Engineering Research Importance.* Procedia CIRP 27, p. 29–34, 2015, DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.039.

[113] Engmann, Klaus: *Technologie des Flugzeuges.* Würzburg, Vogel Fachbuch, 2015, ISBN = 978-3-8343-3304-9.

[114] Müller, R., Vette, M., Geenen, A., and Masiak, T.: *Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process.* SAE Technical Paper, 2017, DOI: doi.org/10.4271/2017-01-2096.

[115] AIRBUS S.A.S.: Toulouse, www.airbus.com, zuletzt geprüft 01.11.2019.

[116] Premium Aerotec GmbH: Augsburg, www.premium-aerotec.com, zuletzt geprüft 01.11.2019.

[117] Federal Aviation Administration: *AMT Airframe Handbook: The Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe (FAA-H-8083-31).* Oklahoma, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017, ISBN: 9781548241834.

[118] Wittel, Herbert and Muhs, Dieter and Jannasch, Dieter and Voßiek, Joachim: *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung.* Wiesbaden, 22., überarb. und erw. Aufl., Springer Verlag, 2015, DOI: 10.1007/978-3-658-09082-1.

[119] Atlas Copco Tools Central Europe GmbH: *Industrial Tools & Solutions - Produkte Werkzeuge zur Materialabtragung - Stanzniete und Stanzniettechnologie.* Essen, 2019, URL: www.atlascopco.com, zuletzt geprüft: 18.09.19.

[120] AIRBUS S.A.S.: Installation of Solid Aluminum Rivets, Process Specification, 80-T-34-5814. Augsburg, 2008.

[121] AZO Materials: *Aluminum 2017 Alloy (UNS A92017).* AZoNetwork UK Ltd., United Kingdom, 2013, URL: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8721, zuletzt geprüft: 01.10.19.

[122] AIRBUS S.A.S.: *Airbus eröffnet neue A320-Strukturmontagelinie in Hamburg.* Hamburg, 2019, URL: https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/de/2019/10/airbus-inaugurates-new-a320-structure-assembly-line-in-hamburg.html, zuletzt geprüft 01.10.2019.

[123] Neugebauer, L.: *Pulse Motion Line.* SAE Technical Paper, 2011, DOI: doi.org/10.4271/2011-01-2609.

[124] KUKA Aktiengesellschaft: Augsburg, Deutschland, 2014, URL: https://www.kuka.com/fr-be/presse/nouvelles/2014/09/kuka-systems-develops-robotic-riveting-system-for-boeing-777, zuletzt geprüft 18.09.2019.

[125] Golem Media GmbH: Boeing entfernt Montageroboter aus der Produktion der 777. Berlin, 2019, URL: https://www.golem.de/news/automatisierung-boeing-entfert-montageroboter-aus-der-produktion-der-777-1911-145056.html, zuletzt geprüft 22.11.2019.

[126] VDI 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.* Verein Deutscher Ingenieure, 2004.

[127] Müller, R., Vette, M., Geenen, A., Kanso, A., Masiak, T.: *Development of a Human-Robot-Collaboration System using the Example of a Riveting Process in Aircraft Assembly.* Journal of Robotics and Automation, 2018, URL: https://scholarlypages.org/Articles/robotics/jra-2-009.pdf.

[128] Müller, Rainer, Vette-Steinkamp, Matthias, Kanso, Ali: *Comparison of practically applicable mathematical descriptions of orientation and rotation in the three-dimensional Euclidean space.* Berlin, Springer Vieweg, 2018, ISBN: 978-3-662-56714-2.

[129] Müller, R., Vette, M., Kanso, A. and Masiak, T.: *Position and Orientation Calibration of a 2D Laser Line Sensor using Closed-form least-squares solution.* IFAC, Berlin, 2019.

[130] Open Source Robotics Foundation, Inc.: *Robot Operating System (ROS)* 2019, URL: https://www.ros.org/, zuletzt geprüft 01.11.2019.

[131] Müller, R., Esser, M., Mbarek, T., Biyiklioglu, N.: *Development of Modular Low Cost Automation Systems for Aircraft Assembly.* SAE Technical Paper, 2011, DOI: doi.org/10.4271/2017-01-2096.

[132] Deiterding, J., Henrich, D.: *Spezialisten überflüssig - Die Sensorik Integration.* Computer & AUTOMATION - Fachmagazin der Fertigungs- und Prozesstechnik, 2009.

[133] Müller, R., Vette, M., Geenen, A.: *Teilautomatisierter Roboterschweißplatz für die Einzelteilfertigung (TRSE).* Saarbrücken, ZeMA gGmbH, 2017, URL: http://www.zema.de/de/trse/, zuletzt geprüft 01.06.2017.

[134] Müller, R., Vette, M., Geenen, A.: *Potentials of Human-Robot-Cooperation in Aircraft Assembly Systems / New possible applications of a human-robot-cooperation in aircraft production by the example of shell structure assembly.* SAE Technical Paper, 2015, DOI: 10.4271/2015-01-2507.

[135] Hehenberger, Peter: *Computerunterstützte Fertigung: Eine kompakte Einführung.* Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, ISBN = 9783642134746.

[136] Harry M., Schroeder R.: *Six Sigma – Prozesse optimieren, Null-Fehler-Qualität schaffen, Rendite radikal steigern.* Frankfurt/Main, Campus Verlag, 2000.

[137] Magnusson K., Kroslid D., Bergmann B.: *Six Sigma – Umsetzen. Die neue Qualitätsstrategie für Unternehmen.* München Wien, Carl Hanser Verlag, 2001.

[138] Wappis, Johann, Jung, Berndt: *Null-Fehler-Management: Umsetzung von Six Sigma.* München Wien, 6. überarbeitete Auflage, Hanser, 2019, ISBN = 9783446458758.

[139] Eilers, Jan: *Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme.* Aachen, Techn. Hochsch., Apprimus-Verlag, 2015, ISBN: 9783863592950.

[140] Göpfert, Jan: *Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation.* Wiesbaden, Deutscher Universitätsverlag, 1998, ISBN: 3-8244-6827-1.

[141] DIN EN 61131-3:2014-06: *Speicherprogrammierbare Steuerungen_- Teil_3: Programmiersprachen (IEC_61131-3:2013); Deutsche Fassung EN_61131-3:2013.* Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2014, DOI: 10.31030/2101412.

[142] Müller, R., Scholer, M., Margies, L.:: *Modular configuration and reconfiguration concept for the implementation of adaptable processes in human-robot-cooperation.* Luxemburg, Robotix-Academy Conference for Industrial Robotics, 2018.

[143] Erl, T.: *Service-oriented architecture: concepts, technology, and design.* Upper Saddler River, N.J.: Prentice Hall, 2005.

[144] Abel, Michael: *Automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen mit serviceorientierten Paradigmen.* Stuttgart, Fraunhofer Verlag, 2017, ISBN: 978-3-8396-1133-3.

[145] Oberle, D.: *How ontologies benefit enterprise applications.* Semantic Web Journal, 2013, DOI: 10.3233/SW-130114.

[146] Masak, D.: *Der Architekturreview. Vorgehensweise, Konzepte und Praktiken.* Berlin, Springer, 2010.

[147] MQTT Community: 2019, URL: https://github.com/mqtt/mqtt.github.io, zuletzt geprüft: 25.09.19.

[148] Riedel, Martin: *Flexible Bauteilhandhabung auf Basis einer rekonfigurierbaren parallelkinematischen Struktur.* Aachen, Shaker, 2014, ISBN: 9783844025347.

[149] Müller, R., Vette, M., Schirmer, L. and Masiak, T.: *Tolerance Management in a Semi-Automated and Collaborative Human-Robot Aircraft Riveting Process.* SAE Technical Paper, 2019, DOI: 10.4271/2019-01-1373.

[150] Gusenburger, Christian T.: *Entwicklung eines modularen Nietprozesswerkzeuges für die Mensch-Roboter-Kollaboration am Beispiel der Flugzeugsektionsmontage.* Saarbrücken, Universität des Saarlandes, 2017.

[151] Nyquist, Harry: *Certain Topics in Telegraph Transmission Theory.* Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Vol. 47, ISSN 0096-3860, S. 617–644, 1928.

[152] Müller, R., Vette, Masiak, T., Duppe, B., Schulz, A: *Intelligent Real Time Inspection of Rivet Quality supported by Human-Robot-Collaboration.* SAE Technical Paper, 2019, DOI: doi.org/10.4271/2019-01-1886.

[153] Paul Handy: *Introducing Masked Authenticated Messaging.* IOTA Foundation, Berlin, 2019, URL: https://blog.iota.org/introducing-masked-authenticated-messaging-e55c1822d50e, zuletzt geprüft: 23.09.19.

[154] Hwang, R., et al.: *An Intelligent Quality Inspection Sytem for the Riveting Process.* International Journal of Engineering Innovations and Research, Volume 3, Issue 1, 2014, ISSN 2277-5668.

[155] Zhang, Z., Jiang, J., Liu, X., Lau, R., Wang, H., and Zhang, R.: *A Real Time Hybrid Pattern Matching Scheme for Stock Time Series.* Proceedings of the Twenty-First Australasian Conference on Database Technologies - Volume 104, ADC, Brisbane, Australia, 2010.

[156] Tianqi, C., Guestrin, C.: *Xgboost: A scalable tree boosting system.* Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining, ACM, 2016.

[157] Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G. E.: *Imagenet classification with deep convolutional neural networks.* Advances in neural information processing systems, pp. 1097-1105, 2012.

[158] Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., and Fei-Fei, L.: *Imagenet: A large-scale hierarchical image database.* CVPR, 2009.

Appendix A

Anhang

A.1 Zusätzliche Abbildungen

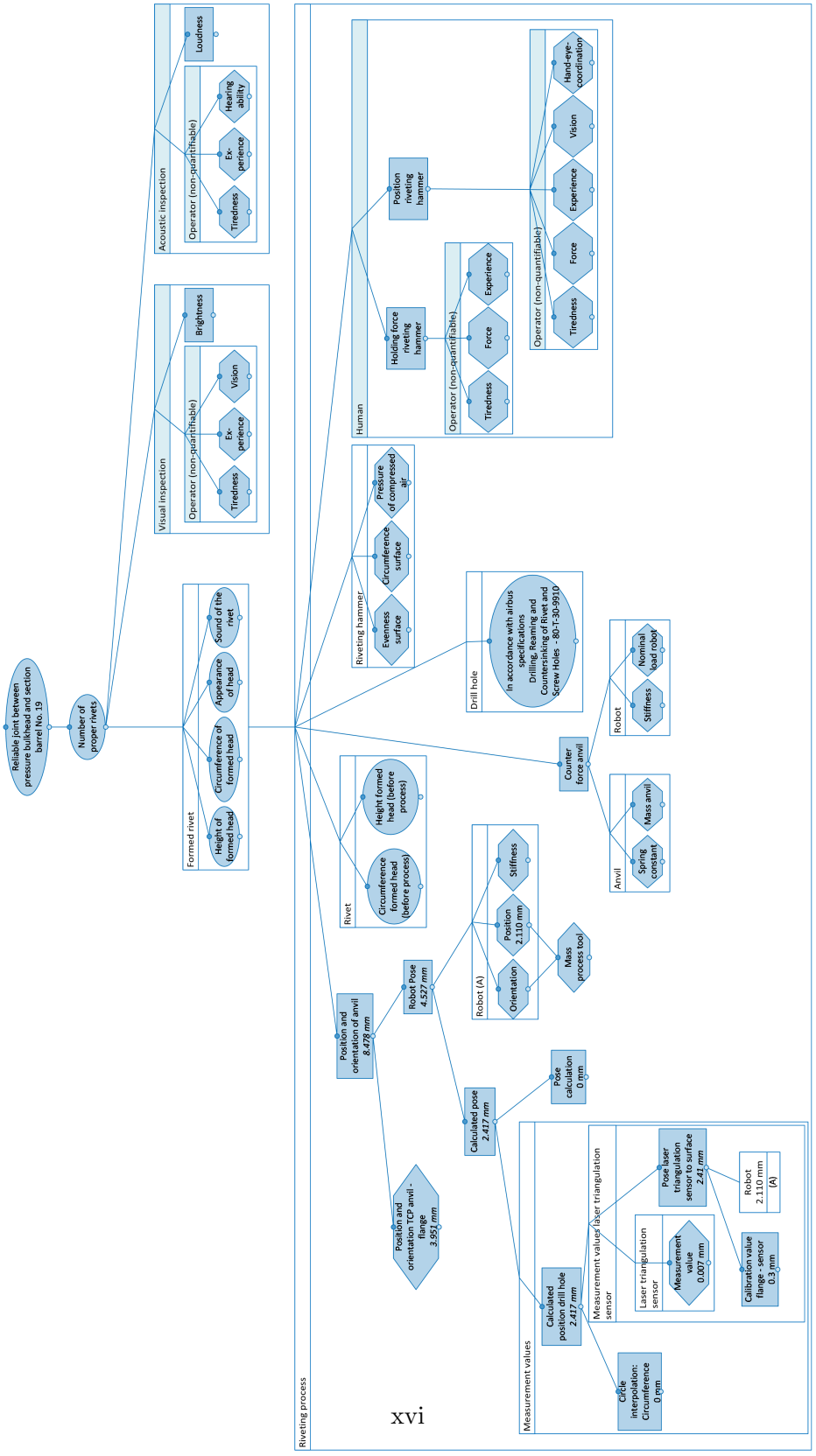


Abbildung A.1: Abbildung aller MEB-Module des Nietprozesses [149]

A.2 Veröffentlichungen

1. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Vette M.Eng.; Aaron Geenen M.Eng.; Tobias Masiak M.Eng., Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process, DOI: 10.4271/2017-01-2096, SAE Technical Paper, 2017.

2. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Vette-Steinkamp M.Eng.; Aaron Geenen M.Eng.; Tobias Masiak M.Eng.; Ali Kanso M.Sc.; Methodology for design of mechatronic robotic manipulators based on suitability for modern application scenarios, IFAC, 2017.

3. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Tobias Masiak M.Eng., Development of a mechatronic construction kit for a safe Human-Robot-Collaboration, VDI-Kongress Baden-Baden AUTOMATION, 2017.

4. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Vette-Steinkamp M.Eng.; Tobias Masiak M.Eng., Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process, Roboterinnovationen für die Produktion der Zukunft, Technologie Centrum Westbayern GmbH, 2018.

5. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Vette-Steinkamp M.Eng.; Tobias Masiak M.Eng.; A. Kanso; Methodology for design of reconfigurable robot systems based on suitability for modern application scenarios. 4. IFToMM D-A-CH Konferenz, Lausanne, 2018.

6. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Vette-Steinkamp M.Eng.; Aaron Geenen M.Eng.; Ali Kanso M.Sc.; Tobias Masiak M.Eng.; Development of a Human-Robot-Collaboration System using the Example of a Riveting Process in Aircraft Assembly; Journal of Robotics and Automation; 2018.

7. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dr.-Ing. Matthias Vette-Steinkamp; Ali Kanso M.Sc.; Tobias Masiak M.Eng.; Position and Orientation Calibration of a 2D Laser Line Sensor using Closed-form least-squares solution; IFAC; 2019.

8. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Vette-Steinkamp M.Eng.; Ali Kanso M.Sc.; Tobias Masiak M.Eng.; Kalibriermethode eines zwei dimensionalen Laserliniensensor zum flexiblen und intuitiven Einmessen in robotergestützten Anwendungen; VDI Mechatronik, Paderborn, 2019.

9. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller et. al; Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration; Hanser Fachbuch, München, ISBN: 978-3-446-45016-5; http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45016-5, 2019.

10. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Vette-Steinkamp M.Eng.; Ali Kanso M.Sc.; Tobias Masiak M.Eng.; Collaboration in a Hybrid Team of Human and Robot for Improving Working Conditions in an Aircraft Riveting Process, SAE Technical Paper, 2019.

11. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Vette-Steinkamp M.Eng.; Tobias Masiak M.Eng.; Benjamin Duppe M.Sc.; Albert Schulz M.Sc.; Intelligent Real Time Inspection of Rivet Quality supported by Human-Robot-Collaboration, SAE Technical Paper, 2019.

12. Christian, Masiak; Jörn H., Block; Tobias, Masiak; Matthias, Neuenkirch; Katja N., Pielen; Initial Coin Offerings (ICOs): Market Cycles and Relationship with Bitcoin and Ether, Small Business Economics, https://doi.org/10.1007/s11187-019-00176-3, (2019).

13. Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller; Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Vette-Steinkamp M.Eng.; Tobias Masiak M.Eng.; Blockchain-basierte Qualitätsdokumentation befähigt eine Mensch-Roboter-Kollaboration in der Flugzeugproduktion, handling, Darmstadt, WEKA BUSINESS MEDIEN GmbH. (2019).

A.3 Betreute Abschlussarbeiten

Christian Gusenburger, Master Thesis: Entwicklung eines modularen Nietprozesswerkzeugs für die Mensch-Roboter-Kollaboration am Beispiel der Flugzeugsektionsmontage, Universität des Saarlandes, ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Eschberger Weg 46, Gewerbepark, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2017.

Daniel Mayer, Master Thesis: Konfiguration einer MRK-fähigen Nietstation im Rahmen der intuitiven Bedienmethode, Hochschule Trier, ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Eschberger Weg 46, Gewerbepark, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2017.

Sascha Vosseler, Forschungs- und Entwicklungsarbeit: Validierung einer Methode zur Darstellung von Merkmalen am Beispiel der Bewertung des Optimierungspotentials eines MRK-Aufbaus, htw saar, ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Eschberger Weg 46, Gewerbepark, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2018.

El Khansa Rekik, Human-robot collaboration planning, Universität des Saarlandes, ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Eschberger Weg 46, Gewerbepark, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2017. 2019.

Aditya Gulati, Automated Intelligent Real Time Inspection of Rivet Quality, Universität des Saarlandes, ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Eschberger Weg 46, Gewerbepark, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2019.