

Sensorisch-kognitives Assistenzsystem für Prüfprozesse an Großbauteilen in der Flugzeugproduktion

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation (Monografie)

von
Julian Koch

aus
Saarbrücken

2026

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl
Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 02.12.2025

Chaos & Liebe

Danksagung

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Flugzeug-Produktionstechnik an der Technischen Universität Hamburg und wurde durch viele Menschen unterstützt und begleitet, denen ich an dieser Stelle herzlich danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl, für die wertvolle fachliche Begleitung, die stets offene Tür und das entgegengebrachte Vertrauen während der gesamten Promotionszeit. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller, der als Zweitprüfer fungierte und bei dem ich am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik meine wissenschaftliche Laufbahn begann. Meinen Dank richte ich auch an Prof. Dr.-Ing. Jan Dege für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein großer Dank geht an meine Kolleginnen und Kollegen am Institut für die zahlreichen spannenden und inspirierenden Diskussionen, die diese Zeit fachlich wie menschlich bereichert haben – insbesondere an Keno, Arne, Daniel, Jil, Henrik und Tino. Unserem OBERINGENIEUR Martin danke ich herzlich für seine vielfältige und stets verlässliche Unterstützung in allen Belangen.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch all den Studierenden, die sowohl zum Erfolg dieser Arbeit als auch zu dem der begleitenden Projekte beigetragen haben – viele von ihnen haben mich über Jahre hinweg begleitet. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle: Christopher, Kolja, Lars, Jeswin, Denis, Rohat, San, Hendrik und Gerald.

Ein ganz besonderer Dank geht an Daniel Breinig, der während meiner Zeit bei ZF Friedrichshafen den entscheidenden Impuls gegeben hat, eine Promotion überhaupt in Erwägung zu ziehen – ohne diesen Anstoß hätte ich diesen Weg vielleicht nie eingeschlagen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freund:innen für ihre moralische Unterstützung und den Rückhalt in herausfordernden Phasen. Ganz besonders danke ich denjenigen, die durch das Korrekturlesen und die Prüfung von Rechtschreibung und Stil geholfen haben, die Lesbarkeit und Verständlichkeit dieser Arbeit erheblich zu verbessern. An erster Stelle möchte ich hier Marc nennen sowie Sabrina & Elsa, Maike, Franzi, Denise, Pauline, Suna, Daniel und nochmals Keno.

Allen Genannten (und den vielen Ungenannten) gilt mein tief empfundener Dank.

Kurzfassung

Die industrielle Produktion sieht sich mit Herausforderungen wie dem demografischen Wandel, dem Fachkräftemangel und dem globalen Wettbewerbsdruck konfrontiert. Assistenzsysteme bieten das Potenzial, diesen Herausforderungen zu begegnen, indem sie menschliche Fähigkeiten unterstützen und die Effizienz sowie die Qualität manueller Prozesse steigern. Der Fokus bisheriger Lösungen liegt jedoch primär auf Montageprozessen kleinskaliger Produkte, während aufwendige, sicherheitskritische Prüfprozesse an Großbauteilen, wie sie beispielsweise in der Flugzeugproduktion vorherrschen, vernachlässigt werden. Dieses Defizit an geeigneten, auf den Menschen zentrierten Assistenzlösungen für dieses Anwendungsfeld wird im Rahmen dieser Arbeit adressiert.

Dazu wird zunächst eine detaillierte Analyse des Nutzungskontextes durchgeführt. Die Untersuchung der spezifischen Rahmenbedingungen und Herausforderungen manueller Prüfprozesse bildet die Grundlage für die Entwicklung von Lösungsmodulen. Diese schließen gezielt identifizierte wissenschaftliche Lücken und beheben die praktischen Defizite der Anwendungsdomäne.

Das Modul zur Erfassung von Oberflächendefekten für die Sichtprüfung behebt das Defizit, dass es bisher sowohl an Studien zur Eignung von Basistechnologien als auch an digitalen Dokumentationswerkzeugen mangelt. Der Lösungsansatz umfasst vergleichende Studien zur Bewertung von AR-Brillen und Tablets. Aufbauend darauf wird eine Tablet-Applikation entwickelt, die eine markerbasierte 3D-Defektlokalisierung mit einer KI-gestützten Segmentierung mittels Vision Foundation-Modellen kombiniert. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass sich Tablets für die Dokumentation in der Sichtprüfung als gebrauchstauglicher erweisen als AR-Brillen. Zudem wird gezeigt, dass sich durch den Einsatz von Vision Foundation Modellen eine sehr gute Segmentierungsqualität und Reproduzierbarkeit erreichen lassen und die 3D-Defektlokalisierung eine ausreichende Genauigkeit gewährleistet.

Das Modul für ein modulares, multi-modales Tool Tracking begegnet dem Defizit, dass für das Tool Tracking bisher weder eine strukturierte Vorgehensweise noch Applikationen existieren, die den Einfluss von Okklusionen berücksichtigen. Der Lösungsansatz besteht in der Vorstellung einer Methode zur systematischen Entwicklung von Tool Tracking-Applikationen. Auf dieser Grundlage wird eine Anwendung konzipiert, die u.a. ein VIO-Verfahren (Visual-Inertial Odometry) als Inside-Out-Tracking mit einer Methode zur aktiven Driftreduzierung kombiniert. So können dynamische Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Die Untersuchungen

des Systems zeigen, dass das VIO-Verfahren grundsätzlich für das Tool Tracking anwendbar ist. Um jedoch in großen, okklusionsbehafteten Arbeitsumgebungen eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen, ist eine aktive Driftreduzierung notwendig.

Das Modul zur in-situ Projektion von Prüfinformationen schließt die Lücke, dass für projektionsbasierte Assistenzsysteme in der Anwendungsdomäne bisher die Gestaltungsgrundlagen und Studien zur Projektionsgenauigkeit in großen Arbeitsumgebungen fehlen. Der Lösungsansatz umfasst die Definition relevanter Prüfinformationen sowie die Qualifizierung von Lichtprojektoren als geeignetes Ausgabegerät. Hierzu werden neuartige Steuerungs- und Kalibrierungsfunktionen für deren Einsatz an Großbauteilen entwickelt und eine systematische Quantifizierung von Projektionsgenauigkeiten und Fehlerquellen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass Lichtprojektoren eine kostengünstige Alternative darstellen und für viele Anwendungsfälle kompetitive Genauigkeitskennzahlen liefern.

Die in dieser Arbeit erarbeiteten und evaluierten Lösungskomponenten befähigen Assistenzsysteme, Prüfprozesse in der Flugzeugproduktion erstmals wirksam zu unterstützen. Dadurch wird ihr Anwendungsfeld auf eine bisher vernachlässigte, industriell hochrelevante Domäne erweitert.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation: Assistenzsysteme als Chance für Marktveränderungen	1
1.2 Problemstellung: Die Grenzen der Einsetzbarkeit von industriellen Assistenzsystemen	4
1.3 Rahmenbedingungen der Flugzeugproduktion	6
1.4 Ableitung der übergeordneten Zielsetzung	11
2 Stand der Wissenschaft	15
2.1 Grundlagen des Betrachtungsbereichs	15
2.1.1 Prüfprozesse im Wertschöpfungsprozess	16
2.1.2 Assistenzsysteme im industriellen Kontext	28
2.2 Stand der Forschung	43
2.2.1 Aktuelle Forschungsrichtungen und Identifikation des relevanten Fokus	43
2.2.2 Das Human Activity Assistive Technology-Modell	45
2.2.3 Analyse des Forschungsstandes	50
2.2.4 Detaillierung der Zielsetzung und Ableitung der Vorgehensweise	78
3 Analyse: Verstehen und Festlegen des Nutzungskontexts	89
3.1 Analyse von Produkten, Prozessen und Ressourcen	90
3.1.1 Produkte	91
3.1.2 Prozesse	95
3.1.3 Betriebsmittel	97
3.1.4 Prüfpersonal	98
3.2 Ableitung eines Datenmodells	99

3.3	Unterstützungsbedarf und Nutzungsprofil in der manuellen Prüfung	101
3.3.1	Unterstützungsbedarf: Prozessschwachstellen der manuellen Prüfung	101
3.3.2	Implikationen des Nutzungsprofils auf den Entwicklungsprozess	104
4	Entwicklung des Informationseingabemoduls für die Sichtprüfung mit Fokus auf Oberflächendefekten	107
4.1	Festlegen der Nutzungsanforderungen	108
4.1.1	Definition eines Referenzprozesses	108
4.1.2	Ableitung von Anforderungen und Festlegung von Evaluierungsmethoden	111
4.2	Entwicklung der ersten Systemiterationen	115
4.2.1	Entwicklung der Tabletapplikation	116
4.2.2	Entwicklung der AR-Applikation	117
4.3	Komparative und formative Evaluation von AR-Brille und Tablet	119
4.3.1	Versuchsaufbau	120
4.3.2	Versuchsdurchführung und -ergebnisse	120
4.4	Entwicklung der zweiten Systemiteration	125
4.4.1	Markerbasierte 3D-Defektlokalisierung	127
4.4.2	Zero-Shot Segmentierung mit Vision Foundation Modellen	133
4.5	Komparative und summative Evaluierung der zweiten Systemiteration	141
4.5.1	Genauigkeitsevaluierung der Defektlokalisierung	141
4.5.2	Gebrauchstauglichkeits- und Arbeitsbelastungsevaluierung	145
4.5.3	Effizienz-, Segmentierungsqualitäts- und Reproduzierbarkeitsevaluierung	150
4.6	Zusammenfassung, Diskussion und Einordnung der Ergebnisse	153
5	Entwicklung des Umwelterfassungsmoduls für das modulare, multi-modale Prüfmitteltracking	159
5.1	Festlegen der Nutzungsanforderungen	160
5.1.1	Definition eines Referenzprozesses	160
5.1.2	Ableitung von Anforderungen und Festlegung von Evaluierungsmethoden	161
5.2	Entwicklung eines modularen, multi-modalen Tool Trackings	163
5.2.1	Anwendungsfallspezifische Prozesse	166
5.2.2	Sensorspezifische Prozesse	169

5.2.3	Prozesse des Tool Trackings	175
5.2.4	Umsetzung der Tool Tracking-Applikation	180
5.3	Evaluierung der Genauigkeiten	186
5.3.1	Versuchsaufbau	186
5.3.2	Versuchsdurchführung und -ergebnisse	189
5.4	Zusammenfassung, Diskussion und Einordnung der Ergebnisse . .	196
6	Entwicklung des Informationsausgabemoduls für die in-situ Projektion von Prüfinformationen	203
6.1	Festlegen der Nutzungsanforderungen	204
6.1.1	Definition eines Referenzprozesses	204
6.1.2	Ableitung von Anforderungen und Festlegung von Evaluierungsmethoden	204
6.2	Entwicklung von Steuerungs- und Kalibrierungsfunktionen	207
6.2.1	Entwicklung der Steuerungsfunktionen	209
6.2.2	Entwicklung der Kalibrierungsfunktion	214
6.3	Evaluierung von Fehlerquellen und Genauigkeiten bei der Projektion	230
6.3.1	Erfassen der Referenzpunkte und Aufnahme der Pan- und Tiltwerte	232
6.3.2	Mechanische Grenzwerte	233
6.3.3	Algorithmische Genauigkeit des gewählten Kalibrierungsansatzes	237
6.3.4	Praktische Evaluierung	240
6.4	Zusammenfassung, Diskussion und Einordnung der Ergebnisse . .	242
7	Zusammenfassung, Einordnung im Forschungsfeld und Ausblick	247
7.1	Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse im Forschungsfeld	247
7.1.1	Systematische Erschließung der Anwendungsdomäne als Wissensfundament	247
7.1.2	Technologische Beiträge und Impulse für die Assistenzsystemforschung	249
7.1.3	Bedeutung für gesellschaftliche und marktbedingte Wandlungstreiber	252
7.2	Ausblick	255
	Literatur	261
A	Anhang	311

A.1	Anhang zu Kapitel 4	311
A.1.1	Zusätzliche Veranschaulichungen	311
A.1.2	Evaluierungsdaten	313
A.2	Anhang zu Kapitel 5	316
A.2.1	Darstellung des Prüfmittels und des Versuchskörpers	316
A.2.2	Versuche zur Sensorcharakterisierung der mobilen Kamera	317
A.2.3	Ergebnisse der Genauigkeitsevaluierung	320
A.3	Anhang zu Kapitel 6	321
A.3.1	Aufbau und Kommunikation von kopfbewegten Lichtprojektoren	321
A.3.2	Beschreibung des verwendeten Moving Head Spots und der Schnittstelle	323
A.3.3	Evaluierungsdaten	326
A.4	Anhang zu Kapitel 7	328
A.4.1	Zusätzliche Veranschaulichungen	328

Abkürzungsverzeichnis

AM	ArUco Marker
API	Application Programming Interface
APQP	Advanced Product Quality Planning
APU	Auxiliary Power Unit
AR	Augmented Reality
ARSQ	Augmented Reality Sickness Questionnaire
ATL	AprilTag-Lokalisierung
BOM	Bill of Materials
BPMN	Business Process Model and Notation
CAQ	Computer-Aided Quality
CLIP	Contrastive Language–Image Pre-training
CLT	Cognitive Load Theory
CNN	Convolutional Neural Network
CPS	Cyber-Physischer Systeme
DIN	Deutschen Institut für Normung
DL	Deep Learning
DMX	Digital Multiplex
EKF	Extended Kalman-Filter
ERD	Entity Relationship Diagramm
FAA	Federal Aviation Administration
FAL	Final Assembly Line
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FPS	Frames Per Second
FSM	Finite State Machine
GATM	General Assembly Task Model
Gobo	Graphical Optical Blackout
HAAT	Human Activity Assistive Technology
HMD	Head-Mounted Display
HMM	Hidden Markov Model

i.O.	in Ordnung
I4.0	Industrie 4.0
I5.0	Industrie 5.0
IFPT	Institut für Flugzeug-Produktionstechnik
IMU	Inertial Measurement Unit
IoT	Internet of Things
IoU	Intersection over Union
KLT	Kleinladungsträger
MES	Manufacturing Execution System
MHS	Moving Head Spot
mIoU	Mean Intersection over Union
MMI	Mensch-Maschine Interaktion
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MRO	Maintenance, Repair, and Overhaul
MRTK	Mixed Reality Toolkit
MTM	Methods-Time Measurement
MVP	Minimum Viable Product
n.i.O.	nicht in Ordnung
NASA-TLX	NASA Task Load Index
NTP	Network Time Protocol
OEM	Original Equipment Manufacturer
OT	OptiTrack
P2P	Peer-to-Peer
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PPR	Produkt-Prozess-Ressource
PWM	Pulsweitenmodulation
QFD	Quality Function Deployment
REST	Representational State Transfer
ROI	Return On Investment
ROS	Robot Operating System
SA	Segment Anything
SAM	Segment Anything Model
SAR	Spatial Augmented Reality
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SSQ	Simulator Sickness Questionnaire

SUS	System Usability Scale
TAM	Technology Acceptance Model
TCO	Total Cost of Ownership
TCP	Tool Center Point
TCT	Task Completion Time
UEQ	User Experience Questionnaire
UML	Unified Modeling Language
VAC	Vergence-Accommodation Conflict
VFM	Vision Foundation Model
VI-SLAM	Visual-Inertial Simultaneous Localization and Mapping
VIMS	Visually Induced Motion Sickness
VIO	Visual-Inertial Odometry
ViT	Vision Transformer
vSLAM	Visual Simultaneous Localization and Mapping
WebRTC	Web Real-Time Communication
WKS	Weltkoordinatensystem

1 Einleitung

1.1 Motivation: Assistenzsysteme als Chance für Marktveränderungen

Angesichts der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Veränderungen in den letzten Jahrzehnten befinden sich produzierende Unternehmen zunehmend unter Anpassungsdruck, um auf einem globalen Markt wettbewerbsfähig zu bleiben. Zu den wichtigsten Faktoren zählen der demografische Wandel, der Fachkräftemangel und die Globalisierung (Abbildung 1.1). Während gesellschaftliche und marktbedingte Wandlungstreiber die Industriebetriebe zunehmend vor Herausforderungen stellen, bieten neue technologische Entwicklungen Chancen, ihnen zu begegnen. Die Aus- und Wechselwirkungen der genannten Wandlungstreiber werden in den folgenden Absätzen aufgegriffen und näher erläutert.

Vor allem die Grundideen, Methoden und Technologien der Industrie 4.0 (I4.0) [1] und Industrie 5.0 (I5.0) [2] werden als Antworten auf die wachsenden Herausforderungen diskutiert (Abbildung 1.1). Dabei basiert die I4.0 insbesondere auf dem Einsatz Cyber-Physischer Systeme (CPS) sowie deren Vernetzung über das Internet of Things (IoT) innerhalb einer intelligenten unternehmensübergreifenden Wertschöpfungskette [3]. Die Vision sind hochflexible und zugleich effiziente Produktionsnetzwerke („Smart Factories“), die sich selbstständig an veränderte Rahmenbedingungen in volatilen, globalen Märkten adaptieren können [4]. Innerhalb dieser Vision nimmt der Mensch auf dem Shopfloor eine zentrale Rolle als Entscheidungsinstanz ein, sieht sich aber gleichzeitig mit einem immer komplexer werdenden Arbeitsumfeld konfrontiert [5], [6]. Daher ist eine individuelle Analyse dieses Arbeitsumfeldes mit geeigneten Methoden [7] und die darauf aufbauende Gestaltung sozio-technischer Systeme [8] entscheidend für eine erfolgreiche Integration des Menschen in I4.0-Ansätzen. Als Ergebnis dieser Bemühungen sind unter dem Begriff „Assistenzsysteme“ verstärkt Forschungsarbeiten entstanden, die den Menschen in seinem Arbeitsprozess sowohl bei der Informationsaufnahme und -verarbeitung als auch bei der eigentlichen Aufgabenausführung unterstützen [9].

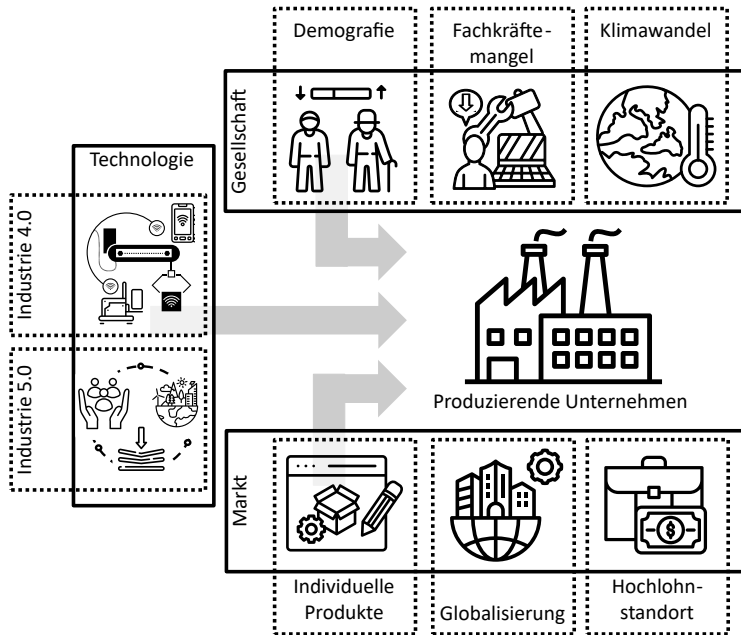


Abbildung 1.1: Wandlungstreiber für produzierende Unternehmen.

Die Ansätze von I4.0 beruhen im Wesentlichen auf technologischen Entwicklungen – der Mensch ist hierbei ein Einflussfaktor, jedoch nicht im Zentrum dieses Paradigmas [10]. Die darauf aufbauende I5.0 postuliert diese dedizierte Zentrierung auf den Menschen [11] und stellt darüber hinaus einen Paradigmenwechsel von einem technologie- hin zu einem wertorientierten Ansatz dar [12]. In der Folge rücken bestehende Lösungskonzepte, die bereits menschenzentriert sind, zunehmend in den Fokus [13]. So werden in diesem Zusammenhang die zuvor erwähnten Assistenzsysteme und die Rolle der Mitarbeitenden in der Fabrik kontinuierlich weiterentwickelt [14], [15].

Mit Blick auf die eingangs genannten Wandlungstreiber stellen Assistenzsysteme nicht nur einen Forschungstrend dar, sondern können als Hilfsmittel im Umgang mit aktuellen Herausforderungen fungieren. Im Folgenden werden daher exemplarisch gesellschaftliche und marktbezogene Wandlungstreiber aufgegriffen und das Potenzial von Assistenzsystemen im Umgang mit diesen beleuchtet.

Ein wesentliches Phänomen aus **gesellschaftlicher Sicht** lässt sich mit dem seit langen bekannten demografischen Wandel hin zu einer alternden Bevölkerungsstruktur benennen [16]. Daraus ergibt sich ein steigendes Durchschnittsalter der Belegschaften in Industrieunternehmen. Hier können Assistenzsysteme eingesetzt werden, um diese Mitarbeitenden nachhaltig und langfristig in den direkten Wertschöpfungsprozess zu integrieren und somit ergonomische Arbeitsbedingungen sowohl aus physiologischer als auch aus kognitiver Sicht zu schaffen [17]. Zunehmend scheiden erfahrene Mitarbeitende aus dem Unternehmen aus. Dadurch geht angesammeltes Wissen verloren, was einem immateriellen Vermögensverlust entspricht. Personelle Gegenmaßnahmen zur Kompensation der ausscheidenden Fachkräfte scheitern jedoch am demografisch bedingten Fachkräftemangel [18]. Um einem Wissensverlust vorzubeugen, bilden Assistenzsysteme das explizite und implizite Fachwissen nach und stellen es in interaktiven Lern- [19] und Produktionsumgebungen zur Verfügung [20], [21]. Neben der Möglichkeit zur Abbildung von Wissen bieten Assistenzsysteme ebenso eine Qualifizierungsmaßnahme, die dazu beiträgt, ungelernte Arbeitskräfte bei unternehmensspezifischen Tätigkeiten anzuleiten und den vorherrschenden Fachkräftemangel abzumildern [22], [23].

In enger Wechselwirkung mit den gesellschaftlichen Aspekten stehen **marktbedingte Wandlungstreiber**. So verschärft beispielsweise der Trend hin zur Produktindividualisierung den Fachkräftemangel, da durch die wachsende Produktkomplexität z. T. höhere Anforderungen an die Qualifikationen und das Fachwissen der Mitarbeitenden während des Montageprozesses gestellt werden [24], [25]. Darüber hinaus führt die zunehmende internationale Verflechtung der Märkte dazu, dass die gestiegene Variantenvielfalt kundenspezifischer Produkte (bis hin zur „Losgröße 1“) unter enormem Kostendruck bei gleichbleibend hohen Qualitätsstandards produziert werden muss [26]. Insbesondere für Hochlohnstandorte wie Deutschland [27] erhöht dies den Bedarf an effizienzsteigernden Innovationen in der Produktion [28]. Bisherige Bestrebungen, diese Effizienzsteigerung durch eine Vollautomatisierung der Produktionsprozesse zu erreichen, blieben jedoch erfolglos, wie das Beispiel eines Automobilherstellers zeigt [29], [30]. Die Randbedingungen moderner Produktionsumgebungen werden auch zukünftig die Flexibilität und Kreativität des Menschen benötigen, wodurch dieser integraler Bestandteil des Wertschöpfungsprozesses sein wird [31]. Aus diesem Grund gilt es, die notwendigen manuellen Prozesse effizient zu gestalten, um wettbewerbsfähig zu bleiben. In diesem Zusammenhang zeigt der Einsatz von Assistenzsystemen in verschiedenen Fallstudien positive Effekte: Zum einen durch die Reduktion von Durchlaufzeiten und Fehlerraten [32], [33] und zum anderen durch die kognitive Entlastung der Mitarbeitenden

[34], [35] in anspruchsvollen Montageszenarien.

Zusammenfassend lassen sich Assistenzsysteme als wirksame Werkzeuge zur Adressierung der aufgeführten Wandlungstreiber beschreiben. Sie kommen speziell in der manuellen Montage von Produkten mit großer Variantenvielfalt und geringen Stückzahlen („High Mix, Low Volume“) zum Tragen. Für Industrienationen mit hohen Lohnkosten ergeben sich durch ihren Einsatz potenzielle Produktivitätssteigerungen und damit der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit auf dem globalen Markt. In einer aktuellen Studie zum Einsatz digitaler Technologien in deutschen Unternehmen wird diese industrielle Relevanz deutlich: Assistenzsysteme werden hier sowohl bei den derzeit eingesetzten als auch bei den zukünftig geplanten Technologien überdurchschnittlich häufig genannt [36]. In der Forschung zeigt sich dies im erheblichen Anteil der Veröffentlichungen aus dem deutschsprachigen Raum (z. B. 90 von 121 untersuchten Publikationen in einer Literaturlauswertung von [37]).

1.2 Problemstellung: Die Grenzen der Einsetzbarkeit von industriellen Assistenzsystemen

Den aufgezeigten Potenzialen von Assistenzsystemen stehen jedoch auch Hemmnisse gegenüber, die deren Einführung in beliebigen Montagesituationen in verschiedenen Branchen erschweren. Industriell verfügbare Systeme wie „ActiveAssist“ von Bosch Rexroth [38] oder „SmartAssist“ von MiniTec [39] bieten Arbeitsplatzsysteme für die assistierte Montage von Produkten. Dabei handelt es sich um Systeme für die Einzelplatzmontage [40] mit integrierten Assistenztechnologien, die die Mitarbeitenden im Prozess unterstützen. Nach einer aktuellen Studie dominieren hier oftmals Bildschirme zur Darstellung von Prozessinformationen [41]. Aufgrund der derzeitigen Fokussierung auf die Einzelplatzmontage ist den am Markt verfügbaren Assistenzsystemen gemein, dass sie ausschließlich für die Herstellung von Produkten mit kleinen Abmessungen, nicht aber für Großbauteile eingesetzt werden können [42]. Branchen, in denen zur Herstellung des Endprodukts die Montage großer Bauteile erforderlich ist, wie z. B. der Schienenfahrzeug-, Flugzeug-, Schiffs- oder Windkraftanlagenbau, weisen jedoch einen hohen Anteil manueller Prozesse auf, die durch Assistenzsysteme potenziell effizienter gestaltet werden könnten.

Neben der fehlenden Eignung für Großbauteilmontagen liegt ein weiteres Defizit in der eingeschränkten Betrachtung der unterschiedlichen Teilprozesse der Montage. Aktuelle Assistenzsysteme in der Industrie stellen den Teilprozess des Fügens in den Mittelpunkt. Da die Kernaufgabe des Montierens darin besteht, Bauteile zu einem funktionsfähigen Enderzeugnis zusammenzufassen [43], ist diese Fokussierung auf den ersten Blick nachvollziehbar. Für einen wirtschaftlichen Montageprozess und insbesondere zur Sicherstellung der geforderten Produktqualität [44] müssen jedoch auch Prozesse jenseits der reinen Fügeoperationen Beachtung finden. Eine solche qualitätssichernde und damit essenzielle Tätigkeit ist das Prüfen. Obwohl die Prüfung von Einzelteilen, Baugruppen oder fertigen Produkten als nicht wertschöpfend eingestuft wird, stellt sie – insbesondere bei sicherheitskritischen Bauteilen – einen unverzichtbaren und mit erheblichem Aufwand verbundenen Bestandteil des Produktionsprozesses dar [45].

Aus den vorherigen Erläuterungen ergeben sich bisher nicht erschlossene Anwendungsfelder im Bereich der Assistenzsysteme – zum einen für den Bereich der Großbauteilmontage und zum anderen für den Prozesstyp „Prüfen“. Dennoch kann der Einsatz von Assistenzsystemen für Hersteller von Großbauteilen, die von den im Abschnitt 1.1 dargestellten Wandlungstreibern betroffen sind und zudem einen hohen manuellen Prüfaufwand aufweisen, erfolgversprechend sein. Ein Sektor, auf den diese Merkmale in besonderem Maße zutreffen, ist die Flugzeugproduktion: Als umsatzstarker und global bedeutender Wirtschaftszweig ist sie durch höchste Sicherheitsanforderungen und technologisch anspruchsvolle Großbauteile geprägt, wobei den aufwendigen Prüfprozessen zur Gewährleistung dieser Sicherheit eine zentrale und unerlässliche Bedeutung zukommt. Sie stellt daher eine ideale Domäne dar, um das Potenzial von Assistenzsystemen unter diesen anspruchsvollen Bedingungen zu untersuchen. Aus diesem Grund bildet sie den Fokus dieser Arbeit. Daher wird im folgenden Abschnitt anhand der Rahmenbedingungen der Flugzeugproduktion aufgezeigt, inwieweit diese Branche von den Wandlungstreibern betroffen ist und wie bedeutend Prüfprozesse im Rahmen des Herstellungsprozesses sind. Damit wird die Relevanz von Assistenzsystemen in diesem Kontext herausgearbeitet.

1.3 Rahmenbedingungen der Flugzeugproduktion

Teilergebnisse dieses Abschnitts wurden bereits in vorangegangenen Veröffentlichungen [46], [47] publiziert.

Der zivile Flugzeugbau, der von den Marktführern Airbus und Boeing [48] dominiert wird, basiert wie der Automobilbau auf einer Zulieferpyramide, an deren Spitze der jeweilige Flugzeughersteller als Original Equipment Manufacturer (Original Equipment Manufacturer (OEM)) steht. Die Abbildung 1.2 zeigt dazu den schematischen Aufbau eines Airbus 350 XWB in den einzelnen Montageschritten. Im Folgenden werden die Montageschritte am Beispiel des Rumpfes (erste Spalte der Abbildung) erläutert, beginnend mit dem unten dargestellten Bereich „Fertigung/Einkauf“.

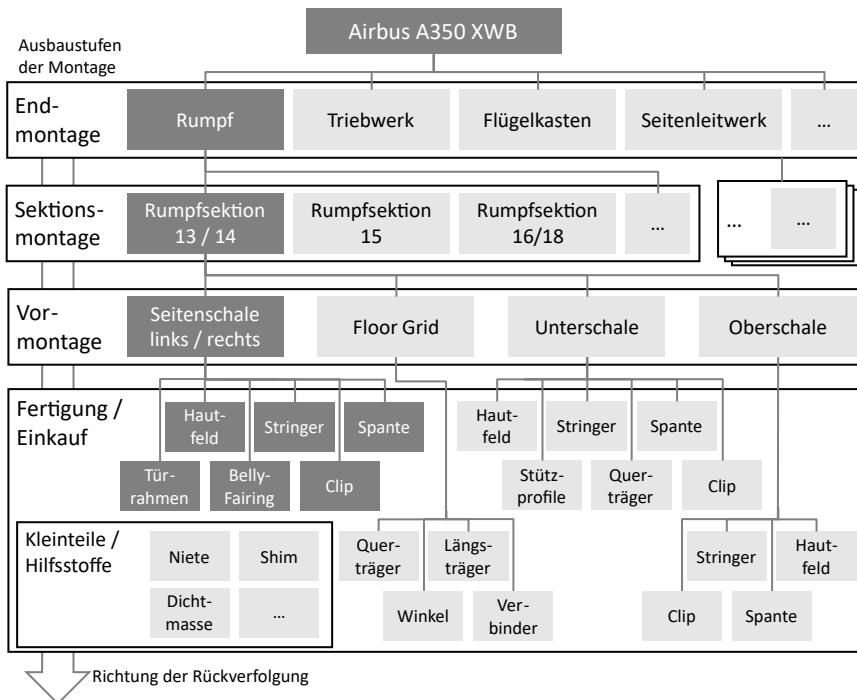


Abbildung 1.2: Aufbau eines Airbus 350XWB mit exemplarischen Baugruppen, Unterbaugruppen und Einzelteilen des Rumpfes in Anlehnung an [49].

Gefertigte oder zugekaufte Einzelkomponenten werden in der Vormontage zu höherwertigen (Unter-) Baugruppen zusammengefügt; in diesem Beispiel das Hautfeld mit den Verbindungselementen (Stringer, Spanten, Türrahmen, Belly-Fairing, Clips) zu den linken/rechten Seitenschalen. In der anschließenden Sektionsmontage werden diese wiederum zur Primärstruktur einer Rumpfsektion, wie beispielsweise der Sektion 13/14, vereint [50]. Dabei wird diese gegebenenfalls bereits mit ersten elektrischen, pneumatischen und hydraulischen Systemkomponenten ausgerüstet, sodass eine voll ausgestattete Sektion (auch Tonne genannt) entsteht [51]. In der Endmontage (Final Assembly Line (FAL)) entsteht aus den einzelnen Sektionen der Flugzeugrumpf. Weitere Hauptbaugruppen wie das Triebwerk oder das Seitenleitwerk werden parallel, meist in separaten Fertigungsstätten, hergestellt.

Zur weiteren Beschreibung der FAL wird die in Abbildung 1.3 dargestellte, stark vereinfachte Prozesskette eingeführt. In der FAL erfolgt der Zusammenbau aller Systeme zum kompletten Flugzeug, beginnend mit der bereits erläuterten **Rumpfmontage**. In der **Ausrüstungsmontage** folgt die Installation weiterer Systeme, der Türen, der Isolierung und des Fußbodens in den Rumpf. Anschließend wird der Rumpf mit den **Tragflächen, den Seiten- und Höhenleitwerken sowie den Fahrwerken** zur Flugzeugzelle (auch Flugwerk genannt) zusammengebaut [52]. Im weiteren Verlauf werden im Rahmen der **Ausstattungsmontage** sowohl im Passagierbereich als auch im Cockpit Kabinenelemente eingebaut. Dazu gehören die „Monumente“ (Küchen, Toiletten, Ruheräume, Stauschränke, Trennwände, Gepäckablagen) sowie Sitze oder Verkleidungen [53]. Zeitgleich werden bereits Bodenversuche an den eingebauten Systemen sowie Prüfungen am restlichen Flugzeug durchgeführt. Den Abschluss bildet die **Triebwerksmontage**, mit der das Flugzeug komplettiert wird. Daran schließen sich die Aktivitäten der **finalen Inbetriebnahme** an, die darauf ausgelegt sind, die Funktionsfähigkeit der einzelnen Systeme des Flugzeugs vor dem Erstflug zu überprüfen [51].

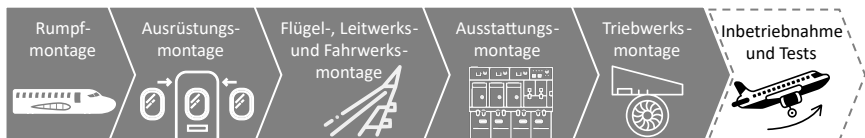


Abbildung 1.3: Vereinfachte Darstellung der Prozesskette in der FAL eines Flugzeugs in Anlehnung an [51], [54].

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die vorstehenden Ausführungen infolge der Vereinfachung der Prozesskette nicht exakt die betriebliche Realität re-

präsentieren. Insbesondere ist die Abfolge der Prozesse nicht als streng sukzessiv anzusehen, da an bestimmten Stellen Aktivitäten anderer Phasen Vorrang haben können. Darüber hinaus unterscheidet sich die Reihenfolge der Prozesse bereits zwischen verschiedenen FALs für den gleichen Flugzeugtyp, wodurch auch herstellern abweichende Prozessketten existieren.

Im Fall von Airbus werden die Produktion und die Lieferkette von unterschiedlichen nationalen und internationalen Zulieferern und internen Werken getragen. Diese beliefern die Standorte, an denen sich die FALs für die Endmontage der verschiedenen Flugzeugtypen befinden. In Toulouse werden beispielsweise in zwei FALs Flugzeuge des Typs A320 sowie in je einer FAL die A330- und A350-Familie montiert [55].

In diesem globalen Wertschöpfungsnetzwerk sind automatisierte und manuelle Prozesse eng miteinander verzahnt. Die folgenden Abschnitte beleuchten die spezifischen produkt- und prozessbezogenen Rahmenbedingungen der Flugzeugproduktion und legen ein besonderes Augenmerk auf die daraus resultierenden **Automatisierungshemmnisse**. Diese Automatisierungshemmnisse sollen verdeutlichen, dass Assistenzsysteme in vielen Anwendungsfällen dieser Domäne als sinnvoller Lösungsansatz gegenüber einer Vollautomatisierung angesehen werden können.

Flugzeuge werden auf Basis von kundenindividuellen Aufträgen („make to order“) gefertigt, wobei die Endprodukte aus einer Kombination von invarianten Systemkomponenten (Flügel und Rumpf) und hochvariablen Ausstattungskomponenten (Kabine) bestehen [56]. Zu den wesentlichen Herausforderungen zählen hierbei neben der hohen Varianz bei gleichzeitig geringen Produktionsvolumina die Dimensionen und die Nachgiebigkeit der einzelnen Baugruppen [57], [58], [59] sowie die im Verhältnis dazu engen Toleranzfelder [60]. Bei Montagearbeiten innerhalb des Flugzeugrumpfes erschweren zusätzlich eingeschränkte Zugänglichkeiten und Arbeitsräume die Automatisierung [61]. Aus wirtschaftlicher Sicht geht der Einsatz von automatisierten Produktionsanlagen mit einer enormen Kapitalbindung sowie einem erheblichen Risiko einher [60]. Die wichtigsten Kostentreiber sind hier zum einen die erhöhten Anforderungen an den Arbeitsraum bei vergleichbar hoher Genauigkeit. Zum anderen muss das System die notwendige Flexibilität besitzen, um auf produktseitige Anpassungen reagieren zu können oder auch abgeleitete Derivate einer Flugzeugfamilie auf der gleichen Anlage herstellen zu können [62]. Da sich die Laufzeit von Flugzeugfamilien zum Teil über mehrere Jahrzehnte erstrecken kann, ist eine Abschätzung zukünftiger Anforderungen im Voraus kaum möglich, sodass sich die Anwendbarkeit häufig auf bestimmte Produktvarianten beschränkt. Eine Ausweitung dieses Ansatzes auf das gesamte Produktportfolio

würde eine große Anzahl solcher Systeme erfordern, die dementsprechend nur geringe Auslastungsgrade erreichen könnten [63], [64].

Darüber hinaus ist die Luftfahrtindustrie angesichts der zahlreichen Sicherheitsrisiken stark reguliert. Dies gilt nicht allein für die Produkte selbst, sondern ebenso für den Herstellungsprozess, die verwendeten Werkzeuge und das eingesetzte Personal [65]. Als Folge davon sind Veränderungen mit aufwendigen Zertifizierungen verbunden und Prozessoptimierungen und Innovationen können nur langsam bzw. unter erschwerten Bedingungen erfolgen (dies betrifft auch die Umstellung von manuellen auf automatisierte Prozesse) [66].

Für das Jahr 2025 wird der weltweite Umsatz im Passagierluftverkehr auf 705 Mrd. USD prognostiziert [67] und die Zahl der Flugzeugbestellungen hat nach einem Rückgang im Jahr 2020 aufgrund der COVID-19-Pandemie im Jahr 2023 einen neuen Höchststand erreicht [68]. Vor diesem Hintergrund sind die Hersteller bestrebt, ihre Produktionsmengen kontinuierlich zu steigern. Da die Anzahl der FALs nicht ohne erheblichen finanziellen Aufwand erhöht werden kann, müssen sich die bestehenden Produktionsstätten verstärkt auf die Erhöhung der Ausbringungsmengen konzentrieren [69]. Aus diesem Grund werden insbesondere in der Rumpfmontage trotz der vorliegenden Automatisierungshemmnisse Roboteranlagen zum Fügen eingesetzt [70]. An anderen Stellen wird wiederum auf die Mensch-Roboter-Kooperation zum Zusammensetzen der Sektionen gesetzt, wie z. B. in [71] für die Sektion 19 des Airbus A320 gezeigt. Zur Verbesserung von nicht wirtschaftlich automatisierbaren Prozessen werden Mitarbeitende z. B. bei der Kabelmontage im Rumpf auf Basis von Augmented Reality (AR) unterstützt [72].

Insgesamt ergibt sich aufgrund dieser Rahmenbedingungen in den verschiedenen Montageschritten des Flugzeugbaus ein Mix aus Lösungsansätzen mit variierenden Automatisierungsgraden, die von manuell über hybrid bis hin zu vollautomatisiert reichen.

Diese Bandbreite findet sich auch in den **Organisationsformen** innerhalb der Montage wieder. So sind FALs in der Regel entlang einer Linie mit Stationen und definierten Arbeitsinhalten strukturiert. Innerhalb der Stationen besitzt die Montage jedoch eher Baustellencharakter [65]. Dabei werden die zu produzierenden Flugzeuge oder Systeme entweder kontinuierlich („Moving-Line“) oder diskontinuierlich („Flow-Line“ oder „Pulse-Line“) bewegt [73]. Bei der Herstellung von Flugzeugkomponenten außerhalb der FALs sind sowohl die Baustellen- als auch die Werkstattmontage gängige Organisationsprinzipien [44], [74].

Das Zusammenspiel der skizzierten Organisationsformen und Automatisierungshemmnisse erweist sich als Treiber für den **hohen Bedarf an manuellen Prozessen**. Im Vergleich zu anderen Branchen, wie z. B. der Automobilindustrie, ist der Anteil manueller Prozesse im Flugzeugbau überdurchschnittlich groß [75]. Daraus ergibt sich ein Mehrbedarf an Personal, welches aufgrund der Eigenheiten der Branche (Regulierungen, Komplexität der Produkte) entsprechend höher qualifiziert sein muss [76]. Allerdings ist auch die Luftfahrtindustrie von den vorherrschenden Wandlungstreibern (Abschnitt 1.1) betroffen. So leiden sowohl die OEMs [77] als auch die Zulieferer [78] zunehmend unter dem Fachkräftemangel.

Weiterhin sind manuelle Prozesse gerade in anspruchsvollen Montageszenarien in der Regel fehlerbehaftet [79], [80]. Bei einem sicherheitskritischen Produkt wie dem Flugzeug ist daher die Absicherung der Montageprozesse von höchster Bedeutung. Diese Absicherung erfolgt anhand von Qualitätsmerkmalen durch eine Vielzahl von Prüfungen im Rahmen der Qualitätssicherung über die gesamte Wertschöpfungskette, also sowohl bei den OEMs als auch bei den Zulieferern. In der Flugzeugproduktion ist ähnlich zur Automobilherstellung eine 100%-Kontrolle Standard, um die hohen Qualitätsanforderungen und damit die Produktsicherheit zu gewährleisten [81]. Daraus resultiert ein erheblicher zeitlicher und wirtschaftlicher Aufwand – in [82] wird sogar davon gesprochen, dass die Prüfkosten im Flugzeugbau den größten Anteil an den Herstellungskosten einnehmen.

Typischerweise wird hierfür ein Großteil der qualitätsrelevanten Merkmale ebenfalls manuell geprüft. Die Prozesse sind dadurch gekennzeichnet, dass sie im Wesentlichen auf papierbasierten Prüfplänen, analoger Dokumentation und Handmessmitteln (z. B. Messschieber und Lehren) basieren [83]. Das derzeitige Fehlen geeigneter Unterstützungssysteme geht typischerweise mit verschiedenen Fehlern einher, die von der falschen Lokalisierung der Prüfpositionen bis hin zu Eingabefehlern aufgrund von Medienbrüchen reichen [84], [85]. Gleichzeitig lassen sich diese manuellen Prozesse aufgrund der beschriebenen Automatisierungshemmnisse in der Flugzeugproduktion nur schwer wirtschaftlich automatisieren.

Wie groß die Bedeutung von Prüfungen in der Luftfahrtindustrie tatsächlich ist, zeigt sich insbesondere dann, wenn es während der Betriebszeit eines Flugzeugs zu qualitätsbedingten Zwischenfällen kommt. So kam es 2024 zu einem Zwischenfall, bei dem sich während des Fluges ein Teil des Rumpfes löste und herausgerissen wurde. Als Ursache wurde ein Fehler in der Qualitätskontrolle seitens des Flugzeugherstellers ermittelt [86]. In der Folge wurde der betroffene Flugzeugtyp von der amerikanischen Luftfahrtbehörde (Federal Aviation Administration (FAA)) mit einem Flugverbot belegt und weitere Ursachenanalysen [87] angeordnet. Abge-

sehen von dem immensen wirtschaftlichen Schaden wurden bei dem genannten Vorfall keine Passagiere verletzt.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Kernaspekte der vorangegangenen Abschnitte resümiert und beispielhafte Ansatzpunkte für Assistenzsysteme zur Bewältigung der Herausforderungen manueller Prüfprozesse der Flugzeugproduktion aufgezeigt, um abschließend eine übergeordnete Zielsetzung abzuleiten.

1.4 Ableitung der übergeordneten Zielsetzung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Prüfprozesse in der Flugzeugproduktion durch eine besondere Konstellation geprägt sind: Höchste Sicherheits- und Qualitätsanforderungen treffen auf großdimensionierte Produkte und eine Produktionsumgebung, in der manuelle Tätigkeiten dominieren und eine vollständige Automatisierung oft an wirtschaftlichen oder technischen Hürden scheitert. Die aktuell stark analog und manuell geprägte Durchführung der Prüfungen ist nicht nur kosten- und zeitintensiv, sondern birgt auch erhebliche Fehlerrisiken. Hieraus ergibt sich ein Handlungsbedarf zur Fehlervermeidung und Effizienzsteigerung manueller Prüfprozesse unter Beibehaltung der notwendigen Flexibilität.

Als vielversprechender Ansatz zur Bewältigung dieses Handlungsbedarfs stellt sich, insbesondere vor dem Hintergrund der skizzierten Rahmenbedingungen und der Wandlungstreiber, der gezielte Einsatz von Assistenzsystemen dar. Konkret könnte ein solches Assistenzsystem zur Überwindung des Medienbruchs von analog zu digital z. B. integrierte Datenerfassungssysteme beinhalten. Um sicherzustellen, dass an den richtigen Prüfpositionen gemessen wird, ist die Implementierung von Informationssystemen als befähigende Technologie zur Unterstützung des Personals sinnvoll.

Allerdings werden anhand der flugzeugspezifischen Produkt- und Prozessmerkmale sowie der Reflexion des aktuellen Entwicklungsstandes von Assistenzsystemen klare Defizite für deren Einsatz in der Flugzeugproduktion erkennbar. Der Schwerpunkt industrieller Assistenzsysteme liegt auf dem Fügen von Bauteilen, das häufig an Einzelarbeitsplätzen und in kleinen Arbeitsbereichen erfolgt. So sind keine dedizierten Assistenzsysteme für manuelle Prüfprozesse an Großbauteilen bekannt. Inwieweit hierfür vorhandene Lösungsansätze aus dem Forschungsfeld der Assistenzsysteme genutzt werden können, ist derzeit noch unklar. Es ist folglich

eine grundlegende Betrachtung des Konzepts des Assistenzsystems und seiner einzelnen Bestandteile notwendig. Die Komponenten eines Assistenzsystems können als Lösungsbausteine für das Gesamtsystem betrachtet werden. Durch eine umfassende Analyse des Forschungsstandes kann eine Bewertung der Übertragbarkeit gegenwärtiger Lösungsansätze erfolgen. Daraus lassen sich geeignete, vorhandene sowie fehlende, zu entwickelnde Lösungskomponenten ableiten. Zusammenfassend ergibt sich hieraus die übergeordnete Zielsetzung als:

Die Befähigung von Assistenzsystemen für die Prüfung von Großbauteilen in der Flugzeugproduktion durch die Identifikation und Entwicklung von technischen Lösungskomponenten.

Die zuvor erfolgte Herleitung der übergeordneten Zielsetzung wird durch Abbildung 1.4 veranschaulicht.

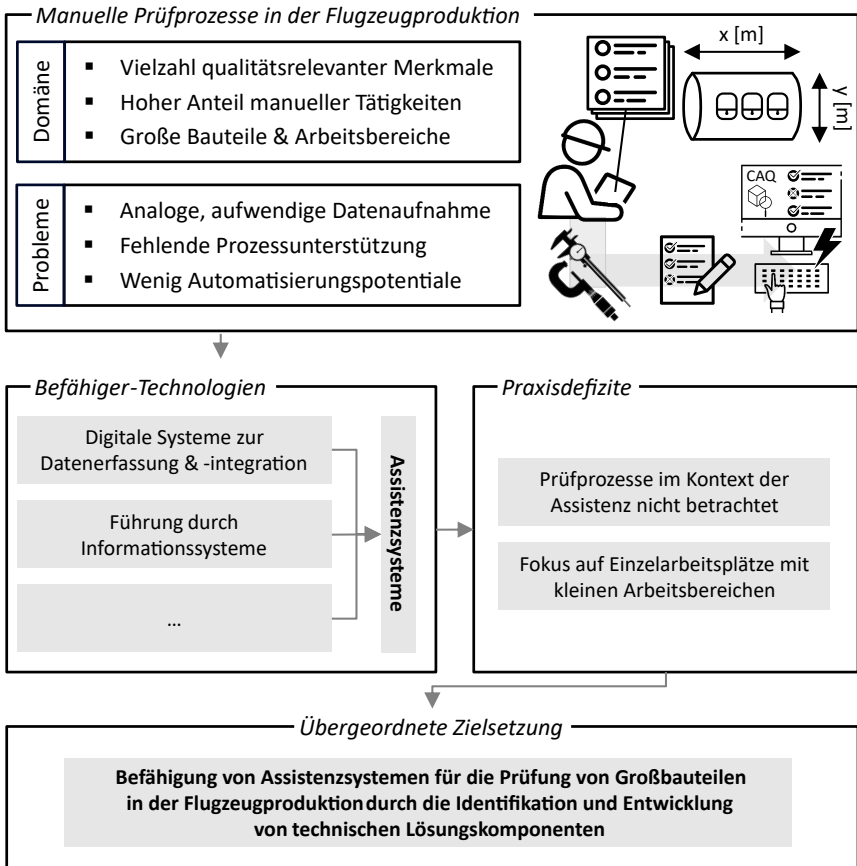


Abbildung 1.4: Herleitung der übergeordneten Zielsetzung.

2 Stand der Wissenschaft

Zur Vorstellung des relevanten Standes der Wissenschaft zu Assistenzsystemen im Kontext der Montage gliedert sich dieses Kapitel in zwei Abschnitte. Im Abschnitt 2.1 werden zum besseren Verständnis dieser Arbeit die Grundlagen des Betrachtungsbereichs erläutert. Dazu werden Charakteristika des Prüfens in der industriellen Produktion und deren Bedeutung für die Montage näher beschrieben. Darauf folgt im Abschnitt 2.2 eine detaillierte Einführung und Analyse des Forschungsfeldes der Assistenzsysteme vor dem Hintergrund der Anwendungsdomäne. Hierbei werden aktuelle Forschungsdefizite identifiziert, die Zielsetzung dieser Arbeit näher spezifiziert sowie eine Vorgehensweise abgeleitet.

2.1 Grundlagen des Betrachtungsbereichs

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen für das Verständnis der Arbeit gelegt. Dazu gehören zunächst die Definition, Erläuterung und Abgrenzung der relevanten Begriffe Prüfprozesse und Assistenzsysteme. Hierfür erfolgt zu Beginn des Abschnitts 2.1.1 eine Einordnung der Prüfprozesse in den übergreifenden Wertschöpfungsprozess. Anschließend werden Prüfprozesse erst aus Sicht der Montage (Abschnitt 2.1.1.1) sowie im Weiteren aus Sicht des Qualitätsmanagements (Abschnitt 2.1.1.2) näher betrachtet.

Da bei der manuellen Durchführung von Prüfprozessen der Einfluss des Menschen von großer Bedeutung ist, werden im Abschnitt 2.1.1.3 typische Fehlerarten und damit verbundene Fehlerquellen dargestellt.

Darauf folgt eine Auseinandersetzung mit Assistenzsystemen im industriellen Kontext (Abschnitt 2.1.2), wobei hier sowohl die Schaffung eines Begriffsverständnisses (Abschnitt 2.1.2.1) als auch die Darstellung der Ziele und Funktionen eines Assistenzsystems (Abschnitt 2.1.2.2) im Vordergrund stehen.

Neben den Eigenschaften von Assistenzsystemen wird abschließend ein Überblick über gängige Ansätze zur Evaluierung von Assistenzsystemen gegeben (Abschnitt 2.1.2.3).

2.1.1 Prüfprozesse im Wertschöpfungsprozess

Die grundlegende Aufgabe von Prüfprozessen in der Produktion ist die Sicherstellung der Qualität. Im Kern besteht diese darin, die Konformität bzw. Nichtkonformität eines Produkts in Bezug auf bestehende Vorgaben festzustellen. In diesem Kontext wird der Begriff der Qualität in der DIN ISO-Norm 9000:2015 verstanden als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ [88].

Die Abbildung 2.1 zeigt eine Auswahl an Prüfprozessen in einem vereinfachten Wertschöpfungsprozess. Im Zentrum steht der Produktionsbetrieb, der in verschiedene prozessspezifische Abteilungen gegliedert ist. Den Kern des Produktionsprozesses bilden die Fertigungs- und Montageabteilungen, da sie den größten Beitrag zur Wertschöpfung leisten. Allerdings entstehen nach [89] auch mehr als 80% der Herstellungskosten in diesen Bereichen. Flankiert werden diese durch den Wareneingang und -ausgang. Der Wareneingang hat die Aufgabe, die Produktion mit den benötigten Zukaufteilen von Lieferanten zu versorgen. Der Warenausgang übernimmt nach Fertigstellung und Prüfung der werkseigenen Produkte den Versand an die Kunden. Diese Prozesse werden durch eine Reihe von übergeordneten Abteilungen unterstützt. So werden beispielsweise die grundlegenden Abläufe auf dem Shopfloor von der Produktionsplanung festgelegt und von der Produktionssteuerung umgesetzt und kontrolliert. Alle Stufen der internen Wertschöpfungskette beeinflussen die Produktqualität. Das Ausmaß dieses Einflusses variiert je nach Art und Umfang der einzelnen Teilprozesse. Dementsprechend finden sich qualitätsbezogene Aktivitäten in allen dargestellten Abteilungen.

Von besonderer Bedeutung für diese Arbeit sind die produktionsnahen Prozesse, die der Qualitätssicherung zugeordnet werden (dunkelgraue Hervorhebung) und die sich nach [93] in drei Gruppen unterteilen lassen:

- **Wareneingangsprüfungen** werden an angelieferten Einheiten (z. B. Bauteile, Baugruppen, Werkstoffe) durch den Käufer oder auf dessen Veranlassung durchgeführt [94].
- **Zwischenprüfungen** werden an Einheiten durchgeführt, die sich noch in der Produktionsphase befinden und daher nicht vollständig realisiert sind. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, werden sie nach einzelnen Fertigungs- oder Montageprozessen vorgenommen, um eine frühzeitige Kontrolle der Zwischenergebnisse zu ermöglichen [94]. Typischerweise werden diese entweder in Form von sogenannten „Werkerselbstprüfungen“ direkt am Ort des Fertigungs- oder Mon-

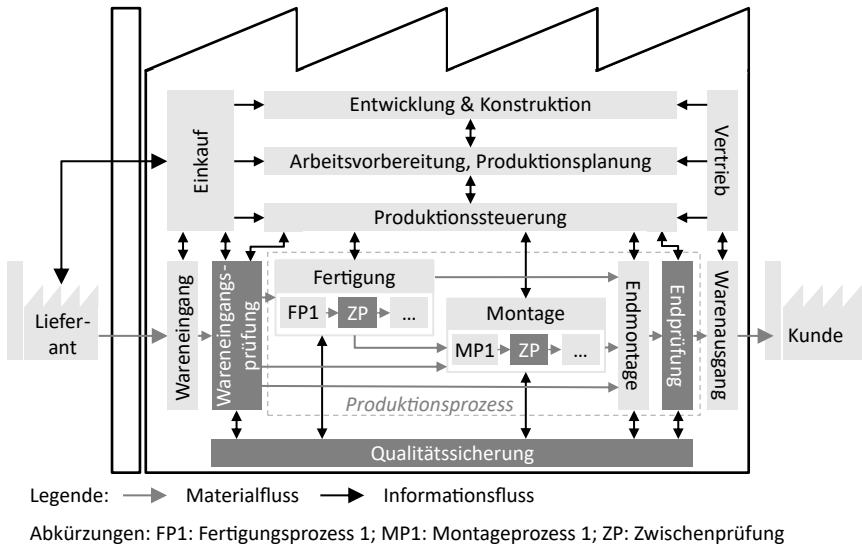


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsprozesses auf Basis von [90], [91], [92] ergänzt durch produktionsbegleitende Prüfprozesse (hervorgehoben in dunkelgrau) gemäß [93].

tageprozesses oder örtlich und personell entkoppelt an dedizierten Prüfplätzen oder -laboren durchgeführt [80], [95].

- **Endprüfungen** adressieren vollständig realisierte Komponenten, welche beispielsweise bedingt durch die Auslieferung an ein Lager oder an den Kunden eine abschließende Bestätigung ihrer Konformität benötigen [94].

Die beschriebenen Prüfaktivitäten finden auf dem Shopfloor des Unternehmens statt und sind somit integraler Bestandteil des Montageprozesses in der Produktion. Organisatorisch sind diese Prüfprozesse dem Qualitätsmanagement zugeordnet. Als eigenständige Abteilung ist dieses für die Planung und Durchführung der Prozesse verantwortlich. Angesichts dieser doppelten Zuordnung ist es sinnvoll, die Rolle der Prüfprozesse aus der Perspektive der beiden zentralen beteiligten Parteien – Qualitätsmanagement und Montage – näher zu betrachten.

2.1.1.1 Prüfprozesse aus Sicht der Montage

Um die Prüfprozesse in der Montage besser einordnen zu können, ist es sinnvoll, den Montagebegriff und die damit verbundenen Aufgaben näher zu beleuchten.

Die VDI-Richtlinie 2815 definiert den Begriff Montage als „Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen“ [96]. Müller unterscheidet in [97] fünf **Grundaufgaben der Montage**: Fügen, Inbetriebnahme, Handhaben, Hilfsprozesse und Sonderoperationen (Abbildung 2.2). Hinsichtlich ihres Beitrags zur Wertschöpfung wird innerhalb dieser Grundaufgaben weiter zwischen Primär- und Sekundärvorgängen unterschieden [44]. Anders ausgedrückt sind Primäraufgaben alle Tätigkeiten, die ein Produkt substanziell verändern, während Sekundäraufgaben eine unterstützende Funktion haben [98].

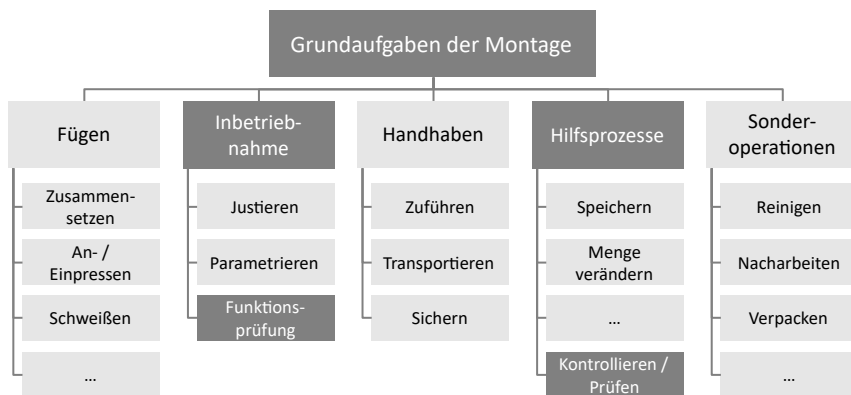


Abbildung 2.2: Grundaufgaben der Montage (in Anlehnung an [97]) mit hervorgehobenen Prüfanteilen.

Nach dieser Einteilung gehören alle dem Fügen, der Inbetriebnahme und den Sonderoperationen zugeordneten Verfahrensklassen prinzipiell zu den **Primärvorgängen**. Nach dem Deutschen Institut für Normung (DIN) bezeichnet Fügen das „auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von eben solchen Werkstücken mit formlosem Stoff“ [99]. Grundsätzlich kann das Fügen durch verschiedene Verfahren (z. B. Schweißen) erfolgen. Das DIN legt hierzu eine detaillierte Unterteilung der Verfahrensklassen fest [100]. Ein Beispiel mit besonderer Bedeutung für die Flugzeugindustrie ist das Verfahren des Nietens [101]. Dieses zählt zu der Klasse Fügen durch Umformen [102].

Ziel der Inbetriebnahme ist es, das Produkt oder dessen Module in einen funktionsfähigen Zustand zu überführen. Dazu werden z. B. bei mechatronischen Produkten für das Systemverhalten entscheidende Konfigurationswerte festgelegt oder Softwaremodule aufgespielt. Vorgänge dieser Art werden unter dem Begriff des

Parametrierens zusammengefasst [92]. Daneben dienen die Justageprozesse dazu, Abweichungen, die aufgrund unvermeidbarer Streuungen in vorgelagerten Prozessschritten auftreten, auszugleichen [103]. Funktionsprüfungen am fertigen Produkt oder an Baugruppen sind immer dann erforderlich, wenn nach den erfolgten Montageprozessen der Zusammenbau allein nicht ausreicht, um eine Aussage über die Funktionsfähigkeit des Produktes zu treffen [97]. In FALs der Luftfahrtindustrie sind diese Funktionsprüfungen vor dem Erstflug in Form von Bodentests („Ground Tests“) vorgeschrieben. Diese sind Bestandteil von strengen behördlichen Zulassungsverfahren, da sie für den Nachweis der Lufttüchtigkeit des jeweiligen Flugzeugs entscheidend sind (siehe FAA [104]).

Sonderoperationen hingegen zielen darauf ab, den finalen, vom Kunden erwarteten Zustand des Produktes zu erreichen und somit dessen Wert zu erhöhen. Ein Beispiel ist die Reinigung von Bauteilen, um produktionsbedingte Verschmutzungen zu beseitigen und eine makellose Oberfläche zu gewährleisten.

Zu den **Sekundärvorgängen** innerhalb des Montageprozesses zählen die Unterklassen Handhabung und Hilfsprozesse. Unter Handhabung wird nach [105] das Herstellen, zielgerichtete Manipulieren oder Bewahren einer festgelegten räumlichen Anordnung von geometrisch definierten Objekten verstanden. Dabei werden diese in einem gemeinsamen Bezugskordinatensystem verortet und es findet während des Handhabungsprozesses keine Veränderung am Objekt selbst statt. Hilfsprozesse, wie z. B. Speichern, Verändern von Mengen sowie Kontrollieren bzw. Prüfen, haben einen begleitenden Charakter. Sie sind auf das Mindestmaß zu reduzieren, da bei ihrer Durchführung keine Wertschöpfung erfolgt [97]. Wie im Abschnitt 1.3 beschrieben, ist jedoch insbesondere bei sicherheitskritischen Produkten die Prüfung zur Absicherung der Endmontage ein unverzichtbarer Bestandteil der Produktion.

Es hat sich gezeigt, dass der Montageprozess nicht nur das Zusammenführen von Komponenten umfasst, sondern alle Schritte, die notwendig sind, um das Produkt in einen funktions- und verkaufsfähigen Zustand zu versetzen. Auf der einen Seite spielen wertschöpfende Tätigkeiten eine zentrale Rolle. Dadurch erfährt das Fügen als Kernfunktion in der Montage besondere Beachtung. Auf der anderen Seite stehen nicht wertschöpfende Tätigkeiten, zu denen auch die in der Abbildung 2.2 dunkelgrau hervorgehobenen Unterklassen der Funktionsprüfung und des Kontrollierens gehören. Tätigkeiten dieses Typs sind in der Montage oftmals Gegenstand von Rationalisierungsmaßnahmen. Leistungskennzahlen von Montagesystemen,

wie beispielsweise der wirtschaftliche Wirkungsgrad nach [44], streben eine Reduzierung der zeitlichen Aufwände von Sekundärvorgängen an.

Da Prüfungen jedoch oft nicht eliminiert werden können, zielen aktuelle Forschungsarbeiten darauf ab, sie effizienter zu gestalten: Gängige Ansätze sind die Integration von Qualitätsprüfungen direkt in den Produktionsprozess (sog. „In-Line“-Prüfungen) [106], die Effizienzgewinne und verkürzte Reaktionszeiten versprechen [107], [108] sowie die Automatisierung klassischer Prüfstationen [109]. Allerdings stoßen diese Ansätze im Flugzeugbau oft an spezifische Grenzen. Wie bereits in Abschnitt 1.3 dargelegt, erschweren insbesondere die geringen Stückzahlen, die hohe Variantenvielfalt und die Dimensionen der Bauteile eine wirtschaftliche Umsetzung vollautomatisierter oder eng integrierter Prüfsysteme. Dies zeigt sich auch in den nur vereinzelt auffindbaren Forschungsarbeiten (wie z. B. [110]). Angesichts der Hürden für eine vollständige Prüfautomatisierung im Flugzeugbau richtet diese Arbeit ihren Fokus auf die Unterstützung der weiterhin essenziellen manuellen Prüfprozesse durch geeignete Assistenzsysteme.

2.1.1.2 Prüfprozesse aus der Sicht des Qualitätsmanagements

Die Abteilung des Qualitätsmanagements ist maßgeblich für die Planung und Durchführung der jeweiligen Prüfprozesse verantwortlich. Auf Grundlage verschiedener Publikationen bereitet Abbildung 2.3 einen systematischen Überblick über die Aufgaben und Hierarchien im Qualitätsmanagement, die einen direkten Bezug zu Prüfprozessen aufweisen (siehe dunkelgraue Hervorhebungen).

Auf der obersten Ebene unterscheidet das DIN in der ISO 9000:2015 [88] zwischen den **Grundaufgaben eines Qualitätsmanagementsystems**. Vorgeschaltet ist die Festlegung der allgemeinen Qualitätspolitik eines Unternehmens und der damit verbundenen Ziele. Diesen übergreifenden Funktionen nachgelagert können die operativen Prozesse der Qualitätsplanung, -steuerung (hier aufgrund der höheren Verbreitung in der Fachliteratur als Qualitätslenkung bezeichnet [113], [114]), -sicherung und -verbesserung verortet werden, welche der Erfüllung der Qualitätsziele dienen. Da für diese Arbeit im Wesentlichen die operativen Funktionen relevant sind, wird für eine ausführlichere Beschreibung der Qualitätspolitik und -ziele auf [115] verwiesen. Die vier zuvor genannten operativen Funktionen lassen sich entlang des Plan-Do-Check-Act (PDCA)-Zyklus nach Deming [116] einordnen, der einen Kerngedanken für die Handlungsketten des modernen Qualitätsmanagements darstellt. Sie können wie folgt beschrieben werden:

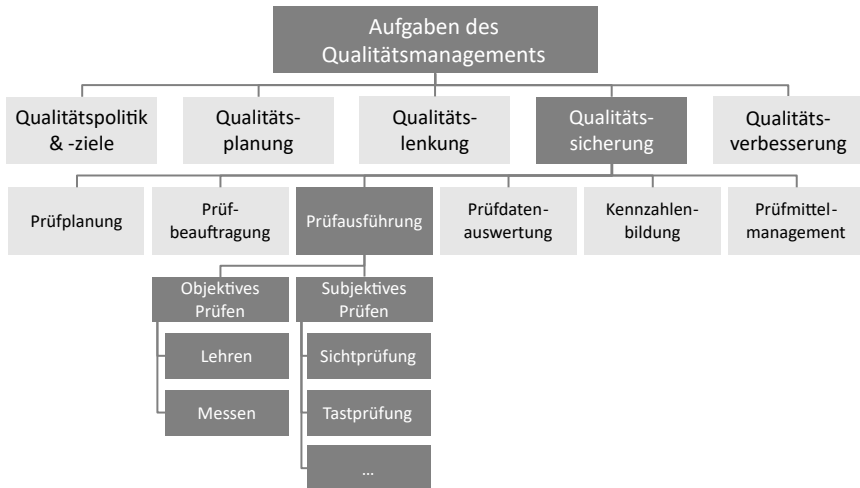


Abbildung 2.3: Aufgaben innerhalb des Qualitätsmanagements und Verortung von Prüfprozessen auf Basis von [88], [111], [112].

- Qualitätsplanung (Plan):** Dieser Funktionsbereich befasst sich mit der Aufstellung von Qualitätsstandards und -anforderungen für Produkte oder Dienstleistungen, bevor diese hergestellt oder erbracht werden. Dies beinhaltet die Identifikation von produktbezogenen, kundenrelevanten Qualitätsmerkmalen und die Bewertung ihres Einflusses auf die Qualität des Endproduktes. Darüber hinaus werden prozessbezogene Maßnahmen und Ressourcen spezifiziert, die zur Realisierung der definierten Produktqualität erforderlich sind. Ziel ist die proaktive Gestaltung von Produktionsprozessen, um die geforderten Spezifikationen zu erreichen und die Fehleranfälligkeit zu reduzieren [114], [117], [118]. Typische Werkzeuge für die Qualitätsplanung sind Advanced Product Quality Planning (APQP), Quality Function Deployment (QFD) [119] oder Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) [120].
- Qualitätslenkung (Do):** Im Bereich der Qualitätslenkung werden Arbeitsbedingungen geschaffen, die es ermöglichen, die zuvor festgelegten Qualitätsanforderungen zu realisieren. Im Falle der Nichterfüllung der definierten Qualitätsstandards können die Aktivitäten korrigierende Eingriffe in die Produkt- und Prozessstruktur einschließen [121]. Ein gängiges Instrument hierfür ist beispielsweise die Poka-Yoke-Methode [122]. Darüber hinaus können auch präventive oder kontrollierende Maßnahmen ergriffen werden. Hier besteht eine

enge Verzahnung mit der nachfolgend beschriebenen Qualitätssicherung, da diese die Datenbasis für derartige Aktivitäten liefert. Ziel ist es, systematische Fehlerquellen zu erkennen und Gegenmaßnahmen zur Sicherung des Qualitätsniveaus abzuleiten [118]. Oftmals findet in der Industrie hier die statistische Prozessregelung basierend auf Qualitätsregelkarten Anwendung [123].

- **Qualitätssicherung (Check):** Dieser Bereich konzentriert sich darauf, „das Vertrauen in die Erfüllung der Qualitätsanforderungen zu schaffen“ [88]. Die Tätigkeiten umfassen im Wesentlichen die Durchführung von Qualitätsprüfungen nach festgelegten Prüfplänen an Zulieferteilen, Zwischen- und Endprodukten. Die Kontrollmechanismen basieren auf einer Reihe von Vergleichen zwischen den vorgegebenen Soll-Werten (Toleranzgrenzen) und den tatsächlich ermittelten Ist-Werten der spezifischen Qualitätsattribute [124].
- **Qualitätsverbesserung (Act):** In diesem Funktionsbereich werden alle Aktivitäten zusammengefasst, die darauf abzielen, die grundsätzliche Qualitätsefähigkeit von Produkten und Prozessen kontinuierlich zu verbessern [113]. Im Mittelpunkt dieser Bestrebungen steht die systematische Analyse der Prozesse innerhalb der Funktionsbereiche des Qualitätsmanagements, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren und umzusetzen. Diese Rückkopplung von bisherigen Fehlern zur Optimierung bestehender Prozessketten wird auch als „Lessons Learned“ bezeichnet [125].

Da die Qualitätssicherung die Prüfverfahren beinhaltet, die im Rahmen dieser Arbeit durch ein Assistenzsystem unterstützt werden sollen, werden diese in Anlehnung an [112] weiter ausgeführt (zweite Ebene in Abbildung 2.3). Dabei gliedern sich die Tätigkeiten der Qualitätssicherung in die sechs Bereiche Prüfplanung, Prüfbeauftragung, Prüfausführung, Prüfdatenauswertung, Kennzahlenbildung und Prüfmittelmanagement. Die vier erstgenannten Bereiche lassen sich nach [117] zur Qualitätsprüfung zusammenfassen und erfolgen sukzessiv. Die Prüfplanung hat in dieser Prozesskette die Aufgabe, aus den definierten Qualitätsmerkmalen eine Teilmenge von Prüfmerkmalen zu bilden und für diese die durchzuführende Prüfung festzulegen. Eine Prüfung wird anhand eines Prüfplans durchgeführt, der typischerweise Vorgaben bezüglich der Prüfmethode, der geeigneten Prüfmittel, des Prüfumfanges sowie des erforderlichen Personals enthalten kann [93].

Für die tatsächliche **Prüfausführung** dienen diese Angaben als Grundlage. Sie erfolgt in der Regel im Anschluss an die für die jeweiligen Merkmale verantwort-

lichen Fertigungs- und Montageprozesse [111], ausgelöst durch die Prüfbeauftragung. Im Laufe der Prüfausführung bzw. Prüfdatenerfassung werden die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen zumeist in tabellarischen Prüfprotokollen dokumentiert, welche eine Übersicht der Prüfmerkmale mit den jeweiligen Ist-Werten darstellen und die Grundlage zur Konformitätsbewertung bilden. Im Falle von einfachen Prüfprozessen erfolgt eine Prüfdatenauswertung unmittelbar durch Abgleich erfasster Werte mit den Zielwerten. Bei komplexeren Prozessen werden die Ergebnisse zusammengetragen und verdichtet, um eine finale Entscheidung über den Prüfling zu treffen [111], [112]. An dieser Stelle erfolgt die bereits erwähnte Rückkopplung der Daten an die Qualitätslenkung und ggf. die Einleitung von Korrekturmaßnahmen im Sinne eines Qualitätsregelkreises. Begleitend zu dem Kernprozess der Qualitätsprüfung bildet die Qualitätssicherung Kennzahlen für abteilungsübergreifende Analysen oder auch für Langzeitstudien bezüglich Fehlerquellen, woraus sich Strategien und Stellhebel zur Qualitätsoptimierung ergeben [112]. Die Hauptaufgabe des Prüfmittelmanagements liegt in der Gewährleistung der regelmäßigen Kalibrierung der verfügbaren Prüfmittel, da diese die Validität einer Qualitätsprüfung maßgeblich mitbestimmt [126].

Auf den darunterliegenden Ebenen wird in Abbildung 2.3 die Prüfausführung weiter in die Teilgebiete des Prüfens unterteilt. Dabei unterscheidet [111] zwischen **objektivem und subjektivem Prüfen**. Beide Ansätze zielen auf die Bewertung von Qualitätsmerkmalen ab, um daraus ein Prüfergebnis, meist in Form von in Ordnung (i.O.) oder nicht in Ordnung (n.i.O.), abzuleiten. Diese Merkmale können quantitativer (mess- oder prüfbar) oder qualitativer (beschreibbar) Natur sein. Das objektive Prüfen findet unter Zuhilfenahme von Prüfmitteln statt, die sich wiederum in Messmittel und Lehren einteilen. Messmittel erlauben die Erfassung einer Messgröße (z. B. eines Durchmessers), um diese mit der Spezifikation des Prüfmerkmals (z. B. über Toleranzgrenzen [127]) abgleichen zu können. Hingegen findet beim Lehren eine direkte Feststellung des Prüfergebnisses über die unmittelbare Paarung eines Lehrkörpers mit dem Prüfmerkmal statt. Bei der subjektiven Prüfung werden die Merkmale auf Basis der Sinneswahrnehmung des Prüfpersonals beurteilt. Die Sichtprüfung findet besonders im Flugzeugbau breite Anwendung, da sie sich durch eine hohe Flexibilität und einen geringen technischen Implementierungsaufwand auszeichnet [128]. Voraussetzung ist adäquat geschultes Personal (z. B. nach DIN EN ISO 9712 [129]), um eine reproduzierbare Prüfung zu ermöglichen, sowie ggf. die Bereitstellung geeigneter Hilfsmittel (z. B. Lupen [130]), die jedoch deutlich kostengünstiger sind als herkömmliche Messmittel.

Das Feld der Fertigungsmesstechnik hat sich umfangreich mit der Frage beschäftigt, welche werkstücksbezogenen Größen und Parameter in industriellen Prüfverfahren erfasst werden können. In der Literatur lässt sich ein Konsens bezüglich der Unterteilung in geometrische, funktionale und materialbezogene Prüfgrößen feststellen [112], [131], [132], [133]. In dieser Unterteilung beziehen sich geometrische Prüfgrößen auf Gestaltabweichungen der Grobgestalt (z. B. Maße, Winkel, Form, Lage) sowie der Feingestalt (z. B. Rauheit, Welligkeit) eines Prüfobjekts. Diese Größen haben den mehrheitlichen Anteil (zwischen 85% und 90%) an den zu prüfenden Merkmalen im Rahmen der industriellen Fertigungsmesstechnik [111], [131]. [132] definiert eine zusätzliche Klasse der „Defekte“, die er von den Gestaltabweichungen im herkömmlichen Sinne unterscheidet, weil es sich bei Defekten (u. a. Kratzer, Dellen) um Abweichungen handelt, die unregelmäßig auftreten und nicht durch das Herstellverfahren verursacht werden. Aufgrund ihrer absichernden Funktion bezüglich der Resultate lassen sich Prüfungen auf Gestaltabweichungen vor allem im Produktionsprozess auffinden (2.1) und werden in der Montage dem Aufgabenfeld des „Kontrollierens“ zugeordnet (Abbildung 2.2).

Prüfungen des Materials zielen im Wesentlichen auf die Charakterisierung des Werkstoffs oder des Gefüges eines Prüfobjekts ab. Gängige Kenngrößen sind hierbei die Festigkeit, die Härte oder das E-Modul [131]. Diese Prüfungen finden sich oftmals in der Wareneingangs- und Wareenausgangsprüfung wieder, in Montageprozessen hingegen selten. Die Funktionsprüfung wurde in Abschnitt 2.1.1.1 erläutert und ist in Abbildung 2.2 als Unteraufgabe der Inbetriebnahme dargestellt.

Es wird deutlich, dass Prüfprozesse aus Sicht des Qualitätsmanagements keine isolierten Tätigkeiten sind, sondern in einem strukturierten System von Planung, Steuerung, Sicherung und Verbesserung verankert sind. Gerade die Qualitätssicherung mit ihren Abläufen von der Prüfplanung über die Methoden der Prüfausführung bis hin zur Datenauswertung bildet das operative Rückgrat, um die geforderte Produktqualität belastbar nachzuweisen. Die Prüfausführung erfüllt dabei die kritische Funktion der direkten Qualitätsbeurteilung am Produkt. Ihre erhebliche Bedeutung für die Endqualität, gerade in sicherheitskritischen Branchen, begründet den Fokus dieser Arbeit auf diesen Prozessschritt.

2.1.1.3 Der Faktor Mensch in Prüfprozessen

In diesem Abschnitt wird auf die Besonderheiten manueller Prüfprozesse eingegangen. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Assistenzsystems für solche

Prozesse. Um den Unterstützungsbedarf zu verdeutlichen, ist es daher sinnvoll, typische Fehlerquellen und -ursachen bei Prüfprozessen zu diskutieren. Dabei ist auf die Unterscheidung zwischen Füge- und Prüfprozessen hinzuweisen, die sich in diesem Zusammenhang durch das erzeugte Prozessergebnis differenzieren. Zur Beurteilung eines erfolgreichen Fügeprozesses werden häufig die Eigenschaften des gefügten Bauteils herangezogen. Wie „gut“ ein Prozess durchgeführt wurde, steht somit in direktem Zusammenhang mit der Produktqualität. Im Gegensatz dazu haben Prüfprozesse kein physisches Ergebnis, sondern erzeugen ein Prüfergebnis in Form eines definierten Datensatzes. Die korrekte Durchführung hat somit keinen direkten Einfluss auf das Produkt, sondern auf die Fehlerfreiheit und Glaubwürdigkeit [134] der gewonnenen Qualitätsdaten. Für sicherheitskritische Produkte wie das Flugzeug ist eine zuverlässige Qualitätsdatenbasis jedoch von entscheidender Bedeutung.

Die Qualitätsdatenbasis kann durch die in Abbildung 2.4 dargestellten Fehlerquellen negativ beeinflusst werden. In diesem Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm [135]) stellen die äußeren Zweige die jeweilige Hauptursache (graue Hervorhebung) und die inneren Zweige die zugehörigen Nebenursachen für Prüffehler dar. Der Einfluss auf den Prüffehler wird dabei sechs Kategorien von Faktoren zugeordnet, die miteinander in Wechselwirkung stehen.

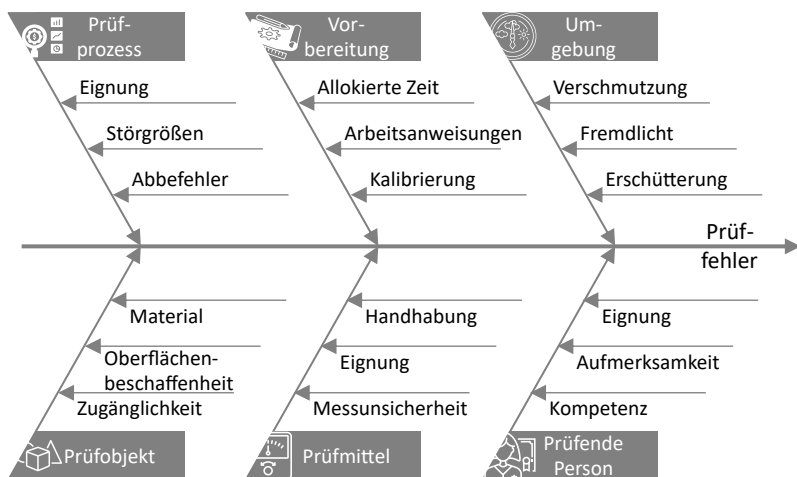


Abbildung 2.4: Fehlerquellen in manuellen Prüfprozessen als Ishikawa-Diagramm in Anlehnung an [136], [137].

Im Folgenden werden zunächst drei Prüffehlerkategorien nach [138] eingeführt (in [139] entspricht ein Fehler einer Abweichung). Innerhalb dieser Kategorien werden beispielhaft Fehlerentstehungsmechanismen und deren Auswirkung auf das Prüfergebnis erläutert. Dabei beschränken sich die angeführten Beispiele auf solche Phänomene, die im Zusammenhang mit der prüfenden Person stehen. Es ist zu beachten, dass die aus der Literatur entnommenen Fehlerkategorien ausschließlich zur Klassifizierung von Messfehlern, d. h. für objektive Prüfungen mit Messmitteln, verwendet werden [138], [140], [141]. Aufgrund der großen Bedeutung von subjektiven Prüfprozessen für diese Arbeit wird die Kategorisierung für das breitere Prozessspektrum übernommen.

- **Systematische Prüffehler:** Diese lassen sich auf messtechnisch erfassbare äußere (z. B. Umgebung) und innere (z. B. Prüfmittel) Einflüsse zurückführen. Sie führen bei Messprozessen zu einer Ungenauigkeit, d. h. zu einer Abweichung des Mittelwertes vom wahren Wert (Abbildung 2.5). Durch geeignete Strategien (z. B. Ausgleichsrechnungen) können sie teilweise kompensiert werden [142].
 - Handhabungsfehler: Ein typisches Beispiel für einen systematischen Handhabungsfehler wäre die konsequent falsche Anlage eines Kontaktprüfmittels, beispielsweise wenn eine prüfende Person eine Fühlerlehre aufgrund einer erlernten, aber fehlerhaften Technik stets mit zu hohem oder zu geringem Anpressdruck verwendet. Führt dieser gleichbleibend falsche Anpressdruck zu einer systematischen Verfälschung des Ergebnisses (z. B. ein Spalt wird immer als etwas größer oder kleiner bewertet), handelt es sich um einen systematischen Handhabungsfehler. Damit assoziierte Fehlerquellen können mangelnde Kompetenz, unzureichendes Training oder fest verankerte, aber suboptimale Arbeitsgewohnheiten des Prüfpersonals sein. Häufig jedoch gehen systematische Fehler nicht auf das Prüfpersonal zurück, sondern auf die Messgeräte, Materialien, Umgebungsbedingungen oder eine Kombination aus diesen Faktoren. Ein Beispiel sind temperaturbedingte Ausdehnungen von Bauteilen, welche die Prüfung beeinflussen können [143].
- **Zufällige Prüffehler:** Als Gegenstück zu systematischen Prüffehlern lassen sich diese messtechnisch nicht direkt erfassen, sodass eine messtechnische Kompensation hier nicht möglich ist. Abweichungen dieser Art äußern sich, wie in Abbildung 2.5 veranschaulicht, in einer gesteigerten Messwertstreuung [144].
 - Beobachtungsfehler: Als ein prominenter Vertreter dieser Fehlerkategorie gilt der Parallaxenfehler. Sobald die visuelle Erfassung des Prüfergebnisses

durch den Menschen auf einem Zeigermessgerät nicht im rechten Winkel zur Anzeigefläche erfolgt, entsteht ein Messfehler durch den Blickwinkel. Bei ständiger Variation des Blickwinkels kann es zu einer zufälligen Streuung kommen. Ungünstige Positionierung oder Gestaltung des Arbeitsplatzes können hier treibende Fehlerquellen sein [145].

- Personenabhängige Abweichungen: Führen verschiedene Personen den gleichen Messvorgang unter konstanten Randbedingungen durch, so sind die Messergebnisse zwischen diesen Personen unterschiedlich. Die Ursachen können wiederum auf Faktoren wie Sorgfalt oder Qualifikation zurückgeführt werden, aber auch eine ungenaue Arbeitsanweisung kann hierzu negativ beitragen [140]. Da diese Fehlerquelle in der industriellen Messtechnik bekannt ist, wird sie in den gängigen Verfahren zur Bestimmung der Prozessfähigkeit von Messungen mit dem Kennwert der Vergleichspräzision berücksichtigt [141], [146].
- **Grobe Prüffehler:** Diese Fehlerkategorie stellt eine Sonderform dar, da sie weder messtechnisch erfassbar ist, noch einer Regelmäßigkeit folgt. Er ist häufig auf tatsächliches Fehlverhalten des Prüfpersonals zurückzuführen und gilt daher grundsätzlich als vermeidbar. In Messreihen machen sich grobe Prüffehler in Form von Ausreißern bemerkbar (Abbildung 2.5 obere Reihe). Insbesondere bei subjektiven Prüfungen treten diese Fehler gehäuft auf, da die Ermittlung des Prüfergebnisses auf dem Urteil des Prüfpersonals beruht [147].
- Klassifikationsfehler: Das Prüfergebnis bei der manuellen Sichtprüfung geht üblicherweise über eine binäre Einteilung in i.O. und n.i.O. hinaus. Nichtkonformitäten an einem Bauteil werden durch vordefinierte Fehlerklassen weiter spezifiziert. Beispielhaft ist dies anhand der Konfusionsmatrix in der Abbildung 2.5 dargestellt. Fehlklassifikationen in diesem Prozess können sich auf verschiedene Weise niederschlagen. Die Möglichkeiten reichen von der irrtümlichen Bewertung eigentlich fehlerfreier Bauteile als defekt (falsch-negativ) über die Verwechslung von Defektklassen (Abbildung 2.5 dunkelblau) bis hin zum Übersehen von Fehlern (falsch-positiv). Je nach Komplexität der Prüfaufgabe kann dieser Durchschlupf mit 5 bis 30% der Defekte beziffert werden [148]. Ausschlaggebend sind hierbei häufig die Beleuchtungssituation, der Zustand (Verschmutzung) sowie die Oberflächenbeschaffenheit (Spiegelungen) der Bauteile. Darüber hinaus kann eine schlechte Zugänglichkeit auch dazu führen, dass Fehler leicht übersehen werden oder die Aufmerksamkeit des Prüfers durch monotone Arbeitsbedingungen nachlässt.

- Zuordnungsfehler: Prüfungsvorgänge haben oft einen örtlichen Bezug zur Lage des Merkmals am Bauteil. Wenn z. B. an einem Bauteil viele gleichartige Merkmale (z. B. Bohrungsdurchmesser) zu messen sind, kann es vorkommen, dass der Messwert fälschlicherweise einer anderen Prüfposition zugeordnet wird. Darüber hinaus kann es auch zu redundanten Messungen an einer Prüfposition kommen, während andere Prüfpositionen im Gegenzug ausgelassen werden [149].
- Übertragungsfehler: Aufgrund der in vielen Industrieunternehmen noch weit verbreiteten papierbasierten Dokumentation von Prüfprozessen kommt es bei der Übertragung in digitale Systeme zu „Medienbrüchen“. Neben dem erhöhten Aufwand stellt dieser Übergangspunkt wiederum ein Fehlerpotenzial dar. Handschriftlich notierte Ergebnisse können bei der Eingabe durch eine andere Person falsch interpretiert werden oder zu Zuordnungsfehlern im Informationssystem führen [84], [85].

Es hat sich gezeigt, dass es eine Vielfalt von Fehlerquellen in Prüfprozessen gibt, die auf menschliches Fehlverhalten zurückgeführt werden können und die zur Sicherstellung einer verlässlichen Qualitätsdatenbasis adressiert werden müssen. Hierzu gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie z. B. die Bereitstellung geeigneter Unterstützungssysteme. Mit ihrer Hilfe können die Folgen einer fehlerhaften Prozessdurchführung, z. B. ungeplante Prüfkosten durch Nacharbeit, vermieden werden. Auf Assistenzsysteme als eine Form der technischen Unterstützung wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

2.1.2 Assistenzsysteme im industriellen Kontext

Im Forschungsfeld der Assistenzsysteme im industriellen Kontext besteht die Notwendigkeit, Begriffe und Funktionen genau zu beschreiben und zu definieren. Dies liegt vor allem daran, dass das Forschungsfeld noch relativ jung ist und daher bisher weder ein wissenschaftlicher Konsens noch eine Standardisierung der Begrifflichkeiten existiert. Um eine klare und einheitliche Basis für die weitere Forschungsarbeit zu schaffen, werden im Abschnitt 2.1.2.1 aktuelle Begrifflichkeiten und Kategorisierungen in der Literatur aufgezeigt und für diese Arbeit geeignete Definitionen ausgewählt. Ähnlich wird bei der Definition der Ziele und Funktionen von Assistenzsystemen im Abschnitt 2.1.2.2 vorgegangen. Auch hier wird auf Basis der vorhandenen Literatur eine einheitliche Sichtweise dieser Aspekte für die weitere Arbeit erarbeitet. Abschließend wird die Evaluierung von Assistenzsystemen

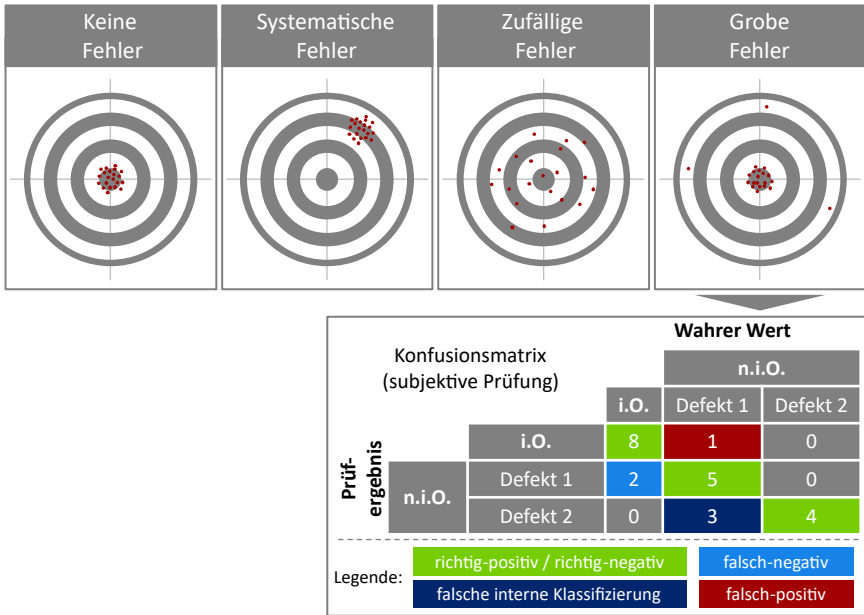


Abbildung 2.5: Fehlerkategorien in Anlehnung an [138], [150] ergänzt durch grobe Prüffehler. Oben: Beispielhafte Darstellung der Werteverteilung für objektive Prüfungen (Messungen). Unten: Veranschaulichung der Auswirkungen von groben Fehlern in subjektiven Prüfungen anhand einer exemplarischen Konfusionsmatrix.

(Abschnitt 2.1.2.3) anhand des Versuchsdesigns und der verwendeten Methoden beleuchtet.

2.1.2.1 Begriffserläuterungen

In der akademischen Diskussion werden die Begriffe „Assistenzsystem“ bzw. „Unterstützungssystem“ uneinheitlich und unsystematisch verwendet. Um ein konsistentes Verständnis zu schaffen, stützt sich die vorliegende Arbeit auf die **Definition von Weidner [151], die Assistenz- bzw. Unterstützungssysteme anhand von vier Merkmalen** charakterisiert hat:

1. Das System unterstützt Personen bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten, ohne diese zu substituieren.
2. Die Person, die das System verwendet, behält die Kontrolle über den Prozess.

3. Die Interaktion mit und die Bedienung des Systems gehen von der Person aus.
4. Bei der Anwendung des Systems bestehen keinerlei Gefahren für die nutzenden Personen oder für Dritte.

Folglich sind Systeme, die zur Entlastung des Menschen Aufgaben vollständig übernehmen und dadurch zu einer Substitution führen, in diesem Spektrum nicht enthalten. Beispiele hierfür sind automatisierte Systeme wie Industrieroboter, die Montageaufgaben übernehmen und den Menschen somit ersetzen. Einen Sonderfall stellt damit die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) dar, bei der sowohl Aufgaben teilweise vom System erledigt werden können als auch reine Unterstützungsfunktionen möglich sind.

Innerhalb des Forschungsfeldes findet sich neben den unterschiedlichen terminologischen Ausprägungen auf der obersten Hierarchieebene auch eine große Vielfalt an **Ansätzen zur näheren Charakterisierung von Assistenzsystemen**. Um eine präzisere Kategorisierung vorherrschender Schlüsselkonzepte zu ermöglichen, wird ein Schema zur menschlichen Informationsaufnahme und -verarbeitung nach [152] aufgegriffen (Abbildung 2.6). Dieses teilt sich in fünf Unterprozesse, welche nachfolgend basierend auf [153] beschrieben werden.

Im initialen Prozess des Entdeckens wird ein eingehender, neuer Reiz (z. B. Schall) durch die menschliche Sensorik – die Gesamtheit der Sinnesorgane – aufgenommen. Daraufhin schließen sich in der Phase des Erkennens das Filtern, Verdichten und Interpretieren dieses primären Signals an, um daraus verwertbare Informationen zu extrahieren. Dies kann unter anderem durch die Identifizierung bekannter Muster oder Symbole geschehen. Die so gewonnenen Informationen werden dann kognitiven Verarbeitungsprozessen unterzogen, die die menschliche Entscheidungsfindung charakterisieren und in deren Verlauf die Problemlösung stattfindet. Ziel des anschließenden Planungsprozesses ist es, auf Basis der getroffenen Entscheidung (z. B. Durchführung eines bestimmten Montagevorgangs) adäquate Handlungspläne zur Umsetzung zu ermitteln. Diese Handlungspläne werden in der abschließenden Ausführungsphase mithilfe der motorischen Fähigkeiten, d. h. den Akteuren des Menschen, in eine wahrnehmbare Handlung umgesetzt.

In Anknüpfung an die Kette der menschlichen Informationsverarbeitung kann eine Einteilung der Assistenzsysteme nach der jeweiligen Adressierung der vorgestellten Teilprozesse vorgenommen werden. So werden nach [7], [154], [155] **sensorische, kognitive und physische Assistenzsysteme** als primäre Kategorien unterschieden. Dabei fokussieren sich die genannten Systemkategorien auf die

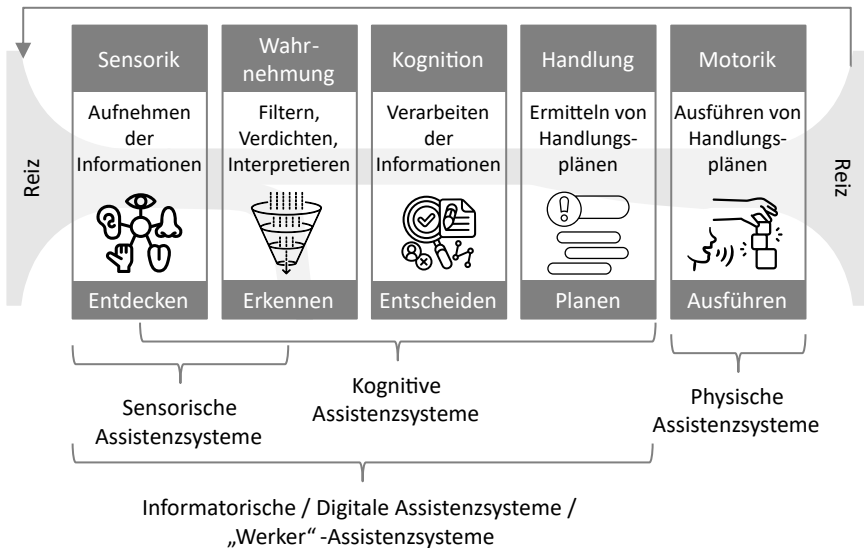


Abbildung 2.6: Darstellung der menschlichen Informationsaufnahme und -verarbeitung in Anlehnung an [153], ergänzt durch aktuelle Bezeichnungen von Forschungsrichtungen innerhalb des Felds der Assistenzsysteme.

in der Abbildung 2.6 markierten Teilprozesse. Ein sensorisches Assistenzsystem kann demnach dazu dienen, bei der Aufnahme von Informationen aus der Umgebung zu unterstützen oder die Wahrnehmung des Nutzenden gezielt auf gewisse Informationsquellen zu richten. Dementsprechend unterstützen kognitive Assistenzsysteme den Nutzenden in komplexen Arbeitssituationen bei der Ableitung von Handlungsentscheidungen.

In der relevanten Literatur wird deutlich, dass die Konzepte der „sensorischen“ und „kognitiven“ Unterstützung **nicht immer mit klarer Abgrenzung** verwendet werden, wie auch [156] feststellt. Innerhalb zahlreicher Assistenzsysteme erfolgt eine nahtlose Integration der Informationsakquise, deren Verarbeitung und der anschließenden Bereitstellung von Entscheidungs- und Planungsunterstützung, wodurch eine strenge Differenzierung in der wissenschaftlichen Praxis nicht durchgehend vorgenommen wird. In derartigen Veröffentlichungen wird der Begriff des kognitiven Assistenzsystems präferiert genutzt, z. B. in [157], [158]. Wegen dieser unterschiedlichen Definitionsgrenzen werden die Bereiche der sensorischen und kognitiven Assistenzsysteme in der Abbildung 2.6 überschneidend dargestellt.

Weiterhin finden sich aufgrund dieser fließenden Übergänge auch Publikationen, die diese Unterscheidung nicht mehr vornehmen und stattdessen Systeme mit sensorischen und kognitiven Assistenzfunktionen unter eigenständigen Termini zusammenfassen. Dazu zählen beispielsweise „**informativische**“ [159], [160], „**digitale**“ [161], [162] oder „**Werker-“Assistenzsysteme** [163], [164]. Unabhängig von der konkreten Bezeichnung lässt sich eine Gemeinsamkeit von Assistenzsystemen mit Fokus auf den ersten vier in Abbildung 2.6 skizzierten Teilprozesse feststellen: Diese Assistenzsysteme konzentrieren sich auf Teilprozesse, die dem Menschen eine geistige Leistung abverlangen. Der Einsatz technischer Systeme zur Unterstützung führt somit zu einer mentalen Entlastung der Nutzenden.

Anders verhält es sich bei der letzten aufgezeigten Kategorie, den „**physischen**“ Assistenzsystemen. Hier wird primär die tatsächliche Ausführung eines Prozesses fokussiert, wodurch in der Regel eine physische Entlastung erreicht werden soll. Ein Anwendungsbeispiel hierfür sind Exoskelette [165], [166], die in Form von tragbaren Anzügen durch passive oder aktive Mechanismen die Belastung von Muskeln und Gelenken, z. B. beim Heben von Gegenständen, reduzieren. Trägt ein Assistenzsystem in einem Arbeitsprozess sowohl zur mentalen als auch physischen Entlastung bei, kann von einem Multi-Assistenzsystem gesprochen werden [167]. Ein Beispiel findet sich in der Arbeit von [168], in welcher das Gesamtsystem aus einem Cobot für die Handhabung von Bauteilen sowie einem Laserprojektor zur Anzeige von Montageschritten besteht.

Für die in Abschnitt 1.4 beschriebene Anwendungsdomäne der manuellen Prüfprozesse in der Flugzeugproduktion spielen physische Assistenzsysteme eine eher untergeordnete Rolle. Obwohl auch Prüfmittel gehandhabt werden, liegt der primäre Unterstützungsbedarf bei diesen spezifischen Prozessen weniger in der rein physischen Entlastung als vielmehr in der sensorischen und kognitiven Assistenz. Der Mehrwert rein physischer Unterstützungssysteme wird daher im Vergleich dazu als eher geringfügig bewertet, weshalb sie für die weiteren Betrachtungen ausgeklammert werden. Daraus folgt, dass der Begriff Assistenzsysteme im weiteren Verlauf dieser Arbeit keine physischen Assistenzsysteme inkludiert. Im Hinblick auf die zuvor beschriebenen Divergenzen in der Benennungssystematik in Fachpublikationen werden Assistenzsysteme demnach als ganzheitliche Systeme betrachtet, die sowohl sensorische als auch kognitive Funktionalitäten aufweisen können. Diese Entscheidung basiert vor allem auf der Möglichkeit einer spezifischeren Charakterisierung der Funktionen innerhalb eines Assistenzsystems. Eine detailliertere Betrachtung, welche sensorischen und kognitiven Funktionen in der

Literatur unterschieden und welche Ziele damit verknüpft sind, folgt im nächsten Abschnitt.

2.1.2.2 Ziele und Funktionen von sensorisch-kognitiven Assistenzsystemen

In diesem Abschnitt werden die grundsätzlichen Ziele von sensorisch-kognitiven Assistenzsystemen beschrieben, nachdem der Betrachtungsraum im vorhergehenden Abschnitt 2.1.2.1 auf diese Assistenzformen eingeschränkt wurde. Weiterhin wird erläutert, welche typischen Funktionalitäten Assistenzsysteme bereitstellen, um diese Ziele zu erreichen.

Ziele:

Assistenzsysteme in der Produktion haben grundsätzlich das Ziel, den Menschen bei der Ausführung einer ihm zugewiesenen, vordefinierten Arbeitsaufgabe bis zu deren erfolgreichem Abschluss zu unterstützen [169]. Zu diesem Hauptziel lassen sich sowohl in Forschungsarbeiten als auch in Befragungen von Industrieunternehmen begleitende Zieldimensionen identifizieren. Zusammengefasst werden arbeitsbezogene, wirtschaftliche, strategische, informationstechnische und gesellschaftliche Ziele differenziert (siehe oberer Teil der Abbildung 2.7). Im Folgenden wird die Bedeutung dieser Dimensionen im Kontext von Assistenzsystemen sukzessive verdeutlicht.

Durch die Unterstützung menschlicher Perzeptions- und Kognitionsprozesse leisten Assistenzsysteme einen wesentlichen Beitrag zur mentalen Entlastung (Abschnitt 2.1.2.1) der **Arbeitsperson**. Beispielsweise führen sie durch komplexe Arbeitsabläufe oder helfen durch motivierende Aufbereitung (Anreize) monotone Tätigkeiten effizienter zu bewältigen [170], [171]. Auf diese Weise verbessern Assistenzsysteme die (kognitive) Ergonomie am Arbeitsplatz und ermöglichen es, ein breiteres Spektrum an Arbeitskräften, darunter auch ältere oder ungelernete, in den Produktionsprozess zu integrieren [172]. Insbesondere in der Forschung findet diese Zieldimension vielfach Beachtung, beispielsweise um unterschiedliche Unterstützungstechnologien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die kognitive Arbeitsbelastung zu untersuchen und zu vergleichen [173], [174].

Das wichtigste Ziel beim Einsatz von Assistenzsystemen aus Sicht der Unternehmen ist jedoch die Stärkung der **Wirtschaftlichkeit** und Wettbewerbsfähigkeit. Die Erhöhung der Produktqualität (Effektivität) und die Steigerung der Leistungsfähigkeit (Effizienz) werden von den befragten Unternehmensvertretern überdurchschnittlich häufig als wesentliche Motivation für die Einführung von Assistenzsys-

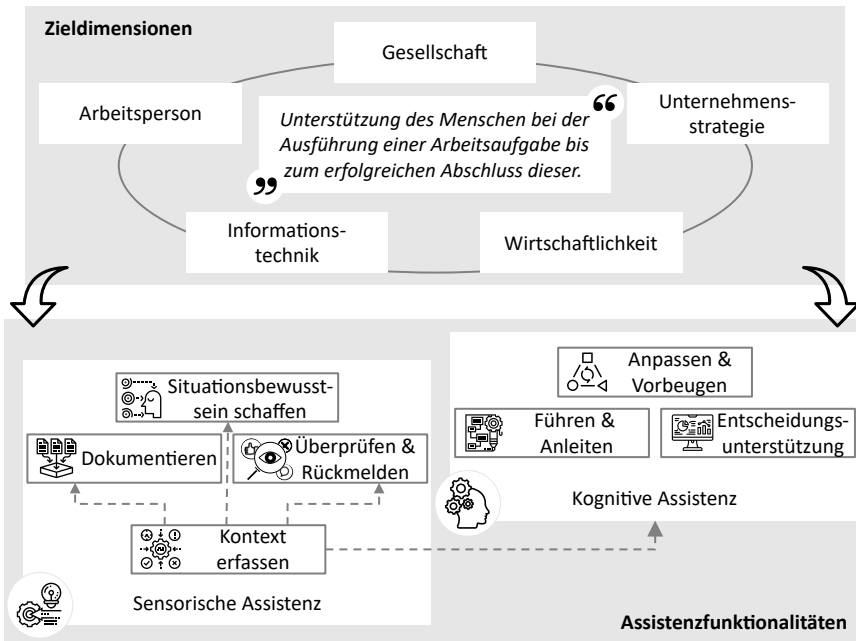


Abbildung 2.7: Hauptziel, korrespondierende Zieldimensionen und Funktionalitäten von sensorisch-kognitiven Assistenzsystemen.

temen genannt [36], [172], [175], [176]. Assistenzsysteme verkürzen darüber hinaus die Anlernzeiten für neue Mitarbeitende deutlich. Dadurch wird die Abhängigkeit von hoch qualifiziertem Personal verringert, was zu erheblichen Einsparungen bei den Personalkosten führt [177]. Im Rahmen von Forschungsarbeiten werden daher auch Indikatoren der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit erhoben, um die industrielle Relevanz von Assistenzsystemen zu belegen [156], [178].

Aus **strategischer Sicht** eines Unternehmens erhöhen Assistenzsysteme zusätzlich die Attraktivität von Arbeitsplätzen durch die Schaffung moderner Arbeitsbedingungen. Dies kann zu einer höheren Zufriedenheit und Bindung der Mitarbeitenden führen. Maßnahmen wie die Job-Rotation (Arbeitsplatzwechsel), die durch Assistenzsysteme erleichtert werden, sorgen zudem für Abwechslung und tragen zur Entwicklung des Personals bei [179].

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Rolle von Assistenzsystemen bei der Generierung und Nutzung von **Informationen**. Sie greifen auf eine breitere Informationsbasis als analoge Systeme zurück und ermöglichen eine transparente Dar-

stellung der verfügbaren Daten. Arbeitsplätze, die mit Assistenzsystemen ausgestattet sind, zeichnen sich durch eine verstärkte Gewinnung digitaler Daten durch integrierte Sensorik aus und reichern damit nebenläufig die dokumentierten Prozessergebnisse mit Kontextinformationen an.

Aus der **gesellschaftlichen Perspektive** spielen Assistenzsysteme eine wichtige Rolle bei der Förderung der Inklusion am Arbeitsplatz. Sie ermöglichen es, Arbeitsplätze so zu gestalten, dass Menschen mit Behinderungen am Wertschöpfungsprozess teilhaben können. Dies erweitert nicht nur den Pool potenzieller Mitarbeitenden, sondern trägt auch zu einer gesellschaftlich wertvollen Integration bei [155], [180], [181], [182].

Funktionalitäten:

Um die zuvor beschriebenen Zieldimensionen zu erreichen, stellen Assistenzsysteme eine Reihe von Funktionalitäten zur Verfügung. Aufbauend auf den Ausführungen im Kapitel 2.1.2.1 kann dabei zwischen Funktionalitäten mit tendenziell stärkerem sensorischen oder kognitiven Charakter unterschieden werden. Dieser Ansatz wird auch von anderen Forschenden verfolgt [183], [184], [185]. Zur weiteren Aufschlüsselung der Grundfunktionen werden existierende Publikationen [160], [183], [186], [187], [188] zugrunde gelegt, um daraus ein Funktionsspektrum für diese Arbeit abzuleiten. Es sei angemerkt, dass die Begrifflichkeiten für ähnliche oder teilweise gleiche Funktionen in der Literatur divergieren. Dies ist auf die unterschiedlich gewählten Abstraktionsebenen der Forschenden zurückzuführen. So ergeben sich sowohl sehr anwendungsfallspezifische als auch eher abstrakte Funktionsdefinitionen. Nachfolgend gewählte Bezeichnungen sowie Beschreibungen bemühen sich um eine hohe Übertragbarkeit auf verschiedenartige Situationen. Eine Übersicht der definierten Funktionen in den beiden Kategorien sensorischer und kognitiver Assistenz ist in der unteren Hälfte von Abbildung 2.7 skizziert. In den anschließenden Absätzen dieses Abschnitts werden diese Funktionen näher ausgeführt.

Funktionen der sensorischen Assistenz:

- **Kontext erfassen:** Analog zur Einordnung von [156] wird diese Funktion nicht als direkte Funktion für den Mitarbeitenden eingeordnet, sondern als befähigender Baustein zur Ermöglichung entsprechender sensorischer oder kognitiver Unterstützungsmodule, wie in Abbildung 2.7 dargestellt. Eine genauere Auseinandersetzung mit dem Begriff des Kontextes und der daraus resultierenden

Kontextsensitivität erfolgt in Kapitel 2.2.2. Vereinfacht wird an dieser Stelle unter Kontexterfassung die Konsolidierung aller die Arbeitsaufgabe betreffenden Daten und deren Bereitstellung im Gesamtsystem verstanden. Typische Beispiele hierfür sind die Erfassung des Prozessfortschritts [160] oder der verfügbaren Betriebsmittel an einem Arbeitsplatz.

- **Situationsbewusstsein schaffen:** In komplexen Arbeitssituationen hat diese Funktion die Aufgabe, die Aufmerksamkeit gezielt auf relevante Informationen zu lenken, die die gesamte Arbeitssituation (Aufgabe und Umgebung) betreffen. Mithilfe dieser Funktion wird ein Bewusstsein für aktuelle Zustände und deren Veränderungen im Arbeitsraum geschaffen und damit der Wahrnehmungsprozess des Mitarbeitenden unterstützt [186]. Grundlage dieser Funktion sind Konzepte des Situationsbewusstseins („Situation Awareness“) [189], [190] und dessen Erweiterung als Arbeitsraumbewusstsein („Workspace Awareness“) [191], [192]. Charakteristisch ist, dass die Aufrechterhaltung des Situationsbewusstseins immer ein sekundäres Kriterium ist, d. h. eine Zusatzfunktion zu den unmittelbar tätigkeitsbezogenen Funktionen darstellt.
- **Dokumentieren:** Die Unterstützung bei der zweckgebundenen Zusammenstellung von Informationen durch das Assistenzsystem wird mit der Funktion „Dokumentieren“ beschrieben. In diesem Fall dient es dazu, die oft vorgeschriebene Dokumentation des Arbeitsprozesses und seines Ergebnisses zu erstellen. Das Assistenzsystem kann diesbezüglich eine Reihe von Informationseingabesystemen mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad zur Verfügung stellen. So können z. B. Informationen über die vorherrschenden Parameter eines Arbeitsschrittes manuell eingegeben oder über Kontextinformationen (z. B. kamerabasiertes Tracking) extrahiert und gezielt einer Dokumentation zugeführt werden [183], [186], [187].
- **Überprüfen & Rückmelden:** Innerhalb von Assistenzsystemen kann über die aktive Überwachung des Arbeitsprozesses eine Feedbackschleife zum Mitarbeitenden realisiert werden [186]. Zu diesem Zweck werden qualitätsbeeinflussende Parameter innerhalb des Prozesses definiert, um im Falle einer Abweichung eine Aktion auszulösen. Abweichungen werden hier beispielsweise über einen Soll-Ist-Abgleich realisiert [183]. Die Rückmeldung spiegelt einen Hinweis auf die Abweichung wider; diese Information kann dann weiter für kognitive Assistenzfunktionalitäten zur Beseitigung der Abweichung überführt werden. Das System kann proaktiv warnen, wenn beispielsweise falsche Parameter für einen

Prozess gewählt werden und das zu erwartende Prozessergebnis als mangelhaft eingestuft wird. Ist eine derartige Abschätzung a priori nicht möglich, erfolgt der Hinweis in reaktiver Form [188].

Funktionen der kognitiven Assistenz:

- **Führen & Anleiten:** Eine der zentralen Funktionen eines Assistenzsystems ist die Unterstützung während der Prozessdurchführung. Allgemein hin basieren diese auf instruktionalen Erklärungen und Informationsartefakten zum aktuellen Prozessschritt [160], [193]. Vielmals werden hier Bilder, Videos oder Textbausteine zur Verdeutlichung von Prozeduren und Anweisungen eingesetzt [183]. Allerdings bieten Assistenzsysteme in diesem Bereich auch Inhalte, die über das reine Führen durch einen Prozess hinausgehen. So können über tutorielle Informationsinhalte und Interaktionsmöglichkeiten der aktive Lernprozess gefördert [186] und beispielsweise durch Gamification-Ansätze [194], [195] Mitarbeitende motiviert werden.
- **Entscheidungsunterstützung:** Diese Funktion findet Verwendung, wenn der Nutzende innerhalb des Prozesses vor einer nicht trivialen Entscheidung zwischen mehreren alternativen Handlungsmöglichkeiten steht. Die Auswahl einer Option geht mit direkten Konsequenzen auf den weiteren Prozessverlauf einher [196]. Im Gegensatz zur Führungs- und Anleitungsfunktion wird hier keine Handlung vom System vorgegeben, sondern die Entscheidungsgewalt liegt beim Menschen. Die Unterstützung findet in Form von datenbasierten Werkzeugen wie Analysen zur Generierung von Vorschlägen oder Prognosen sowie Simulationen zur Vorhersage von Handlungskonsequenzen statt [183]. Ziel ist es, die Komplexität der Situation zu reduzieren, sodass sie für den Nutzenden greifbarer wird und damit eine bestmögliche Ausgangssituation für die Entscheidungsfindung geboten wird [197].
- **Anpassen & Vorbeugen:** Diese Funktionen haben einen präventiven Charakter. In diesem Zusammenhang stehen Fehlervermeidung im Prozess und die Überbelastung des Mitarbeitenden im Mittelpunkt. Das Anpassen bezieht sich dabei primär auf die selbstständige Systemadaption, beispielsweise durch die Parametrisierung von Betriebsmitteln, meist mit einem direkten Kontextbezug [187]. Zur Verdeutlichung sei hier das Beispiel einer prozessschrittabhängigen Einstellung des Drehmoments eines handgeführten Schraubers [33] genannt. Vorbeugen hingegen hat die Aufgabe der Prävention von Überlastung des Mitarbeitenden, welche sich beispielsweise in der kognitiven Erschöpfung durch

eine erhöhte Informations- oder Prozesskomplexität widerspiegeln kann [186]. Neben der gezielten Vereinfachung von Informationsartefakten, beispielsweise durch eine kleinteiligere Bereitstellung, kann das System durch das Vorschlagen von Pausen eine drohende Überlastung des Menschen verhindern und somit zur Fehlervermeidung beitragen. Die Erfassung von Vitalparametern [198] oder Analyse von Bewegungsabläufen [199] während der Prozessausführung kann in diesem Zusammenhang dazu dienen, Aussagen über das Befinden des Mitarbeitenden (Stress, Konzentration, Aufmerksamkeit) zu tätigen.

Die zuvor beschriebenen Funktionalitäten können je nach Einsatzsituation und Ausgestaltung des Assistenzsystems sowie der angestrebten Ziele isoliert oder in beliebiger Kombination miteinander auftreten. Inwiefern das von einem Assistenzsystem angebotene Funktionsspektrum die Zieldimensionen erfüllen kann, wird anhand spezifischer Methoden und damit einhergehenden Metriken bewertet. Eine genauere Auseinandersetzung mit den in der Literatur gängigen Evaluierungsansätzen erfolgt im nächsten Abschnitt.

2.1.2.3 Evaluierung von Assistenzsystemen

Ziel dieses Abschnitts ist es, verschiedene Ansätze zur Evaluierung von Assistenzsystemen zu beleuchten. Ein Verständnis der Kriterien und Methoden zur Bewertung von Assistenzsystemen ist entscheidend, um aktuelle Forschungsansätze fundiert zu analysieren und einordnen zu können. Darüber hinaus werden im Rahmen der Evaluierung der zu entwickelnden Lösungsbausteine geeignete Ansätze aus diesem Abschnitt ausgewählt und angewendet.

Dazu werden zunächst Evaluierungstypen definiert und anschließend verschiedene Dimensionen aufgezeigt, unter denen ein Assistenzsystem betrachtet werden kann. Diese Dimensionen werden als Kategorien verwendet, um Evaluationsgegenstände zu klassifizieren. Gängige Methoden zur Untersuchung dieser Evaluationsgegenstände werden kurz vorgestellt. Da die Methodenvielfalt im Bereich der Mensch-Technik-Interaktion bzw. der Assistenzsysteme sehr groß ist, stellt dieser Abschnitt einen Auszug weit verbreiteter Ansätze dar. Darüber hinaus ist zu beachten, dass hier lediglich Ansätze aufgeführt sind, die eine Bewertung des gesamten Assistenzsystems zum Ziel haben. Die technische Bewertung einzelner Teilfunktionen eines Assistenzsystems hängt stark von der Funktionalität selbst ab, sodass die Auswahl der Methoden Einzelfallentscheidungen sind und deren Spektrum nur schwer abgebildet werden kann. Sie werden daher aus der Betrachtung ausgeklammert.

In Anlehnung an [200] werden drei wesentliche Evaluierungstypen definiert:

1. **Kurzzeitige Exposition zum Vergleich mit anderen Arten der Informationsbereitstellung:** Bei diesem Evaluierungstyp werden die Auswirkungen der Informationsbereitstellung durch ein Assistenzsystem im Vergleich zu herkömmlichen Medien wie Papier oder Bildschirm (Kontrollgruppen) auf eine prozedurale Tätigkeit untersucht. Ebenso kann der Einfluss verschiedener Arten der Informationsbereitstellung im Assistenzsystem (z. B. Augmented-Reality-Brillen, Projektoren) im Vergleich zueinander und/oder zu einer der genannten Kontrollgruppen evaluiert werden.
2. **Kurzzeitige Exposition zum Vergleich von Darstellungsalternativen:** Dieser Evaluierungstyp konzentriert sich auf die Bewertung verschiedener Darstellungsformen, z. B. Bilder versus Text, unter Verwendung einer Technologie des Assistenzsystems, um Rückschlüsse auf deren Einfluss zu erhalten.
3. **Langzeitexposition zur Untersuchung des Lernprozesses:** Charakteristisch für diesen Evaluierungstyp ist, dass im Gegensatz zu den vorhergehenden Typen Messwiederholungen durchgeführt werden, d. h. eine bestimmte Versuchsperson führt die Tätigkeit mehrfach (>1) unter gleichbleibenden Bedingungen durch. Dieser Typ ist vor allem für Trainingssysteme relevant, da sich mit dieser Vorgehensweise z. B. die Auswirkungen verschiedener Gestaltungsalternativen von Instruktionen auf den Lerneffekt von Versuchsgruppen evaluieren lassen.

Bei allen Evaluierungstypen werden Versuchsreihen durchgeführt, in denen mit unterschiedlichen Methoden Daten zu den definierten Evaluationsgegenständen erhoben werden. So könnten beispielsweise beim ersten Evaluierungstyp – dem Vergleich eines Assistenzsystems mit herkömmlichen Medien – als Evaluationsgegenstände sowohl Aspekte der subjektiven Wahrnehmung seitens der Nutzenden als auch objektiv messbare Merkmale der Aufgabenbewältigung dienen, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Informationsbereitstellung zu untersuchen. Diese Evaluationsgegenstände können entsprechend der zugrundeliegenden Dimension in die folgenden drei Kategorien eingeteilt werden: Nutzende Person, Prozess und Kosten. Eine Übersicht der im Forschungsfeld gebräuchlichen Evaluationsgegenstände sowie der zugehörigen Erhebungsmethoden ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Im Folgenden werden etablierte Methoden vorgestellt, die aufgrund ihrer Validität und häufigen Anwendung in der Literatur als relevant erachtet werden.




Ziel	Dimension	Evaluations-gegenstand	Methoden
Gesamthafte System-bewertung	Nutzende Person 	Akzeptanz	Technology Acceptance Model (TAM) Semistrukturierte Interviews
		Gebrauchstauglichkeit	System Usability Scale (SUS)
		Wahrgenommene Arbeitsbelastung	NASA-Task Load Index (NASA-TLX)
		Benutzererlebnis (UX)	User Experience Questionnaire (UEQ)
		Wohlbefinden	Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)
	Prozess 	Qualität	Human Error Probabilities (HEPI) General Assembly Task Model (GATM)
		Durchlaufzeit	Methods-Time Measurement (MTM) General Assembly Task Model (GATM)
			Arbeitsproduktivität (AP)
	Kosten 	Wirtschaftlichkeit	Return On Investment (ROI)
			Amortisationszeit
			Total Cost of Ownership (TCO)

Abbildung 2.8: Evaluation von Assistenzsystemen aufgeteilt in Dimensionen, deren Evaluationsgegenstände und damit zusammenhängenden Methoden auf Basis von [201], [202].

Zur **Erfassung der subjektiven Wahrnehmung** von Personen, die ein Assistenzsystem benutzen, kommen in der Regel standardisierte Fragebögen oder in

selteneren Fällen Interviews [203] mit unterschiedlichen Strukturierungsgraden [204] zum Einsatz.

Auf diese Weise erfolgt die Erfassung der Akzeptanz im Technology Acceptance Model (TAM) [205] über Fragebögen, die auf die beiden zentralen Konstrukte des Modells ausgerichtet sind: die wahrgenommene Nützlichkeit (Perceived Usefulness, PU) und die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (Perceived Ease of Use, PEOU). Diese Fragebögen enthalten Aussagen oder Items, zu denen die Befragten ihre Zustimmung oder Ablehnung bezüglich einer spezifischen Technologie auf einer Likert-Skala ausdrücken, die oft von „stimme stark zu“ bis „lehne stark ab“ reicht. Die spezifischen Items messen, wie sehr Benutzende glauben, dass die Nutzung einer bestimmten Technologie ihre Arbeitsleistung verbessern wird (PU) und wie frei von Anstrengung die Nutzung dieser Technologie sein wird (PEOU). Das Modell basiert auf der Annahme, dass die Akzeptanz einer Technologie hauptsächlich durch diese zwei Bestimmungsgrößen beeinflusst wird. Um seine Aussagekraft und Anwendungsbreite zu erhöhen, hat das TAM seit seiner Einführung verschiedene Weiterentwicklungen erfahren [206]. Diese Erweiterungen integrieren zusätzliche Variablen und Konzepte, um die Akzeptanz von Technologien in unterschiedlichen Kontexten besser nachvollziehbar zu machen [207], [208], [209].

Die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit (Usability) erfolgt ebenfalls überwiegend mit Fragebögen, wobei der System Usability Scale (SUS) [210] die dominierende Methode zur Messung darstellt. Hier werden 10 Items auf einer 5-Punkt-Likert-Skala von den Nutzenden bewertet. Die Items sind alternierend positiv und negativ formuliert, um Antwortverzerrungen entgegenzuwirken. Die Auswertung des SUS erfolgt durch eine spezifische Transformation der Rohdaten, wobei die Skala von 0 bis 100 adjustiert wird (Formel 2.1). Es ist zu betonen, dass der resultierende SUS-Wert nicht als prozentuale Angabe interpretiert werden sollte, sondern als ordinaler Wert, der die relative Positionierung der Gebrauchstauglichkeit eines Systems ermöglicht. Ein Wert über 70 wird nach [211] als überdurchschnittlich angesehen, während Werte darunter auf eine unterdurchschnittliche Gebrauchstauglichkeit hinweisen. Obwohl der SUS eine breite Anwendung in der Gebrauchstauglichkeitsforschung findet, ist er nicht als umfassendes Maß der Nutzung zu verstehen. Die Gebrauchstauglichkeit wird hier eindimensional auf einer linearen Skala abgebildet, wodurch sie stark vereinfacht dargestellt wird.

$$SU = \frac{100}{40} \cdot \left[\sum_{i \in \{1,3,5,7,9\}} (W_i - 1) + \sum_{j \in \{2,4,6,8,10\}} (5 - W_j) \right] \quad (2.1)$$

In vielen Fällen wird der SUS mit anderen fragebogengestützten Methoden kombiniert, wie z. B. dem NASA Task Load Index (NASA-TLX) zur Erfassung der wahrgenommenen Arbeitsbelastung [212]. Der NASA-TLX geht im Gegensatz zum SUS von einer mehrdimensionalen Sichtweise des Evaluationsgegenstandes aus. Dazu gliedert sich der Fragebogen in die Bewertung und anschließende Gewichtung von sechs zentralen Faktoren der Arbeitsbelastung: mentale, physische und zeitliche Anforderungen, Leistung, Anstrengung und Frustrationsniveau. Um aus den ermittelten Werten zu den genannten Faktoren eine Interpretation abzuleiten, wird häufig die von [213] vorgestellte Ordinalskala verwendet, die die Werte in Form von niedriger bis sehr hoher Arbeitsbelastung sortiert (Tabelle 2.1).

Arbeitsbelastung	Wert
Niedrig	0-9
Mittel	10-29
Etwas hoch	30-49
Hoch	50-79
Sehr hoch	80-100

Tabelle 2.1: Die Interpretation der NASA-TLX-Werte nach [213].

Weitere Verfahren zur Erfassung der subjektiven Wahrnehmung einer Testperson sind beispielsweise der User Experience Questionnaire (UEQ), der neben pragmatischen Aspekten der Gebrauchstauglichkeit auch „hedonistische“ Aspekte (z. B. Stimulation, empfundene Originalität) berücksichtigt [214]. Daneben existieren technologiespezifische Fragebögen wie der Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [215] bzw. dessen Weiterentwicklung der Augmented Reality Sickness Questionnaire (ARSQ) [216], die beim Gebrauch von Mixed-Reality-Technologien in Assistenzsystemen zum Einsatz kommen.

Die **Erfassung objektiver, prozessbezogener Evaluationsgegenstände** konzentriert sich insbesondere auf den Zeitaufwand sowie die erreichte Produktqualität beim Einsatz von Assistenzsystemen. Ein Instrument zur gemeinsamen Bewertung dieser Aspekte bietet das General Assembly Task Model (GATM) [217], [218]. Das GATM zerlegt den Montageprozess in einzelne Aufgaben und Teilaufgaben. Diese Zerlegung ermöglicht es, jeden Schritt genau zu betrachten und zu analysieren. So kann festgestellt werden, auf welchen Teilprozess sich das Assistenzsystem im Vergleich zur Kontrollgruppe positiv oder negativ in Bezug auf Zeitbedarf und Fehlerrate auswirkt. Alternativ kann diese Dekomposition auch mit Methoden aus der Montageplanung wie der Methods-Time Measurement (MTM) [219] erfolgen,

die ebenfalls eine standardisierte Zerlegung einer Montageaufgabe in elementare Bewegungen, sogenannte Primitive (z. B. Greifen, Bewegen, Drehen, Loslassen), erlaubt.

Neben den Dimensionen, die sich direkt aus der Gestaltung und dem Einsatz eines Assistenzsystems ergeben, ist aus Sicht der industriellen Anwendbarkeit insbesondere eine **Bewertung der Kosten** erforderlich. Diese stehen zwangsläufig in Wechselwirkung mit den dargestellten Prozesskennzahlen. Nur ein Assistenzsystem, das entweder Fehler vermeidet oder die Produktivität steigert, kann einen wirtschaftlichen Vorteil bringen. Typische Kennzahlen zur Bewertung einer solchen Investition sind hier beispielsweise der Return On Investment (ROI) oder die Amortisationszeit [201] sowie die Total Cost of Ownership (TCO) [220].

2.2 Stand der Forschung

Zur Darstellung und Analyse des Forschungsstandes gliedert sich dieser Abschnitt in vier Unterabschnitte. Einleitend werden im Abschnitt 2.2.1 aktuelle Forschungsrichtungen im Bereich der Assistenzsysteme dargestellt und auf Basis der vorliegenden Rahmenbedingungen der für diese Arbeit relevante Fokus identifiziert. Im folgenden Abschnitt 2.2.2 wird ein Modellierungsansatz vorgestellt, der die technischen Lösungsbausteine beschreibt, die zusammen ein Assistenzsystem bilden. In der anschließenden Analyse des Forschungsstandes (Abschnitt 2.2.3) dienen diese Bausteine zur Kategorisierung von Forschungsarbeiten. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine zielgerichtete Analyse von Lösungsansätzen zu den einzelnen Bausteinen. Die Analyse mündet in den Abschnitt 2.2.4, in dem die identifizierten Forschungslücken zusammengefasst werden, um daraus konkrete Ziele und Vorgehensweisen für die weitere Entwicklung abzuleiten.

2.2.1 Aktuelle Forschungsrichtungen und Identifikation des relevanten Fokus

Das Forschungsfeld der Assistenzsysteme zeichnet sich durch eine ausgeprägte Interdisziplinarität aus, was sich in der Vielfalt der Forschungsansätze widerspiegelt. Neben zentralen ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen sind unter anderem Arbeiten zu rechtlichen [221] oder arbeitsphysiologischen [222] Aspekten zu nennen. Ingenieurwissenschaftliche Forschungsarbeiten adressieren ein spezifisches Anwendungsgebiet. Neben der Produktion, die den Schwerpunkt dieser Arbeit dar-

stellt, finden sich zahlreiche Forschungsarbeiten, die sich mit der Unterstützung anderer Organisationseinheiten befassen. Beispielhaft seien hier Arbeiten im Bereich der Prozessplanung [5], [223], [224], [225], [226], der Logistik [227], [228], [229] oder der innerbetrieblichen Instandhaltung [230], [231] genannt. Außerhalb des Produktionsbetriebs findet sich aufgrund der Komplexität der Prozesse eine Vielzahl von Forschungsarbeiten zum Einsatz von Assistenzsystemen im Bereich der Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) [230], [232], [233], [234], [235], [236]. Angesichts der besonderen Bedeutung von Prüfungen bzw. Inspektionen als integraler Bestandteil der Prozesskette der MRO [237] sind diese Arbeiten trotz ihrer Ferne zum Produktionsprozess für die nachfolgenden Untersuchungen von Bedeutung.

Diese breite Fächerung unterstreicht die Notwendigkeit einer klaren Fokussierung für die Analyse des Forschungsstandes im Rahmen dieser Arbeit. Der Ausgangspunkt ist die in Abschnitt 1.4 abgeleitete übergeordnete Zielsetzung. Diese besteht in der Befähigung von Assistenzsystemen für die Prüfung von Großbauteilen in der Flugzeugproduktion durch die Identifikation und Entwicklung von technischen Lösungskomponenten. Aufbauend auf diesem Ziel wird daher im Folgenden die für diese Dissertation primär relevante Forschungsrichtung identifiziert und der Fokus für die Analyse des Forschungsstandes festgelegt. Im Mittelpunkt stehen dabei Forschungsarbeiten, die sich mit dem Entwurf, der Entwicklung und der Evaluation spezifischer technischer Komponenten von Assistenzsystemen befassen. Besondere Relevanz haben solche Arbeiten, die im Kontext der Produktion oder der MRO für manuelle Prozesse an komplexen Bauteilen eingesetzt werden oder dorthin übertragbar erscheinen, da hier ähnliche Herausforderungen wie in der Flugzeugproduktion vorliegen können.

Eine isolierte Betrachtung rein technologiezentrierter Arbeiten an einzelnen Komponenten ist jedoch allein nicht zielführend. Für die Forschungsanalyse und den darauf aufbauenden Entwurf neuartiger Assistenzsystemkomponenten ist es ebenso notwendig, auf methodisches Wissen zum systemischen Verständnis aus der aktuellen Literatur zurückzugreifen. Um die Analyse der relevanten Forschungsarbeiten innerhalb der identifizierten Forschungsrichtung methodisch zu strukturieren und eine umfassende Betrachtung der technischen Lösungskomponenten zu gewährleisten, wird im folgenden Abschnitt ein Modellierungsansatz vorgestellt. Dieses Modell zerlegt ein Assistenzsystem in einzelne, handhabbare Komponenten. Diese Komponenten bilden die Grundlage für eine systematische und detaillierte Analyse der relevanten Forschungsarbeiten im Abschnitt 2.2.3.

2.2.2 Das Human Activity Assistive Technology-Modell

In der Literatur lassen sich nur sehr begrenzt Ansätze speziell zur Modellierung von Assistenzsystemen und der darin vorkommenden Elemente auffinden. In verwandten bzw. übergeordneten Forschungsbereichen, in denen ebenfalls Mensch-Maschine-Systeme im Fokus stehen, seien an dieser Stelle Arbeiten aus der Aktivitätstheorie [238], [239], der menschenzentrierten Gestaltung [240], der Entwicklung kognitiver [241] und sozio-technischer Systeme [242] genannt.

Für die Analyse und Strukturierung der technischen Komponenten von Assistenzsystemen in dieser Arbeit wird das Human Activity Assistive Technology (HAAT)-Modell nach Cook [243] herangezogen und vorgestellt (Abbildung 2.9). Dieses Rahmenwerk eignet sich besonders, da es sowohl zur Analyse als auch für den Gestaltungsprozess von Systemen mit assistiven Technologien verwendet werden kann. In seiner ursprünglichen Anwendung zielt es auf die methodische Entwicklung von Assistenzsystemen für Menschen mit Behinderungen ab, um deren Teilhabe am täglichen Leben zu erleichtern. Dementsprechend sind adressierte Lösungen beispielsweise Rollstühle, Prothesen oder Computerzugangshilfen. Das Modell basiert auf der Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen den vier wesentlichen Elementen: Mensch (Human), Aktivität (Activity), Assistenztechnologie (Assistive Technology) sowie dem Kontext (Context). Dieser komponentenbasierte Ansatz ist prinzipiell entkoppelt von dem tatsächlichen Anwendungsszenario, weshalb er auch von vielen Forschenden für Assistenzsysteme in der Produktion bzw. MRO angewendet [233], [244], [245] und explizit für diesen Zweck weiterentwickelt [246] wurde.

Die folgende Beschreibung der vier Hauptkomponenten folgt [243] und wird durch Anmerkungen zur Übertragbarkeit auf die manuelle Montage ergänzt:

1. **Mensch:** Diese Komponente bezieht sich auf den Nutzenden der assistiven Technologie. Ausgehend von kognitiven, physischen, sozialen oder emotionalen Faktoren wird eine Abschätzung der spezifischen Fähigkeiten und der damit zusammenhängenden Bedürfnisse getroffen. In der Vorgehensweise nach Cook ist es von zentraler Bedeutung, diese Analyse zu Beginn jeder Entwicklung eines Assistenzsystems durchzuführen, um eine Zentrierung auf die Nutzenden sicherzustellen.

Aus Sicht der Montage eignet sich hier beispielsweise die Betrachtung der Kompetenz eines Mitarbeitenden. Ausgehend von [247] definiert Keller dafür den Begriff der Kompetenz als „die Fähigkeit vorhandenes Wissen und Fertigkeiten in

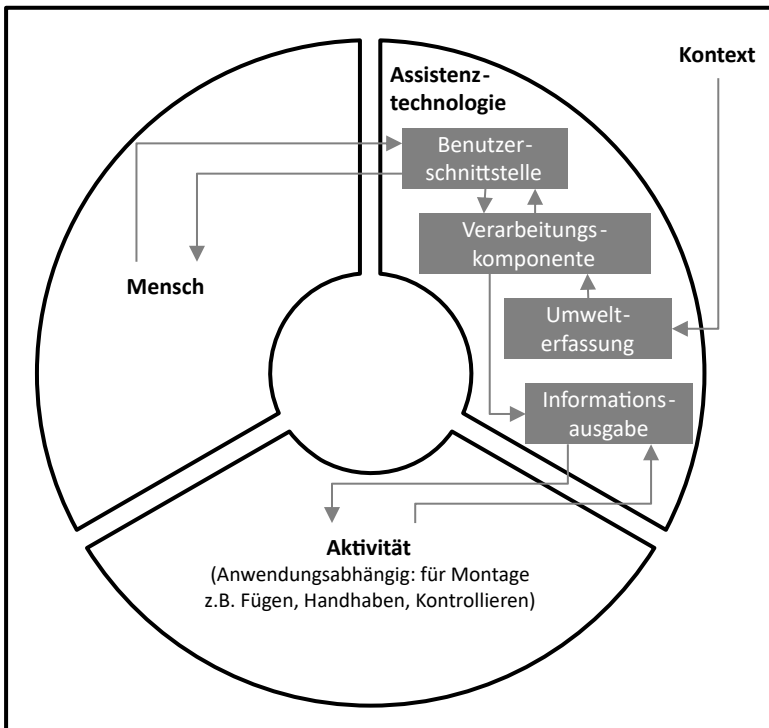


Abbildung 2.9: Das Human Activity Assistive Technology-Modell in Anlehnung an [243], [245].

einem spezifischen Kontext zur Bewältigung einer Arbeitsaufgabe zu kombinieren und anwenden zu können“ [183]. Dabei wird der Umgang mit Betriebsmitteln (z. B. Werkzeuge oder Messmittel) als Mindestanforderung zur Durchführung einer Aufgabe gesehen. Darauf aufbauend zählen Kenntnisse zu dem spezifischen (Montage-)Prozess als Teil der Handlungskompetenz eines Mitarbeitenden. In Abhängigkeit von den ermittelten Kompetenzen werden die Mitarbeitenden oftmals gemäß Stufenmodellen eingeteilt, wie beispielsweise nach [248] oder [249]. Da Assistenzsysteme in der Industrie nicht personenindividuell entwickelt werden, nutzt man diese Stufen für die Festlegung von Nutzungsgruppen. Anhand dieser kann dann der Assistenzbedarf der jeweiligen Nutzungsgruppe (z. B. Mitarbeitende mit keiner, wenig oder viel Vorerfahrung) abgeleitet und auf diese zugeschnittene Funktionalitäten angeboten werden [250].

2. **Aktivität:** Diese Komponente betrachtet die spezifischen Aufgaben oder Tätigkeiten, die der Benutzende durchführen möchte oder muss. Von Cook werden an dieser Stelle alltägliche Aktivitäten wie Essen, Anziehen, Arbeiten oder Freizeitaktivitäten genannt. Ziel ist es, zu verstehen, wie assistive Technologien diese Aktivitäten unterstützen oder ermöglichen können.

Für die Assistenz innerhalb der Montage ist ein tiefgehendes Verständnis des adressierten Prozesses essenziell. In Abschnitt 2.1.1.1 wurde hier auf die Bandbreite der unterschiedlichen Tätigkeiten der Montage eingegangen und der Prozess Typ Prüfen in Abschnitt 2.1.1.2 ausdetailliert. Neben dem grundsätzlichen Typ des zu unterstützenden Prozesses ist auch die Prozesskomplexität entscheidend für die Auslegung eines Assistenzsystems [251]. Merkmale für einen komplexen Prozess sind nach [183], [252], [253] unter anderem die Anzahl unterschiedlicher Bauteile, Produktvarianten oder Montageschritte an einem Arbeitsplatz.

3. **Kontext:** Nach Cook bezieht sich die Komponente Kontext im Wesentlichen auf die Umgebung, in der die assistive Technologie verwendet wird. Dies kann die physische Umgebung (z. B. Zuhause, Arbeitsplatz, Schule), die soziale Umgebung (z. B. Familie, befreundete Personen) sowie kulturelle und politische Umgebung einschließen.

Allerdings stellt die Sichtweise von Cook nur eine begrenzte Wiedergabe der Aspekte dar, die allgemein in Publikationen im Zusammenhang mit interaktiven, menschenzentrierten Systemen Beachtung finden. Zunächst sei an dieser Stelle auf die Vielzahl der unterschiedlichen Definitionen für den Begriff „Kontext“ hingewiesen [254], [255], [256]. Aufgrund der Übertragbarkeit auf das Feld der Montage wird für diese Arbeit die Definition nach [257] gewählt. Der Kontext besteht hier aus jeder Information, die zur Charakterisierung der Situation einer Entität verwendet werden kann, wobei eine Entität eine Person, ein Ort oder ein physisches oder digitales Objekt sein kann. Verwendet man diese Definition im Rahmen der manuellen Montage, wie beispielsweise [186], kann der Kontext Informationen über Entitäten wie den Arbeitsplatz (Ort), den ausführenden Mitarbeitenden (Person), Produkte und Bauteile (physische Objekte) oder auch Prozesse [258] umfassen. Die Fähigkeit eines Assistenzsystems, den Kontext zu erfassen und auf dieser Grundlage aufgabenrelevante Informationen oder Dienste bereitzustellen, wird als Kontextsensitivität bezeichnet [257].

4. **Assistenztechnologie:** Diese Komponente umfasst die funktionalen Systemelemente, die für die Umsetzung der Unterstützung notwendig sind. Cook teilt diese Komponente nochmals in vier Unterkomponenten (Benutzerschnittstelle, Umwelterfassung, Verarbeitungskomponente, Informationsausgabe) auf, deren Zusammenspiel in der Abbildung 2.9 dargestellt ist. Die Assistenztechnologie gliedert sich in:

- **Benutzerschnittstelle:** Mithilfe der Benutzerschnittstelle wird eine bidirektionale Kommunikation zwischen dem Assistenzsystem und dem Nutzenden realisiert. Durch eine Kombination von Ein- und Ausgabegeräten können so Eingaben des Nutzenden, z. B. über Tastaturen, aufgenommen werden und Informationen, z. B. über Bildschirme, präsentiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt weniger auf der Interaktion des Menschen mit dem System, sondern vielmehr auf der Eingabe von Informationen in das System. Zur Erfüllung der Montage- bzw. Prüfaufgabe steht die Dokumentation der Ergebnisse, z. B. der erfassten Messwerte, im Mittelpunkt. In diesem Zusammenhang sind alle an das System angebotenen (digitalen) Prüfmittel als Teil der Benutzerschnittstelle zu verstehen. Um eine Verwechslung mit der reinen Systeminteraktion, z. B. dem Einloggen des Benutzers, zu vermeiden, erfolgt eine explizite terminologische Unterscheidung zwischen Interaktion und Informationseingabe sowie der zugehörigen **Informationseingabekomponente**.

- **Umwelterfassung:** Diese Komponente stellt die Schnittstelle zur Außenwelt des Assistenzsystems dar. Kontextbezogene Informationen aus der direkten Umgebung des Assistenzsystems ermöglichen in vielen Fällen eine situationgerechte Anpassung der Funktionen des Assistenzsystems.

Dies entspricht der in der Komponente Kontext angesprochenen Kontextsensitivität eines Assistenzsystems. Aus dem zugrundeliegenden Kontext, in dem ein Assistenzsystem in der Montage eingesetzt wird, ergibt sich eine Menge von Entitäten und Informationen über diese Entitäten. Da sich diese Informationsbasis in vielen Fällen im Laufe der Zeit ändert, stellt die Umwelterfassung Funktionen bereit, um diese Änderungen zu registrieren.

- **Verarbeitungskomponente:** Das Verhalten des Assistenzsystems wird zentral über die in der Verarbeitungskomponente hinterlegten Zustände und damit assoziierten Aktionen bestimmt. Auf diese Weise werden Eingaben zu geeigneten Befehlen für die Informationsausgabe gewandelt. Die Verarbei-

tungskomponente kann dabei in Abhängigkeit von der zu unterstützenden Tätigkeit einfache Funktionen, wie das Ein- und Ausschalten eines Geräts, umfassen oder komplexe Berechnungen und Entscheidungsfindungen beinhalten. Die Leistungsfähigkeit der Verarbeitungskomponente bestimmt maßgeblich, wie flexibel die Assistenztechnologie in ihrem Verhalten gesteuert werden kann.

Bei der Assistenz in der Montage leitet sich das Systemverhalten im Wesentlichen aus dem Prozessablauf ab. So ergeben sich für einen spezifischen Montageprozess beispielsweise unterschiedliche unterstützende Informationsinhalte, die dem Nutzenden zur Verfügung gestellt werden. Anders als in der Produktionsautomatisierung werden hier eher selten herkömmliche Steuerungs- und Regelungskomponenten (z. B. eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)) eingesetzt. Grund hierfür ist, dass die verwendeten Ein- und Ausgabegeräte oftmals ihren Ursprung im Verbraucherbereich haben und dementsprechend andere Schnittstellenkonzepte bedienen.

- **Informationsausgabe:** Die Informationsausgabe stellt aktivitätsbezogene Unterstützungsfunktionen zur Verfügung, die durch die Kopplung mit der Verarbeitungskomponente bei Bedarf aufgerufen werden. Je nach Art und Ziel der Unterstützung kann sich diese in unterschiedlichen Formen äußern. Für Menschen, die aufgrund einer kognitiven Beeinträchtigung Schwierigkeiten haben, Informationen von einem Bildschirm zu erfassen, nennt Cook hier entsprechende Audioausgaben als mögliche Informationsausgabe. Die Funktionen der Informationsausgabe sind durch ihren direkten Einfluss auf die Tätigkeit gekennzeichnet, sodass ihre Gestaltung entscheidend für den erfolgreichen Einsatz ist.

Im Kontext der Montage stellt die Gestaltung dieses Elements einen Forschungsschwerpunkt dar, welcher in Abschnitt 2.2.3 näher erläutert wird. Im Zuge dessen werden vor allem unterschiedliche Arten der Informationsbereitstellung untersucht (Abschnitt 2.1.2.3), um deren Einfluss auf den Montageprozess miteinander zu vergleichen.

Anzumerken ist jedoch, dass die Ausgabegeräte zur Realisierung der Assistenzfunktionalität dabei nicht immer von denen der Benutzerschnittstelle unterscheidbar sind. Dient ein Bildschirm beispielsweise zur Aufnahme und Visualisierung einer Eingabe, trägt dabei aber nicht zur Unterstützung der Tätigkeitsdurchführung bei, ist dieser eindeutig der Benutzerschnittstelle zuzuordnen. Wird derselbe Bildschirm für die Darstellung von Informationen

zur Prozessreihenfolge bei einer variantenreichen Montage genutzt, gehört er ebenso zur Komponente der Informationsausgabe.

2.2.3 Analyse des Forschungsstandes

Dieser Abschnitt zielt auf die Analyse des aktuellen Forschungsstandes zu Assistenzsystemen vor dem Hintergrund der Anforderungen aus der Anwendungsdomäne ab. Dabei werden verschiedene Lösungsansätze vorgestellt, diskutiert und vorliegende Defizite herausgestellt. Diese dienen als Grundlage zur Ableitung der konkretisierten Zielsetzungen und damit der weiteren Inhalte dieser Arbeit.

Hierfür gliedert sich der Abschnitt nochmals in verschiedene Unterabschnitte. Zunächst wird der Betrachtungsbereich der Anwendungsdomäne stärker eingegrenzt, um die daraus resultierenden Anforderungen zu schärfen (Abschnitt 2.2.3.1).

Die anschließenden Abschnitte basieren auf einer Clusterung bestehender Forschungsarbeiten auf der Grundlage des HAAT-Modells (Abschnitt 2.2.2). Jede zu diskutierende Arbeit wird entsprechend ihrem Themenschwerpunkt einer der vier Unterkomponenten der Assistenztechnologie zugeordnet: Informationseingabe (als Teil der Benutzerschnittstelle), Verarbeitungskomponente, Umwelterfassung und Informationsausgabe. Diese methodische Herangehensweise ermöglicht eine präzisere Analyse und Diskussion, indem sie Assistenzsysteme in klar definierte Segmente unterteilt, was eine zielgerichtete Untersuchung der aktuellen wissenschaftlichen Beiträge zu den jeweiligen Komponenten erleichtert.

Zusätzlich zu den vier Clustern, die sich aus dem HAAT-Modell ergeben, wird ein fünftes, eigenes Cluster mit der Bezeichnung „Gesamtsystem“ definiert. Damit können Publikationen klassifiziert werden, die in ihren Untersuchungen mehrere Komponenten gleichwertig adressieren und solche, die sich auf deren Kombination konzentrieren. Speziell für diese Arbeit sind Lösungsansätze zur effizienten Vernetzung und Orchestrierung einzelner Komponenten von Interesse. Denn die in diesem Abschnitt verfolgte komponentenbasierte Betrachtung nach dem HAAT-Modell ist nur dann sinnvoll, wenn Möglichkeiten bestehen, diese Komponenten zu einer funktionierenden Gesamtlösung zu synthetisieren und in bestehende (betriebliche) Infrastrukturen zu integrieren.

Bei der Sichtung der Literatur für die einzelnen, im HAAT-Modell abgeleiteten Cluster zeigte sich, dass spezifische Lösungsansätze für assistierte Prüfprozesse bisher nur innerhalb des Clusters Informationseingabe vorhanden sind. Um für die übrigen Cluster (Verarbeitungskomponente, Umwelterfassung, Informationsausgabe, Gesamtsystem) dennoch eine fundierte Analysebasis zu schaffen, wird die

Betrachtung hier um relevante Lösungsansätze aus den Anwendungsfeldern der Fügeprozesse und der MRO erweitert.

In den folgenden Abschnitten (2.2.3.2 bis 2.2.3.6) wird für jedes dieser fünf Cluster systematisch untersucht, inwiefern die jeweils identifizierten Ansätze – ob originär für Prüfungen, Fügen oder MRO entwickelt – Potenzial für die Assistenz bei geometrischen und visuellen Prüfungen im Flugzeugbau bieten und wie ihre Übertragbarkeit auf die spezifischen Anforderungen dieser Domäne zu bewerten ist.

2.2.3.1 Spezifikation der Anwendungsdomäne

Um aktuelle Lösungsansätze aus der Wissenschaft hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit für die zugrundeliegende Anwendungsdomäne – Prüfprozesse an Großbauteilen in der Flugzeugproduktion – bewerten zu können, erfolgt in diesem Abschnitt zunächst eine Präzisierung der diese Domäne bestimmenden Charakteristika. Diese Charakteristika werden sowohl aus den spezifischen Eigenschaften der Produkte (produktseitig) als auch aus den etablierten Abläufen der Prüfung (prozesseitig) im Flugzeugbau abgeleitet (Abschnitte 1.3 und 2.1) und bestimmen die grundlegenden Anforderungen an zu entwickelnde Assistenzsystemkomponenten maßgeblich mit.

- **Produktseitig:** Die in dieser Arbeit betrachteten Produkte sind Großbauteile aus dem Flugzeugbau. Sie zeichnen sich durch große Abmessungen aus. Daher können sie innerhalb der Fabrik von Menschen nicht ohne Hilfsmittel bewegt werden und befinden sich an den Arbeitsstationen in der Regel in Vorrichtungen. Eine Besonderheit ist die häufig anzutreffende Baustellen- bzw. Werkstattmontage, bei der oftmals mehrere Personen Montagearbeiten an einem stationären Produkt durchführen. Der Bedarf an Arbeitsfläche ist sowohl durch die Produktabmessungen als auch durch die Produktionsform stark erhöht. Als sicherheitskritisches System unterliegt das Flugzeug strengen Vorschriften sowie umfangreichen Prüfanforderungen. Die Vielzahl verbauter Komponenten bringt zahlreiche spezifische Prüfmerkmale mit sich – und damit einen entsprechend großen Prüfaufwand im Produktionsprozess.
- **Prozesseitig:** Wie im Abschnitt 1.3 dargestellt, wird ein erheblicher Teil der Prüfprozesse manuell durchgeführt. Die manuelle Prüfung im Flugzeugbau umfasst dabei eine große Bandbreite an Verfahren. Eine vollumfängliche Entwicklung von Assistenzlösungen für dieses gesamte Spektrum wäre im Rahmen einer einzelnen Arbeit kaum realisierbar, insbesondere da die systematische Ablei-

tung von Anforderungen für Assistenzsysteme für den Prozesstyp Prüfen selbst in der Forschung bisher wenig Beachtung fand – mit Ausnahme einzelner Arbeiten zu Teilaspekten der Sichtprüfung (Informationseingabe).

Eine strategische Fokussierung auf repräsentative Prüfarten ist daher für die Untersuchung von Unterstützungspotenzialen durch Assistenzsystemkomponenten geboten. Die Auswahl konzentriert sich auf **die Sichtprüfung und die Geometrieprüfung**. Deren Relevanz für die Flugzeugproduktion (Abschnitte 1.3 und 2.1.1.2) ergibt sich zum einen aus ihrer häufigen Anwendung: Obwohl einzelne Prüfvorgänge nicht immer mit erheblichem Zeitaufwand verbunden sind, entfalten sie durch ihre hohe Frequenz eine beträchtliche wirtschaftliche und sicherheitsrelevante Gesamtwirkung. Zum anderen zeichnen sich gerade diese Prüfarten durch signifikante manuelle Prozessanteile aus, die ein großes Potenzial für Optimierungen durch die Entwicklung von Assistenzkomponenten bieten. Die Konzentration auf diese Schlüsselprüfarten, stellvertretend für subjektive und objektive Prüfungen, schafft somit eine Basis für die Entwicklung spezifischer Lösungskomponenten in dieser Arbeit sowie für zukünftige Assistenzlösungen in diesem Bereich.

2.2.3.2 Lösungsansätze für die Informationseingabe

Vor der Betrachtung konkreter Lösungsansätze ist zunächst zu spezifizieren, was Informationseingabe in der Anwendungsdomäne bedeutet und inwieweit diese Tätigkeit unterstützt werden kann. Die Erfassung und Dokumentation von Informationen über den Prüfling durch verschiedene Prüfprozesse stellt den Kerninhalt der Prüfaufgabe dar. Daher kommt diesem Bereich eine besondere Bedeutung zu. Je nach betrachtetem Prüfverfahren unterscheiden sich Umfang und Art der erfassten Informationen erheblich. Sichtprüfungen werden z. B. häufig durch Fotomaterial und Beschreibungen der fehlerhaften Stellen am Bauteil dokumentiert und besitzen demnach eher einen qualitativen Charakter. Im Gegensatz dazu werden die wesentlichen Informationen bei geometrischen Prüfungen durch quantitative Daten wie z. B. Längenangaben beschrieben. Unabhängig von der genauen Ausgestaltung zeigt sich, dass das Unterstützungspotenzial hier vornehmlich in der Bereitstellung von Funktionen zur „Dokumentation“ (Abbildung 2.7) liegt. Davon ausgehend werden im Folgenden die in der Literatur vorhandenen Ausprägungen dieser Assistenzfunktion näher diskutiert.

Bei den Lösungsansätzen für **Sichtprüfungen** können diese nach dem Grad der Beteiligung des Personals am Prozess der Informationserfassung eingeteilt werden.

Dabei ist zu unterscheiden zwischen Lösungen, bei denen das Personal lediglich eine begleitende oder überwachende Funktion hat und solchen, bei denen das Wissen des Personals aktiv in den Prozess einfließt.

In Bezug auf die erste Kategorie sind insbesondere die Arbeiten von Ben Abdallah u. a. [259] und Hu u. a. [260] von Bedeutung. Für die Vollständigkeitsprüfung von Flugzeugen stellen Ben Abdallah u. a. [259] ein kamerabasiertes System vor, das entweder von einem Roboter oder einem Menschen geführt werden kann. Der Roboter ist für die Inspektion kleiner Bereiche geeignet, während das Tablet von einem Menschen zu schwer zugänglichen Bereichen des Bauteils bewegt werden kann. Die manuelle Version des Systems (Abbildung 2.10a) umfasst ein Tablet als Eingabegerät mit einer zusätzlich montierten industriellen HD-Kamera. In beiden Fällen wird zunächst das CAD-Modell des Bauteils geladen und anschließend eine Kantenanalyse durchgeführt, um die Vollständigkeit zu prüfen. Dafür vergleicht das System die Kanten des CAD-Modells mit den aus den aufgezeichneten Videos extrahierten Kanten des realen Prüflings. Eine zusätzliche merkmalsbasierte Lokalisierung des Tablets zum Prüfling ermöglicht die Eingrenzung und den Vergleich der relevanten Kanten. Eine vollständige Abdeckung des Bauteils wird durch eine a priori Generierung von Blickpunkten erreicht, zu denen der Mitarbeitende über Anweisungen auf dem Tablet geführt wird. Sind alle Bereiche des Prüflings erfasst, erstellt das System als Ergebnis einen Prüfbericht mit den fehlenden oder falsch montierten Komponenten. Hervorzuheben ist, dass der Prüfbericht ausschließlich aus Systeminformationen gespeist wird und der Mensch lediglich als mobile Einheit für das Tablet fungiert und nicht infolge seiner Fachkenntnisse in den Prozess eingebunden ist.

Aufbauend auf dieser Arbeit stellen Hu u. a. [260] einen Ansatz vor, der ebenfalls von einem CAD-Modell ausgeht und sowohl Lokalisierungs- als auch Navigationsfunktionen beinhaltet. Anstelle der kantenbasierten Erkennung wird Deep Learning (DL) eingesetzt, um fehlende Objekte zu erkennen. Der Anwendungsfall beschäftigt sich mit der Vollständigkeitsprüfung von Kabelschellen bei der Flugzeugmontage. Mithilfe des implementierten DL-Ansatzes erweist sich die Leistung der Objekterkennung in schwierigen Montageszenarien, wie z. B. bei hellen Lichtverhältnissen, als robuster. Anstelle eines Tablets wird ein Smartphone verwendet, das ebenfalls manuell geführt wird.

Neben den Ansätzen, bei denen der Mensch nur als „Bewegungseinheit“ für eine Kamera dient, stellen sowohl die Universität Kalabrien [261], [262], [263] als auch García-Pereira u. a. [264] Arbeiten zu Augmented-Reality-Lösungen für die visuelle Inspektion vor, die auf den gleichen Technologiekomponenten (CAD-Modell,

Tracking, Lokalisierung) basieren. Grundidee ist die Überlagerung des CAD-Modells mit dem realen Bauteil durch eine Applikation auf einem handgeführten Tablet (Abbildung 2.10b). So kann der Prüfende Abweichungen von den Konstruktionsdaten direkt erkennen und sie durch das Erzeugen von Punkten auf dem Objekt mithilfe von Ray-Casting-Funktionen annotieren. Die Annotationsmöglichkeiten sind durch Freifeldkommentare und Fotodokumentation realisiert. Damit bezieht das System das Fachwissen des Mitarbeitenden aktiv ein, um die erzeugten Punkte mit zusätzlichen Informationen anzureichern. Diese Anwendungen sind nicht auf die Vollständigkeitsprüfung beschränkt, da verschiedene Fehlerbeschreibungen in der Annotation gespeichert werden können. Die Anwendungsfälle sind im Falle der Universität Kalabrien Inspektionen von Rohrleitungen im Anlagenbau und bei García-Pereira u. a. [264] die Inspektion von Fertighäusern. Anders als bei den zuvor vorgestellten Lösungsansätzen setzen diese Publizierende nicht auf merkmalsbasierte, sondern auf markerbasierte Lokalisierungstechniken.



(a) Vollständigkeitsprüfung an einer Flugzeugturbinen basierend auf einer Tablet-Applikation [259].



(b) Sichtprüfung von Rohrverbindungen einer Anlage mithilfe überlagerter CAD-Modelle [262].

Abbildung 2.10: Lösungsansätze zur Assistenz von Sichtprüfungen.

Lösungsansätze zur Unterstützung der Informationseingabe bei **geometrischen Prüfungen** zeichnen sich im Wesentlichen dadurch aus, dass sie als handgeführte Hardwaresysteme mit integrierter Sensorik ausgeführt sind. Je nach adressierter Prüfaufgabe und angestrebter Auflösung variiert die Sensorik beispielsweise zwischen kamerabasierten Systemen [265], [266] und Laserscannern zur Aufnahme von 3D-Punktwolken [267], [268]. Die Auswertelgorithmen sind dabei ein wesentlicher Bestandteil des Assistenz- bzw. Messsystems, um aus den aufgenommenen Daten das eigentliche geometrische Merkmal zu extrahieren und mit Messwerten zu quantifizieren. Neben Ansätzen, die sich auf die digitale Datenerfassung konzentrieren, finden sich vereinzelt Arbeiten zur Unterstützung der Werkzeughandha-

bung. Wie im Abschnitt 2.1.1.3 aufgezeigt, hängt die Qualität der Messergebnisse häufig von der korrekten Handhabung durch den Menschen ab. So wird von Wang und Yan [269] ein Ansatz zur Winkelmessung während der Werkzeughandhabung vorgestellt, um dem Menschen ein Feedback zur Verbesserung der Handhabung zu geben und damit das Prozessergebnis abzusichern.

Obwohl in der Industrie derzeit analoge Messmittel wie Messschieber und Lehren den Standard darstellen, zeigen sich bei kommerziellen Anbietern Bestrebungen, diese zu digitalisieren und damit die Grundvoraussetzung für Assistenzanwendungen zur Dokumentation zu schaffen. Beispiele hierfür sind digitale Messschieber mit der Möglichkeit der drahtlosen Datenübertragung über Protokolle wie Bluetooth [270] oder die „GapGun“ [271], die über Laserliniensensorik flexibel für verschiedene Prüfaufgaben wie Spalt-, Bündigkeits- oder Winkelmessungen eingesetzt werden kann.

Zwischenfazit – Lösungsansätze für die Informationseingabe:

Es zeigt sich, dass sich die vorgestellten Arbeiten zur Sichtprüfung überwiegend mit der Nutzung von CAD-Modellen beschäftigen, die zumindest auf die Unterstützung, häufig aber auf die Automatisierung der Vollständigkeitsprüfung abzielen. Während beispielsweise in Marino u. a. [262] die Hinterlegung weiterer Fehlerklassen durch spezifische Annotationen möglich ist, fehlen dedizierte Dokumentationsfunktionen für ebendiese Fehlerklassen in der Sichtprüfung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass alle Arbeiten die Vollständigkeitsprüfung als Teilgebiet der Sichtprüfung als Entwicklungsgrundlage verwenden. Eine Ausarbeitung der Rahmenbedingungen (z. B. durch Prozessanalysen, Anforderungs- und Funktionsdefinitionen) für andere Fehler (z. B. Oberflächenschäden) und zugeschnittene Werkzeuge, die zu deren Dokumentation verhelfen, fehlen in der Literatur.

Allen Arbeiten ist gemeinsam, dass die entwickelten Anwendungen im Vordergrund stehen und die Technologieauswahl des eingesetzten Eingabegerätes eine untergeordnete Rolle spielt. Anders als im Abschnitt 2.2.3.5 aufgezeigt, gibt es für die Sichtprüfung keine begleitenden oder vergleichenden nutzungszentrierten Studien, die die Technologieentscheidungen für die darauf aufbauenden Entwicklungen untermauern. Es ist daher unklar, ob Tablets und Smartphones aus Nutzungssicht geeignete Geräte für diesen Prozess darstellen.

Im Bereich der geometrischen Prüfunterstützung ist festzuhalten, dass die aktuellen Lösungsansätze deutlich weiter fortgeschritten und weniger defizitär sind als im Bereich der Sichtprüfung. Sowohl noch in der Forschung befindliche als auch

kommerzielle Systeme ermöglichen durch adaptive Auswertelgorithmen eine umfassende Abdeckung verschiedener Prüfmerkmale bei gleichbleibender Sensorik. Damit erleichtern sie die digitale Dokumentation und tragen zur Ablösung traditioneller, papierbasierter Methoden bei und bieten gleichzeitig eine einfache Einstiegsmöglichkeit für Mitarbeitende, die neuen Technologien skeptisch gegenüberstehen könnten.

Zusammenfassend lässt sich für die Lösungsansätze zur Informationseingabe bei geometrischer und Sichtprüfung festhalten: Obwohl einige Arbeiten durch die Verwendung von Flugzeugkomponenten als Anwendungsbeispiel oder den Fokus auf Produkte mit großen Abmessungen eine thematische Nähe zum Anwendungsbereich dieser Dissertation aufweisen und somit eine erste, scheinbare Übertragbarkeit suggerieren, sind diese Ansätze bei genauerer Betrachtung mit erheblichen Defiziten behaftet. Alle vorgestellten Lösungen sind Insellösungen, die speziell für die Durchführung eines spezifischen Prozesses entwickelt wurden. Es fehlt eine umfassende Abstraktion der Prüfausführung selbst und ein Rahmenkonzept, das mehrere Lösungen integrieren könnte. Keine der Arbeiten behandelt die Charakteristika von Prüfprozessen auf einer übergeordneten, allgemeinen Ebene, wodurch das Potenzial, diese Einzellösungen in einer übergreifenden Struktur miteinander zu verknüpfen, ungenutzt bleibt. Genau dieses aufgezeigte mangelnde Domänenverständnis und der spezifische Fokus der existierenden Studien auf isolierte Anwendungsfälle verhindern letztlich eine breitere und tiefgreifendere Anwendbarkeit der vorgestellten Technologien für die vielfältigen Kontexte der Prüfung von Großbauteilen, wie sie im Flugzeugbau vorliegen.

2.2.3.3 Lösungsansätze für die Verarbeitungskomponente

Im HAAT-Modell ist die Verarbeitungskomponente das zentrale Element, das die anderen Komponenten miteinander verbindet. Wesentliche Aufgaben sind die Steuerung und die Informationsversorgung. Bezüglich des Steuerungsaspekts lässt sich diese Funktion durch die Bestimmung des momentanen Systemzustands sowie durch den Übergang in Folgezustände, also das Systemverhalten, beschreiben. Im betrachteten Anwendungsfall könnte ein Zustand durch die jeweils auszuführende Prüfaufgabe definiert sein. Der Übergang in den nächsten Zustand erfolgt nach deren Abschluss. Dafür muss die Verarbeitungskomponente sicherstellen, dass sich alle beteiligten Komponenten an die jeweilige Situation anpassen. Konkret bedeutet dies z. B., dass die Informationsausgabe Inhalte zum abgeschlossenen Schritt ausblendet und jene zum nächsten Schritt einblendet. Entscheidend für diese Über-

gänge ist jedoch nicht nur der Prozessschritt selbst, sondern die Gesamtheit aller verfügbaren und relevanten Informationen, die den Kontext bilden. Da die Fähigkeit eines Assistenzsystems, sich kontextsensitiv anzupassen, ebenfalls für den Einsatz in Prüfprozessen von Bedeutung ist, werden in der folgenden Diskussion entsprechende Lösungsansätze vorgestellt und analysiert.

Alle untersuchten Lösungsansätze zur Realisierung der Steuerung eines Assistenzsystems verfolgen grundsätzlich einen Modellierungsansatz. In diesem Zusammenhang können Ansätze unterschieden werden, die auf einem fachlichen Modell zur Unterstützung des Systemverständnisses oder auf einem ausführbaren Modell basieren [272]. Einen Sonderfall stellen Modelle dar, die sowohl zur fachlichen als auch zur ausführbaren Modellierung eingesetzt werden können [273]. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Identifikation und Entwicklung konkreter technischer Lösungskomponenten für Assistenzsysteme liegt (Abschnitt 1.4), ist für die Realisierung der Steuerungslogik der Verarbeitungskomponente die Betrachtung von Modellierungsansätzen entscheidend, die das dynamische Systemverhalten direkt beschreiben und in eine ausführbare Form überführt werden können. Aus diesem Grund konzentriert sich die folgende Diskussion auf solche **ausführungsnahe Modellierungsansätze**.

Diese lassen sich weiter nach dem von ihnen gesteuerten Systemverhalten (deterministisch oder probabilistisch) unterteilen. Für deterministische Systeme mit diskreten Systemzuständen können, wie in der Automatisierungstechnik, Endliche Zustandsautomaten (engl. Finite State Machines (FSMs)) verwendet werden [274]. Für nicht streng sequentielle Abläufe, bei denen parallele Prozesse explizit abgebildet werden müssen, eignen sich komplexere graphbasierte Methoden wie z. B. Petrinetze [275]. Für Assistenzsysteme mit probabilistischem Verhalten reichen diese Ansätze nicht mehr aus. Stattdessen können Modelle verwendet werden, die Wahrscheinlichkeiten in den Zustandsübergängen berücksichtigen, wie das Verdeckte Markow-Modell (engl. Hidden Markov Model (HMM)) [276]. Damit können Unsicherheiten im Nutzungsverhalten oder in den Systemzuständen abgebildet werden. Dies ist beispielsweise bei der Steuerung von Assistenzsystemen über Gesten [277] oder Aktionserkennung [278] relevant, die eine inhärente Unsicherheit mit sich bringen.

Unter Verwendung dieser Methoden stellt Bertram [272] in seiner Arbeit einen Lösungsansatz vor, der im Kern auf einem Petri-Netz beruht, jedoch in Anlehnung an ein HMM Kontextinformationen, die einer Unschärfe unterliegen, in das Petri-Netz einbringt. Das resultierende Verhaltensmodell nach Bertram [272] kann formal als

6-Tupel $P = (S, T, F, W, m_0, \vec{C})$ definiert werden, wobei die einzelnen Elemente in seiner Arbeit wie folgt beschrieben werden:

- S einer endlichen Menge an **Plätzen** (auch **Zustände** genannt)
- T einer endlichen Menge an **Transitionen**
- $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$ der **Flussrelation**, bestehend aus **Kanten**
- $W : F \rightarrow \mathbb{N}$ den **Kantengewichten**
- $m_0 : S \rightarrow \mathbb{N}$ der **Anfangsmarkierung**
- $\vec{C} \in \mathbb{N}^4 : S$ der **optimalen Beobachtung** (Kombination aus Kontextinformationen)

Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 2.11 ein Beispielprodukt in Form eines Spielzeughauses und dessen Montageprozess als Petri-Netz dargestellt. Für die Modellierung wird angenommen, dass das Produkt von unten nach oben montiert wird, d. h. beginnend bei s_0 und s_1 . Die Zustände des Petri-Netzes setzen sich somit aus den einzelnen Montageprozessen des Produkts zusammen. Mit dem Abschluss eines Arbeitsprozesses wird die entsprechende Transition geschaltet und der nächste Prozess kann ausgeführt werden. Durch diese Vorgehensweise wird der Montagevorranggraph im Prinzip formalisiert dargestellt. Transitionen, die von mehreren Vorgängerprozessen abhängig sind, werden entsprechend der Anzahl der benötigten, abgeschlossenen Vorgängerprozesse mit Kantengewichten versehen (Transitionen t_3, t_4, t_5). Zusätzlich zu den Montageprozessen wird ein Abschlusszustand s_6 vorgesehen, um das Ende des Montageprozesses erfassen zu können.

Um Kontextinformationen in dieses Petri-Netz einzubringen, wird zusätzlich ein Kontextvektor \vec{C} definiert, der eine zeitlich veränderliche Zusammensetzung der folgenden vier Kontextbausteine darstellt:

$$\begin{aligned}
 c_1 &:= \text{Kontextinformation des Typs Werkzeug,} \\
 c_2 &:= \text{Kontextinformation des Typs Material,} \\
 c_3 &:= \text{Kontextinformation des Typs Tätigkeit,} \\
 c_4 &:= \text{Kontextinformation des Typs Ort}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

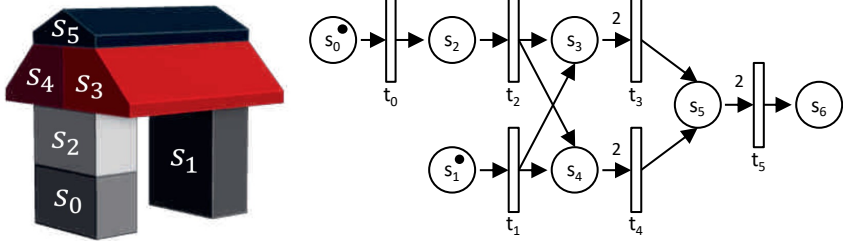


Abbildung 2.11: Produktbeispiel mit den Montageschritten s_0 bis s_5 sowie korrespondierendes Petri-Netz als Steuerungsmodell für ein potenzielles Assistenzsystem. Die Startzustände s_0 und s_1 sind jeweils mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet [272].

Eine Beobachtung zum Zeitpunkt t ist somit definiert als:

$$\vec{b}_t = \begin{pmatrix} \vec{c}_1(t) \\ \vec{c}_2(t) \\ \vec{c}_3(t) \\ \vec{c}_4(t) \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Die optimale Beobachtung für den Kontextvektor eines Schrittes s_x ist demnach definiert als:

$$\vec{b}_{s_x} = \begin{pmatrix} \vec{c}_1(s_x) \\ \vec{c}_2(s_x) \\ \vec{c}_3(s_x) \\ \vec{c}_4(s_x) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

In der Arbeit von Bertram [272] wird davon ausgegangen, dass der Arbeitsprozess selbst nicht direkt beobachtet werden kann, was die Übertragbarkeit der verborgenen Zustände eines HMM auf diesen Anwendungsfall begründet. Aus Kontextbeobachtungen kann jedoch auf den aktuellen Arbeitsschritt geschlossen werden, was für das Assistenzsystem in Situationen relevant ist, in denen der Nutzende mehrere Möglichkeiten hat, den Prozess fortzusetzen oder überhaupt erst zu beginnen. Dazu wird die Übereinstimmung der optimalen Beobachtung \vec{b}_{s_x} und der aktuellen Beobachtung \vec{b}_t als Wahrscheinlichkeit für verschiedene Möglichkeiten des aktuellen Arbeitsprozesses verwendet. Dieser Ansatz ermöglicht sowohl eine flexible Abbildung von Montageprozessen als auch eine anpassungsfähige Möglichkeit der Kontexteinbindung. Durch die Kombination von deterministischen Zuständen und probabilistischen Methoden entsteht eine Lösung, die speziell für ein dynamisches

Arbeitsumfeld (hier Reparatur- und Nacharbeitsplätze mit personenindividuellen Montage- bzw. Demontagestrategien) geeignet ist.

Einen Lösungsansatz mit ähnlichen Methoden verfolgt Bashir [279] in seiner Arbeit, die sich ebenfalls mit der Unterstützung im Bereich der Nacharbeit beschäftigt. Er verwendet ein Markow-Modell, um Rückschlüsse auf den aktuellen Bearbeitungszustand zu ziehen. Das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit liegt jedoch auf dem Produktzustand und nicht auf dem Prozessschritt, dennoch hängen diese sehr eng zusammen, wodurch die Ansätze von Bertram und Bashir als verwandt angesehen werden können. Konkret wird der „Partially Observable Markov Decision Process“ gewählt und die an der Arbeitsstation vorhandene Sensorik (z. B. Lichtschranken zur Eingriffskontrolle) zur Zustandsabschätzung genutzt. Darüber hinaus verwendet das vorgestellte Assistenzsystem weitere Kontextdaten. So erfolgt eine optimierte Zuweisung von Aufträgen an die verfügbaren Mitarbeitenden auf Basis von Erfahrungsprofilen durch das Assistenzsystem. Dazu wird mithilfe von Metaheuristiken aus der Permutation aller Zuweisungskombinationen eine zeitoptimale Lösung ermittelt.

Die Abbildung und Nutzung von Kontextinformationen der Mitarbeitenden spielen in der Arbeit von Breitkopf [250] eine immanent wichtige Rolle, um die Adaptivität des Assistenzsystems für eine personenindividuelle Befähigung zu realisieren. Die entwickelten Methoden dienen der detaillierten Ableitung von Profilen von Mitarbeitenden, in die Kompetenzmodelle mit Bezug zu Produktionstätigkeiten einfließen. Darüber hinaus wird über prozessbezogene Profile der Tatsache Rechnung getragen, dass bei den Mitarbeitenden ein individuelles Wissen über spezifische Prozesse vorhanden ist. Dass dieses über die Zeit veränderlich ist, also natürlichen Prozessen des (An-)Lernens und Vergessens unterliegt, wird über entsprechende dynamische Anpassungsfunktionen berücksichtigt.

Zwischenfazit – Lösungsansätze für die Verarbeitungskomponente:

Auch wenn es nur wenige Arbeiten gibt, die sich explizit mit der Verarbeitungskomponente befassen, scheinen die vorhandenen Lösungsansätze an neue Problemstellungen anpassbar zu sein. Die Prüfprozesse stellen hier insbesondere die Herausforderung dar, dass sie keinem Vorranggraphen folgen. Bewährte Ansätze, verschiedene Ausführungsmöglichkeiten abzubilden, werden in der Literatur derzeit sowohl über deterministische als auch probabilistische Modellierung gelöst.

Da diese im Software-Engineering sowie in der Automatisierungstechnik breite Anwendung finden und die Prozesse eines Assistenzsystems prinzipiell eine „Teilautomatisierung“ des sensorisch-kognitiven Prozesses durch Softwarefunktionen darstellen, sind diese Methoden anwendbar.

Auch die Einbeziehung von Kontextinformationen als Grundlage für die Steuerung erscheint insbesondere durch die Arbeit von Bertram [272] hinreichend abstrahiert. Die konkrete Informationsmodellierung der Kontextinformationen in Bezug auf Werkzeuge, Orte, Tätigkeiten und Materialien ist ohnehin anwendungsfall-spezifisch und nicht vollständig allgemeingültig abbildbar. Eine sehr umfassende Auseinandersetzung mit dem Mitarbeitenden als Kontextelement ist durch Breitkopf [250] gegeben, der unabhängig vom spezifischen Anwendungsfall Methoden entwickelt und diese an diversen Anwendungsfällen in der Montage demonstriert. Da angenommen werden kann, dass Shopfloor-Mitarbeitende unabhängig vom konkreten Prozess (Fügen versus Prüfen) ähnlich strukturierte Kompetenzprofile aufweisen, kann von der Anwendbarkeit dieser Methoden ausgegangen werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die Verarbeitungskomponente bereits Methoden und Werkzeuge zur Verhaltensmodellierung und Kontextintegration in der Forschung etabliert sind (z. B. graphenbasierte oder probabilistische Modelle). Diese Ansätze bieten eine wissenschaftlich fundierte Basis für die Steuerung von Assistenzsystemen in verschiedensten Anwendungsfeldern. Der Einsatz in der Domäne der assistierten Prüfprozesse erfordert dabei vornehmlich die Konfiguration dieser bekannten Methoden hinsichtlich der prozessualen Abläufe und Informationsbedarfe. Ein grundlegender wissenschaftlicher Forschungsbedarf für die Entwicklung neuartiger Steuerungsmechanismen selbst wurde jedoch nicht identifiziert. Da für die Verarbeitungskomponente übertragbare Ansätze bestehen, konzentrieren sich die wissenschaftlichen Neuentwicklungen dieser Arbeit auf spezifische Defizite in anderen Assistenzkomponenten.

2.2.3.4 Lösungsansätze für die Umwelterfassung

Da die Komponente der Umwelterfassung je nach zu erfassender Kontextinformation zum Teil sehr unterschiedliche Ausprägungen hat, müssen zunächst die für die Anwendungsdomäne relevanten Kontextinformationen identifiziert werden. Hierzu wird die Einteilung der Kontextinformationen für die Montage nach Aehnelt [186] in prozess-, objekt-, personen- und ortsbezogene Kontextinformationen verwendet. Für den Anwendungsfall der Assistenz in Montageprozessen spielen insbesondere die Kontextinformationen zum Arbeitsschritt und zum Bauteil eine Schlüs-

selrolle. Dies lässt sich damit begründen, dass Fügeprozesse einem Montagevorganggraphen folgen. Somit ist der aktuelle Zustand des Produktes für die korrekte Anpassung der Assistenzfunktionalitäten von entscheidender Bedeutung. Bei Prüfprozessen bleibt das Produkt in der Regel unverändert, sodass die Reihenfolge der Prüfschritte in einem Prüfplan keinen produktbedingten Restriktionen unterliegt. Aufgrund der Tatsache, dass die Erfassung dieser Entitäten bei Prüfprozessen keinen signifikanten Mehrwert bringt, verbleiben die objektbezogenen Informationen zu „Werkzeugen“. Im Falle von Prüfprozessen, bei denen die korrekte Einhaltung der Prüfposition essenziell ist, ist die Erfassung dieser Kontextinformationen nicht nur für die Assistenzfunktion des „Dokumentieren“, sondern auch für das „Prüfen & Rückmelden“ wertvoll (Abbildung 2.7).

Zur näheren Beleuchtung von Lösungsansätzen zur Erfassung der Werkzeug- bzw. Objektpose, im Folgenden „Tool Tracking“ genannt, werden Arbeiten in die Analyse einbezogen, die als Einzellösungen ohne direkte Integration in ein Assistenzsystem vorliegen. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass nur wenige Veröffentlichungen zu Assistenzsystemen diese Komponente aktiv als Untersuchungs- bzw. Entwicklungsgegenstand betrachten und sie dadurch eher ein Randthema darstellen. Die Arbeiten lassen sich nach verfolgtem Lokalisierungsansatz einteilen. Diesbezüglich erweist sich eine Differenzierung in Outside-In-Tracking (statisch im Raum platzierter Sensor erfasst bewegtes Objekt), Inside-Out-Tracking (am Objekt befestigter Sensor erfasst dessen Pose) sowie kombinierte Ansätze als sinnvoll.

Arbeiten zum **Outside-In-Tracking** setzen oftmals Kameras ein, um die Informationen über das zu verfolgende Objekt zu erhalten. Non-invasive Methoden verzichten auf zusätzliche künstliche Marker am Objekt und versuchen über die Erscheinung des Objekts selbst zunächst das Objekt zu erkennen und dann über die Verarbeitung weiterer Informationen die Pose relativ zur Kamera zu schätzen. Dabei kommen KI-Methoden, wie Convolutional Neural Networks (CNNs), zum Einsatz, um die Objekte im Bild zu erkennen. Algorithmen zur Schätzung der Pose folgen meist Ansätzen aus dem Bereich des Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) und nutzen die Tiefeninformationen der Kameras, um das Objekt in der aufgenommenen Punktwolke wiederzufinden [280]. Verfahren, die sich auf diesen Ansatz stützen, werden allerdings überwiegend im Bereich der Robotik, beispielsweise zur Befähigung von Greifprozessen verwendet [281], [282]. Eine Adaption auf den Bereich des Tool Trackings ist allerdings nicht zielführend. Die starke Abhängigkeit der Objekterkennung von Trainingsdaten hemmt die Übertragbarkeit auf ein breites Spektrum an Prüfmitteln. Öffentlich verfügbare Datensätze, die

diese Trainingsbasis zur Verfügung stellen könnten, existieren aktuell nicht [283]. Zudem sind durch die Handführung der Prüfmittel Teile des Objekts verdeckt, wodurch Merkmale des Objekts für den Erkennungsalgorithmus entfallen, was sich allgemein negativ auf die Robustheit dieser Ansätze auswirkt.

Aus diesen Gründen werden für das Tool Tracking häufig zusätzliche Marker verwendet, die am Werkzeug angebracht werden. Infrarotreflektoren und zweidimensionale Codes sind die am häufigsten verwendeten Marker. Auf diese Weise stellen Schmitt u. a. [284] ein System vor, bei welchem die Daten aus einer Ultraschallinspektion durch die Kopplung mit den Ortsinformationen direkt auf das 3D-Modell eines Bauteils übertragen werden. Dabei ist der Anwendungsfall die Materialprüfung großer Gussteile, wie z. B. Gasturbinengehäuse, auf Inhomogenitäten. Im Zuge der Implementierung wird ein Infrarottarget auf das Gehäuse einer Ultraschallsonde montiert und die akquirierten Daten während der Messung über harmonisierte Zeitstempel synchronisiert. Auch andere Publizierende nutzen diese Technologie, um ihre Werkzeuge in ihrem System zu verfolgen [285]. Vorteile bei diesem Ansatz sind unter anderem die sehr hohen erreichbaren Genauigkeiten (Submillimeterbereich) [286]. Voraussetzung für die Erfassung der Pose ist, dass sich die Marker im Sichtfeld der Kamera befinden. Im Rahmen der Prüfung von Flugzeugkomponenten ist davon auszugehen, dass die Mitarbeitenden zum Teil in schwer zugänglichen Bereichen Messungen durchführen, wodurch dieser Sichtkontakt von Kamera zu Marker ggf. unterbrochen wird. Eine Gegenmaßnahme hierfür ist die Erhöhung der Kameraanzahl, die aus unterschiedlichen Positionen auf das Prüfmittel gerichtet sind, um dadurch zu gewährleisten, dass jederzeit mindestens eine Kamera Marker erfassen kann. Allerdings ist die Skalierung aufgrund der hohen Kosten der Kamerasysteme nicht immer wirtschaftlich umsetzbar.

Alternativ verfolgen einige Arbeiten den Ansatz der Erkennung von zweidimensionalen Codes, die ebenfalls auf dem zu verfolgenden Objekt angebracht werden. Diese können bereits von preiswerten, auf dem Verbrauchermarkt erhältlichen Kameras erkannt und dekodiert werden. Durch die binäre Informationsstruktur, die sich aus den eindeutigen Mustern ergibt, können mehrere dieser Tags und demnach mehrere Objekte voneinander unterschieden werden. Dieser Lösungsansatz wird beispielsweise von Feudis u. a. [287] untersucht, welche in ihren Versuchsreihen die Genauigkeit der Positionsbestimmung eines Handschraubers in verschiedenen Bewegungsszenarien (keine, langsame und schnelle Bewegung) mit unterschiedlichen Lokalisierungstechnologien vergleichen. Zur Implementierung der zweidimensionalen Codes werden Aruco-Marker [288] verwendet. Als Vergleichstechnologien dienen zwei Body-Tracking-Ansätze (OpenPose [289] und AzureKinect), die die

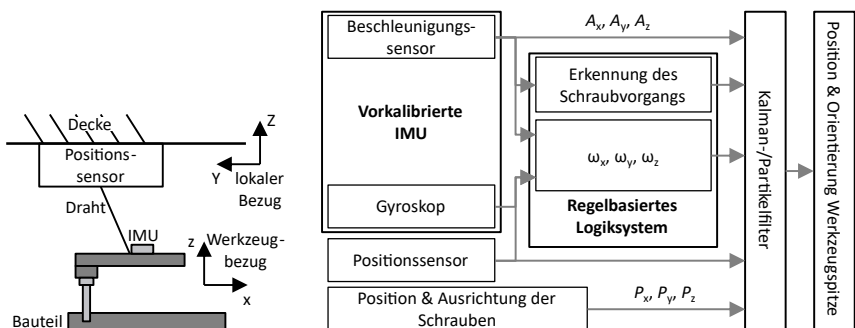
Position der Hand der Versuchsperson erfassen und durch Kombination mit einer statischen Transformation den TCP des Werkzeugs bestimmen. Zusätzlich wird ein DL-Verfahren auf Basis von YOLOv4 [290] verwendet. In den Experimenten schneiden die ArUco-Marker insbesondere unter statischen Bedingungen am besten ab und können Genauigkeiten im einstelligen Zentimeterbereich erreichen ($\mu = 3,1 \text{ cm}$; $\sigma = 1,00 \text{ cm}$).

Neben kamerabasierten Ansätzen werden in der Arbeit von Hintze u. a. [291] andere Sensoren, z. B. auf Basis von Ultraschall, betrachtet. Das hier vorgestellte System dient der Positionierung eines Handwerkzeugs zum Bohren von Nietlöchern in der Flugzeugproduktion. In dieser Veröffentlichung werden jedoch keine Genauigkeitsuntersuchungen durchgeführt und es wird auf das Datenblatt des Positioniersystems verwiesen, das Genauigkeitswerte von unter einem Millimeter angibt ($\mu = 0,55 \text{ mm}$; $\sigma = 0,21 \text{ mm}$) [292]. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese nur unter idealen Umgebungsbedingungen gelten. Negative Einflüsse in der vorliegenden Anwendungsdomäne sind vor allem die Schallabsorptions- bzw. Reflexionseigenschaften der Gegenstände oder Personen, die sich zwischen den fest positionierten Empfangseinheiten und den am Werkzeug angebrachten Sendern befinden. Ähnlich wie bei kamerabasierten Systemen kann hier durch eine Erhöhung der Anzahl der Empfangseinheiten im Arbeitsbereich eine robustere Lokalisierung erreicht werden.

Inside-Out-Lösungsansätze für das Tracking von Objekten nutzen zur Bestimmung der Pose eine Kombination von Stereokameras und Inertial Measurement Units (IMUs), welche am zu lokalisierenden Objekt montiert sind. Die Kameras nutzen dafür Visual-Inertial Odometry (VIO) oder Visual Simultaneous Localization and Mapping (vSLAM), um so die Bewegung des Objekts über die Differenz von Merkmalen zwischen aufeinanderfolgenden Bildframes zu messen [293], [294]. Diese Information wird über Sensorfusionsmethoden mit den Daten der IMU kombiniert, um in Umgebungen mit wenig visueller Information eine Pose schätzen zu können. Allerdings unterliegen diese Methoden einem sich über die Zeit akkumulierenden Drift [295]. Als weitere Maßnahme können Marker als künstliche visuelle Anker mit bekannter Position und Orientierung in der Umgebung platziert werden, wodurch die Lokalisierung an Robustheit und Genauigkeit gewinnt. Auch diese Ansätze unterliegen prinzipbedingt den natürlich auftretenden Okklusionen in der Arbeitsumgebung. Die genannten Methoden für das Inside-Out-Tracking sind zwar ein zentraler Forschungsgegenstand im Bereich der mobilen Robotik, finden als alleinständige Lösung allerdings bisher keine Anwendung für das Tracking von

Werkzeugen.

Outside-In- und Inside-Out-Ansätze werden kombiniert, da sich ihre jeweiligen Stärken und Schwächen sehr gut ergänzen. So liefern Outside-In-Tracking-Ansätze zwar genaue Posenwerte, sind aber anfällig für Okklusionen. Inside-Out-Tracking-Ansätze hingegen können gerade diese Okklusionen überbrücken [296]. In der Literatur beschäftigen sich bisher nur die Arbeiten von Won u. a. [297] und Parnian und Golnaraghi [298] mit der Nutzung dieses Ansatzes speziell für das Tool Tracking. Beide Arbeiten nutzen am Werkzeug angebrachte IMUs als Inside-Out-System. Für das Outside-In-Tracking wird in [298] ein kamerabasiertes System eingesetzt, welches das Tracking über Leuchtdioden am Werkzeug realisiert. Im Gegensatz dazu verwendet [297] einen im Arbeitsraum montierten Seilzuggeber mit 3 Encodern, der physikalisch über einen Draht mit dem zu verfolgenden Werkzeug verbunden ist (Abbildung 2.12a). Dieser Sensor erlaubt nur eine Positionserfassung und liefert folglich keine Orientierung. Zur Kombination dieser Sensorinformationen (Sensorfusion) kommt bei beiden der Kalman-Filter zum Einsatz: Bei [298] als Extended Kalman-Filter (EKF) und bei [297] in seiner ursprünglichen Form, kombiniert mit einem Partikelfilter (Abbildung 2.12b). Beide Anwendungen erreichen mit diesem Ansatz einen maximalen Fehler von 2 cm für den Anwendungsfall der positionsgesteuerten Drehmomentregelung von Handschraubern.



(a) Physische Komponenten des Tool Tracking-Systems sowie deren Bezugssysteme in Anlehnung an [297].

(b) Sensorfusionspipeline in Anlehnung an [297]. Die Daten aus IMU und Positionssensor werden über Kalman- und Partikelfilter mit den Posen der Schrauben zur Berechnung der Werkzeugpose kombiniert.

Abbildung 2.12: Tool Tracking-System von Won u. a. [297].

Zwischenfazit - Lösungsansätze für die Umwelterfassung:

In der wissenschaftlichen Literatur findet sich eine Vielzahl von Untersuchungen zu unterschiedlichen Sensormodalitäten für das Tracking von Objekten. Die Genauigkeiten für Outside-In-Tracking-Lösungen variieren zwischen Submillimetern und dem einstelligen Zentimeterbereich. Für Prüfmittel, die in der definierten Anwendungsdomäne vom Menschen geführt werden und somit einer natürlichen Variation in der Pose unterliegen, erscheint der beschriebene Genauigkeitsbereich der Technologien ausreichend. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die genannten Genauigkeiten lediglich unter idealen Bedingungen, d. h. ohne Abschattung durch Personen oder Objekte, erreicht werden. Bisherige Forschungsarbeiten, die eine Überwindung der genannten Nachteile durch eine Kombination von Outside-In- und Inside-Out-Tracking anstreben, sind in geringem Umfang vorhanden. Beide vorgestellten Arbeiten decken einen kleinen Arbeitsbereich ab und nutzen jeweils nur einen Teil der zur Verfügung stehenden Sensormodalitäten. Die Auswahl der Sensorik für das Tool Tracking orientiert sich in hohem Maße an den spezifischen Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalls, wodurch sich derzeit das größte Defizit zeigt: Es fehlt ein Rahmenwerk, mit dem anwendungsfallsspezifische, multimodale Tool Tracking-Anwendungen entworfen werden können. Im Kontext von Assistenzsystemen für Großbauteile ist ein System erforderlich, das hinsichtlich des abzudeckenden Arbeitsraums beliebig erweiterbar ist und dabei anforderungsgerechte Genauigkeiten liefert. Diesbezüglich bietet sich die Kombination verschiedener Sensormodalitäten an, um der Dynamik der Arbeitsumgebung in der Flugzeugproduktion gerecht zu werden.

2.2.3.5 Lösungsansätze für die Informationsausgabe

Informationsausgabe im Rahmen von Prüfprozessen stellt die Versorgung des Prüfenden mit kontextsensitiven Informationen zum Prozessablauf dar. Diese Informationen lassen sich mit der Beantwortung der Kernfragen „Welches Prüfmerkmal ist mit welchem Prüfmittel an welchem Prüfplatz zu welchem Zeitpunkt auf welche Weise zu prüfen?“ zusammenfassen. Folglich steht hier die Assistenzfunktionalität „Führen und Anleiten“ (Abbildung 2.7) im Vordergrund.

Im Gegensatz zur Informationseingabe, bei der einzelne Lösungsansätze speziell für die Unterstützung von Prüfprozessen existieren, gibt es für die Informationsausgabe nach derzeitigem Stand keine Arbeiten, die sich speziell diesem Prozess-typ widmen. Dies resultiert unter anderem aus der in Abbildung 1.4 aufgezeigten

Problematik der Fokussierung auf Fügeprozesse. Für die nachfolgenden Untersuchungen werden Arbeiten zur Unterstützung anderer Prozesstypen in der Montage herangezogen, wobei dadurch die Übertragbarkeit der Lösungsansätze auf Prüfprozesse ein wesentlicher Bestandteil der Diskussion wird.

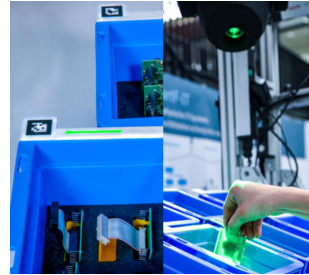
Eine Einteilung der vorliegenden Literatur kann anhand der Technologie des Ausgabegerätes vorgenommen werden. Einen Schwerpunkt bilden **Projektionssysteme**, die dem Spatial Augmented Reality (SAR)-Ansatz folgen. Das dominierende Ausgabegerät ist hierbei der Videoprojektor, der in verschiedenen Montageszenarien, vornehmlich in der Einzelplatzmontage für Kleingeräte, in ein Assistenzsystem implementiert und untersucht wird.

Ein zentrales Forschungsprojekt in diesem Bereich, das umfangreiche Untersuchungen zur technischen Umsetzung und zu den Auswirkungen auf den Montageprozess durchgeführt hat, ist „motionEAP“ [194], [217], [245], [246], [299], [300], [301], [302]. Im Mittelpunkt dieses Projekts steht die Implementierung eines Videoprojektors an einem Handarbeitsplatz, dessen Funktion die Projektion von Schritt-für-Schritt-Anleitungen zur Montage auf den Arbeitstisch ist (Abbildung 2.13a). Des Weiteren erfolgt eine farbliche Hervorhebung der Kleinladungsträger (KLT), welche die im jeweiligen Prozessschritt zu montierenden Bauteile repräsentiert. Farbliche in-situ Markierungen und Konturen werden verwendet, um die Montagepositionen direkt am Bauteil anzuzeigen. Das Projektorsystem wird in Kombination mit Systemen zur Umwelterfassung zum „Überprüfen & Rückmelden“ genutzt, so dass bei fehlerhafter Bauteilentnahme eine visuelle Rückmeldung an den Mitarbeitenden stattfindet. Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes gibt es zahlreiche weitere Arbeiten, deren technische Umsetzung der von motionEAP ähnelt [157], [187], [303], [304], [305], [306], [307], [308]. Unterscheidungsmerkmale sind dabei häufig die konkrete Montageaufgabe oder die Gestaltung des Montagearbeitsplatzes (z. B. die integrierte Sensorik) sowie die Gegenstände der Evaluation. Mit diesen Labordemonstratoren durchgeführte Untersuchungen zeigen ein hohes Potenzial der videoprojektorbasierten SAR für Montageaufgaben im Vergleich zu verschiedenen Kontrollgruppen, wie z. B. papier- [308] und bildschirmbasierten Anleitungen oder Optical-See-Through-AR [302], [305], [306], [309]. Dabei äußert sich das Potenzial in den Montagezeiten und Fehlerraten sowie in den Kennzahlen zur Gebrauchstauglichkeit und Arbeitsbelastung.

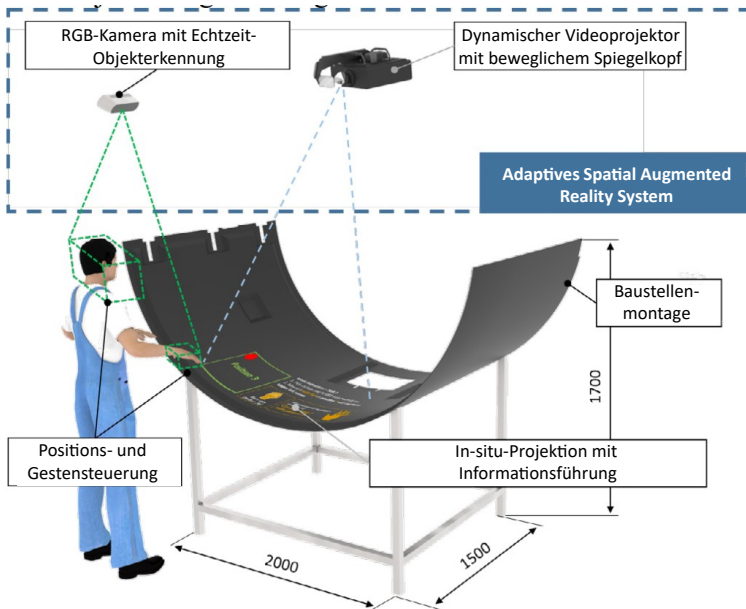
Neben der Realisierung von SAR über Videoprojektoren finden sich in der Literatur vereinzelt auch Ansätze mit Lasern [158], [312], [313], [314], [315], [316], [317] und Lichtprojektoren [310], [318] (Abbildung 2.13b). Laser bieten hier den Vorteil,



(a) (Video-)Projektionsbasierte Assistenz an einem Einzelarbeitsplatz [301].



(b) In-situ Anzeige von Entnahmepositionen basierend auf Laser- und Lichtprojektoren [310].



(c) SAR in Baustellenmontage von Flugzeugkomponenten mittels eines dynamischen Projektionssystems [311].

Abbildung 2.13: SAR-basierte Lösungsansätze zur Assistenz von Füge- und Entnahmeprozessen.

dass sie über lange Distanzen präzise und mit geringen Intensitätsverlusten projiziert werden können und sich daher prinzipiell für die in-situ Projektion auf großen Bauteilen bzw. großen Arbeitsflächen eignen. Ähnliches gilt für Lichtprojektoren, die in der Veranstaltungstechnik aufgrund ihrer hohen Beleuchtungsstärke zur Aus-

leuchtung von Flächen und Objekten über weite Entfernungen eingesetzt werden. In der Literatur findet sich jedoch kein entsprechender Anwendungsfall mit diesen Technologien, in dem diese Eigenschaften ausgeschöpft werden. Der Einsatz beschränkt sich weiterhin fast ausschließlich auf die Einzelplatzmontage mit tendenziell kleineren Produkten.

Eine Ausnahme bilden die Arbeiten der TU Wien von [42], [74], [311], [319], [320], [321], die den Einsatz von Videoprojektoren auf größeren Arbeitsflächen bei der Montage von Flugzeugkomponenten in Form einer Baustellenmontage untersuchen. Dazu wird ein dynamisches Projektionssystem eingesetzt, das einen Videoprojektor mit einem steuerbaren, beweglichen Spiegelkopf erweitert, wodurch eine gezielte Verschiebung des Projektionsbereiches erreicht wird (Abbildung 2.13c). Die durchgeführten Studien bestätigen die positiven Auswirkungen von SAR in größeren Arbeitsbereichen in Bezug auf Effektivität, Effizienz sowie Gebrauchstauglichkeitskennwerte gegenüber der Kontrollgruppe (bildschirmbasierte Informationsbereitstellung auf einem Tablet) [311].

Darüber hinaus existieren in der Literatur neben der Realisierung von AR mit fest installierten Projektoren zahlreiche Lösungsansätze, die auf **mobilen Endgeräten** wie Head-Mounted Displays (HMDs) [174], [203], [229], [305], [322], [323], [324], [325], [326], [327], [328] oder Tablets [232], [233], [329], [330], [331] basieren. Da die Durchführung von manuellen Prüfungen wegen der vermehrten Nutzung von Prüfmitteln oft eine freihändige Arbeitsweise voraussetzt, werden nur Ansätze mit HMDs, wie z. B. die HoloLens 2 von Microsoft [332], weiter berücksichtigt. Anwendungen mit HMDs zeigen durch ihren erhöhten Immersionsgrad positive Auswirkungen auf den Split-Attention-Effekt^a, was insbesondere durch die Verknüpfung und Anzeige von Informationen mit einem räumlichen Kontext direkt am betreffenden Objekt ermöglicht wird [334], [335], [336]. Für die Montage bedeutet dies, dass der Mitarbeitende zweidimensionale Informationen aus Arbeitsanweisungen nicht in die dreidimensionale reale Welt übertragen muss, was prinzipiell zu einer kognitiven Entlastung beitragen kann [337], [338]. Darüber hinaus ist die Darstellung der Informationen nicht auf Projektionsflächen angewiesen, da virtuelle Objekte (z. B. Text, Fotos oder 3D-Modelle) direkt in das Sichtfeld des Nutzenden projiziert werden können (Abbildung 2.14).

^a Der Split-Attention-Effekt tritt auf, wenn Lernende ihre Aufmerksamkeit zwischen mehreren Quellen von Informationen aufteilen müssen, die räumlich oder zeitlich getrennt sind, was den Lernprozess erschwert. Beispielsweise kann das gleichzeitige Betrachten eines Textes und eines dazugehörigen Diagramms, die weit auseinander auf einer Seite platziert sind, zu kognitiver Überlastung führen und die Informationsverarbeitung beeinträchtigen [333].

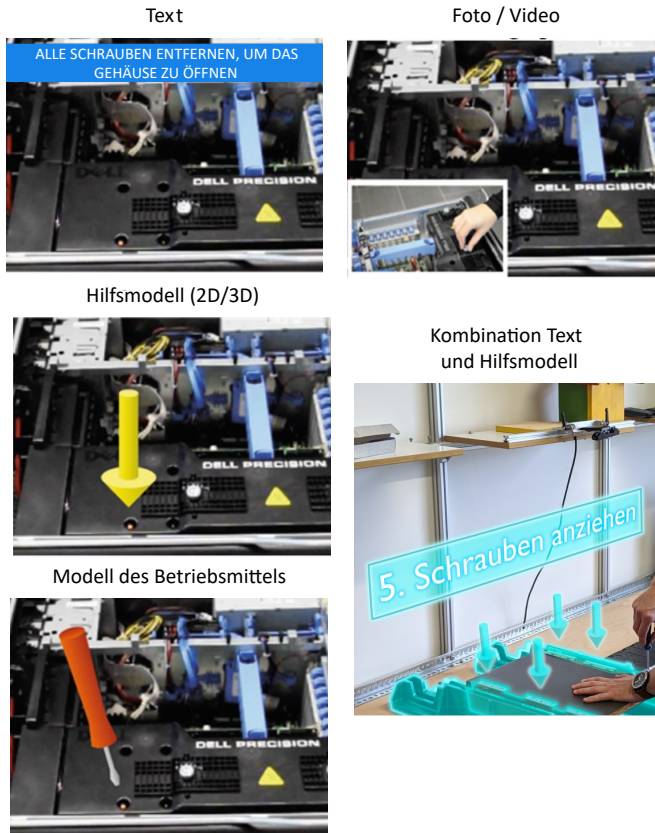


Abbildung 2.14: Verschiedene Möglichkeiten der Darstellung von Informationen in AR-Applikationen [229], [339].

Allerdings lassen die Studien zu den Lösungsansätzen mit HMDs - im Kontrast zu denen zu SAR - keine eindeutigen Schlussfolgerungen zu. Einerseits kommt ein Teil der Studien zu dem Schluss, dass HMDs die Ausführungszeit (Task Completion Time (TCT)) erhöhen. Dies gilt im Vergleich zu Kontrollgruppen, die Papieranweisungen [174], [302], [305], [327], Video-See-Through-AR mit Tablets [329] oder SAR mit Videoprojektoren [302], [305] nutzen. Andererseits stellen weitere Arbeiten geringere TCTs bei HMDs fest, beispielsweise im Vergleich zu papierbasierten Instruktionen [324], [340], [341] oder tabletbasierter AR [342]. Hinsichtlich der Fehlerrate bei der Montage finden sich in den Studien überwiegend Ergebnisse,

die einen positiven Einfluss von HMDs belegen [342]. Vereinzelt Studien, wie z. B. von Büttner u. a. [305] oder Funk u. a. [302], zeigen jedoch deutlich höhere Fehleraten bei der Nutzung von HMDs im Vergleich zu papier- oder projektionsbasierten Technologien.

Die Erhebung von nutzungsorientierten Indikatoren, wie z. B. der Gebrauchstauglichkeit oder der wahrgenommenen Arbeitsbelastung bei der Durchführung der Montageaufgabe, zeigt ebenfalls sehr unterschiedliche Ergebnisse. Hinsichtlich der kognitiven Arbeitsbelastung besteht laut einem Review-Paper von Buchner u. a. [343] ein Konsens hinsichtlich der Überlegenheit von SAR gegenüber See-Through-AR mit HMDs. Im Vergleich zu Kontrollgruppen, die papierbasierte Instruktionen erhielten, sind die Ergebnisse hingegen widersprüchlich.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit ist zu beachten, dass die langfristige Exposition gegenüber AR mit HMDs je nach Nutzenden zu unerwünschten körperlichen Reaktionen wie Augenermüdung, Kopfschmerzen, Übelkeit oder Schwindel führen kann. Diese können größtenteils durch Visually Induced Motion Sickness (VIMS)^b, auch bekannt als „Cybersickness“, erklärt werden [345]. Negativ verstärkt wird dieser Effekt durch schlechte Bildauflösungen [346], hohe Latenzen [347] oder langsame Bildraten [348].

Zwischenfazit – Lösungsansätze für die Informationsausgabe:

Zunächst ist festzustellen, dass sich zahlreiche Forschungsarbeiten mit der Auswahl der geeigneten Technologie für die Informationsausgabe innerhalb eines Assistenzsystems befassen. Aufgrund der Vielzahl an Veröffentlichungen ist komponentenübergreifend ein deutlicher Schwerpunkt im Forschungsfeld der Assistenzsysteme erkennbar. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Informationsausgabe insbesondere im Rahmen von Fügeprozessen einen direkten Einfluss auf das Prozessergebnis hat und somit die wirtschaftlichen und arbeitspersonbezogenen Zieldimensionen (Abbildung 2.7) beeinflusst werden können. Im Folgenden werden die vorgestellten Lösungsansätze basierend auf der gewählten

^b VIMS resultiert hauptsächlich aus dem Vergence-Accommodation Conflict (VAC), der entsteht wenn die Augenmuskeln gleichzeitig unterschiedliche Anforderungen an die Konvergenz (Ausrichtung beider Augen auf ein Objekt) und die Akkommodation (Fokussierung auf verschiedene Entfernungen) erfüllen müssen [344]. In der realen Welt geschieht dies normalerweise synchron. Bei aktuellen AR-Brillen stimmen die Konvergenz und Akkommodation nicht überein, da die Geräte zwar virtuelle Objekte in verschiedenen Tiefen darstellen, diese jedoch auf einer festen, nahen Projektionsebene angezeigt werden. Die Augen müssen sich daher auf diese nahe Ebene akkommodieren (fokussieren), während sie gleichzeitig versuchen, auf die scheinbare Tiefe des virtuellen Objekts zu konvergieren.

Ausgabetechnologie diskutiert. Dabei finden vor allem die Übertragbarkeit auf den adressierten Nutzungskontext Beachtung.

Die vorgestellten Lösungsansätze, die SAR auf unterschiedlichen Projektionstechnologien umsetzen, zeigen hinsichtlich der untersuchten Bewertungskriterien insgesamt positive Auswirkungen auf die Montage. Durch die in-situ Anzeige der Entnahmepositionen von Bauteilen, die Projektion von Informationen zum aktuellen Prozessschritt sowie die Rückmeldung zur korrekten Ausführung können Fehler vermieden und der Prozess beschleunigt werden. Auch die Untersuchungen zur Nutzungsfreundlichkeit dieser Technologie zeigen in verschiedenen Szenarien überzeugende Ergebnisse. Damit sind prinzipiell die Voraussetzungen für einen Einsatz in der Anwendungsdomäne der industriellen Prüfung gegeben. Eine vollständige Bewertung der Übertragbarkeit auf Prüfprozesse ist jedoch nicht ohne weiteres möglich. Da sich bisher keine Arbeit mit der Unterstützung eines Prüfprozesses beschäftigt hat, ist das Profil eines typischen Prüfenden und dessen Informationsbedarf bei der Durchführung seiner Prozesse unbekannt. Es ist anzunehmen, dass durch die Flexibilität der Videoprojektion auch umfangreiche und komplexe Informationsartefakte dargestellt werden können. Unklar ist, ob diese Fähigkeit tatsächlich benötigt wird.

Darüber hinaus wird die Übertragbarkeit der Technologien dadurch erschwert, dass die in den Studien erhobenen Kennzahlen im Wesentlichen die Effekte des Assistenzsystems auf einen spezifischen Anwendungsfall ermitteln. Die Ermittlung von Leistungskennzahlen der Technologien (z. B. Projektionsgenauigkeit) in den einzelnen Anwendungsfällen der Studien steht nicht im Fokus. Dadurch ist es im Vorfeld schwer abzuschätzen, ob die Technologie für einen neuartigen Anwendungsfall mit gegebenen Anforderungen eingesetzt werden kann. Fraglich ist auch die weitgehende Übertragbarkeit auf den Bereich der Flugzeugproduktion und verschiedenster Großbauteile. Zwar existiert mit dem Lösungsansatz der TU Wien eine technische Umsetzung, die prinzipiell die Videoprojektion bei der Montage eines Flugzeugbauteils einsetzt, jedoch unterscheiden sich die in den Versuchen angenommenen Rahmenbedingungen von denen dieser Arbeit. So ist z. B. die Annahme der vollständigen und verdeckungsfreien Ausleuchtung des Bauteils mit einem einzigen Projektor nicht auf alle Montagesituationen und Bauteile übertragbar. In der Strukturmontage sind Schalenbauteile in variabler Ausrichtung vorhanden. Dadurch ist eine Anbringung des Projektors oberhalb des Bauteils nicht immer umsetzbar. Bei seitlicher Anbringung kann es zu zusätzlichen Okklusionen durch das Personal auf der Arbeitsfläche kommen. Auch die Geometrie der Bauteile selbst kann eine Herausforderung für die Videoprojektion darstellen. Häufig ist die Pro-

jektionsfläche aufgrund der Freiformgeometrien nicht einfach beschreibbar und daraus resultierende Verzerrungen in der Projektion sind nur schwer zu korrigieren. Diese besondere Problematik der Flugzeugproduktion und die daraus resultierenden Okklusionsszenarien werden in der Literatur bisher nicht behandelt.

Lösungsansätze, die weder auf Projektionsflächen angewiesen noch von Okklusion betroffen sind, nutzen HMDs – vornehmlich mit Optical-See-Through-AR. Trotz des Nachweises, dass HMDs prinzipiell geeignet sind, die Montage mit entsprechenden Informationsfunktionen zu unterstützen, zeigen sich starke Defizite im Bereich der Gebrauchstauglichkeit. Zum einen fällt die Bedienung in ihrer Intuitivität deutlich hinter etablierte Technologien wie Tablets zurück [349], zum anderen ist die mentale Ermüdung insbesondere bei längerfristiger Nutzung der Technologie ein Ausschlusskriterium für den Schichtbetrieb [350]. Darüber hinaus beeinflusst Cybersickness die Gebrauchstauglichkeit bisher noch so stark, dass diese eine langfristige Nutzung ohne Gefühle des Unwohlseins tendenziell nur bei wenigen Personen möglich ist [351]. Im Bereich der Mixed-Reality wird die Cybersickness auch als „Elephant in the room“ bezeichnet, welcher die Verbreitung der Technologien drastisch einschränkt [352]. Bei den bisher verfügbaren Modellen von HMDs auf dem Markt ist dieses Problem nicht gelöst. Aufgrund der starken Abhängigkeit von leistungsfähiger Hardware, die gleichzeitig hohe Anforderungen an die Nutzenden stellt, sowie aufgrund teilweise nicht eindeutiger Studienergebnisse wird diese Technologie im Rahmen dieser Arbeit als eher ungeeignetes Medium zur Informationsausgabe eingestuft. Damit decken sich die Ergebnisse dieser Analyse mit denen der Dissertation von Stockinger [353] aus dem Jahr 2021.

Zusammenfassend zeigen die in der Literatur vorhandenen Lösungsansätze die grundsätzlichen Möglichkeiten der Informationsbereitstellung während der Montageprozesse auf. Wie eingangs erwähnt, besteht ein zentrales Defizit darin, dass sich keine der Arbeiten speziell mit Prüfprozessen befasst. Dadurch ergibt sich ein Verständnisdefizit bezüglich der tatsächlichen Anforderungen an die Unterstützung dieser Prozesse. Eine Bewertung der Übertragbarkeit der Lösungsansätze auf die Anwendungsdomäne zeigt, dass insbesondere die dynamischen Arbeitsumgebungen, die zwangsläufig zu ungewollten Okklusionen möglicher Projektionen führen können, den Einsatz von SAR behindern. Andererseits ist festzustellen, dass der aktuelle Stand der am Markt verfügbaren Hardware von HMDs für AR-Anwendungen noch weit von einer industriellen Reife entfernt ist. Somit ist der Stand der Wissenschaft nicht ausreichend, um die aufgezeigten Herausforderungen zu erfüllen.

2.2.3.6 Lösungsansätze für das Gesamtsystem

Die Analyse des Gesamtsystems in diesem Abschnitt zielt nicht auf eine spezifische Lösungskomponente nach dem HAAT-Modell ab, sondern vielmehr auf Ansätze, die bereits diskutierte Komponenten zu einem funktionierenden Gesamtsystem verweben. Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass für die einzelnen Komponenten vielfältige Ausprägungen möglich sind. Je nach konkretem Anwendungsfall legt dies nahe, dass eine flexible Zusammenstellung vorhandener Lösungsansätze nach einem „Baukastenprinzip“ Vorteile für die Gesamtarchitektur des Assistenzsystems bietet.

Dementsprechend wird in diesem Abschnitt auf die Modularität der Lösungsansätze eingegangen. Diese gewährleistet nicht nur die Anpassung an spezifische Anwendungsfälle, sondern erleichtert auch die Erweiterung um neue Lösungsmodule. Darüber hinaus spielt die Flexibilität sowie die Skalierbarkeit im Rahmen der Anwendung von Assistenzsystemen eine wichtige Rolle. Hier wird untersucht, welche Ansätze verwendet werden, um eine Anpassbarkeit an verschiedene Anwendungsfälle zu ermöglichen. Die Flexibilität bezieht sich dabei auf unterschiedliche Prozessstypen, während die Skalierbarkeit insbesondere die Variabilität der dem System zur Verfügung stehenden Ressourcen betrachtet. Letzteres stellt sicher, dass das Assistenzsystem nicht nur für einfache Anwendungen eingesetzt werden kann, sondern beispielsweise auch zur Unterstützung komplexer Prüfaufgaben, bei denen größere Datenmengen verarbeitet werden müssen. Des Weiteren ist für die Verknüpfung der einzelnen Komponenten ein Datenaustausch notwendig. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand sind daher die applizierten Kommunikationsstrukturen sowie ihre Implementierung.

Um den oben genannten Anforderungen gerecht zu werden, setzen die meisten aktuellen Veröffentlichungen auf **Plattformansätze** aus dem Bereich des IoT. Als Basis werden typischerweise sogenannte Referenzarchitekturen eingesetzt, wobei in der Literatur eine Vielzahl von Ansätzen existiert und genutzt wird [354]. Grundsätzlich zielen jedoch alle Architekturen auf eine Standardisierung des IoT-Systems durch eine abstrakte Modellierung der Schichten und der darin enthaltenen Entitäten, Komponenten und Subsysteme ab. Die konkreten Ausgestaltungen unterscheiden sich dann teilweise in der Anzahl der definierten Schichten und der Verteilung der aufgeführten Elemente in diesen Schichten. Diese werden von verschiedenen Konsortien bzw. Standardisierungsgremien veröffentlicht, wie z. B. der ISO/IEC-Standard 30141 [355] oder die Referenzarchitektur des „Industry IoT Consortium“

[356]. Zur Verdeutlichung des Aufbaus einer solchen Architektur wird exemplarisch die ISO/IEC-Referenzarchitektur herangezogen. Die Referenzarchitektur der ISO/IEC 30141 folgt der ISO/IEC/IEEE 42010 Norm [357] zur Beschreibung von Softwarearchitekturen. Sie besteht aus vier Bestandteilen: Charakteristika eines IoT-Systems, ein konzeptionelles Modell, ein Referenzmodell und die Architektur basierend auf verschiedenen Sichten. Die definierten Charakteristika von IoT-Systemen beinhalten die Anforderungen an Modularität, Flexibilität und Skalierbarkeit sowie weitere relevante Eigenschaften. Damit erfüllt ein normkonformes IoT-System die Anforderungen der Anwendungsdomäne und hat breites Einsatzpotenzial, was die Dominanz von IoT-Ansätzen in der Industrie erklärt. Der Bestandteil des konzeptionellen Modells beschreibt die physischen und digitalen Entitäten im System und deren logische Beziehungen zueinander. Diese abstrakte Beschreibung der Entitäten wird mithilfe des Referenzmodells in verschiedene Schichten strukturiert, welches in Abbildung 2.15 dargestellt ist. Ausgehend von diesem allgemeinen Referenzmodell können spezifische Sichten der Architektur abgeleitet werden. Die Norm unterscheidet hier zwischen der Funktions-, Systemeinrichtungs-, Netzwerk- und Nutzungsansicht.

Auf der Grundlage der Referenzarchitekturen zeigen verschiedene Arbeiten spezifische Umsetzungen, die auf die Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalls zugeschnitten sind. Alexopoulos u. a. [358] stellen ein kontextsensitives IIoT-System vor, das als Informations- und Entscheidungsgrundlage für Shopfloor-Personal und deren Teamleitungen dienen soll. Es nutzt eine mehrschichtige, serviceorientierte Architektur als Grundlage und integriert Subsysteme zur Erfassung von Sensordaten und zur Bereitstellung von Kontextinformationen. Der Anwendungsfall sind dynamische Produktionsumgebungen, wobei als Umsetzungsbeispiel eine Werft gewählt wurde. Abhängig von der Position in der Produktion und der Rolle des Mitarbeitenden werden kontextspezifische Informationsdienste bereitgestellt, mit denen z. B. relevante Arbeitspläne geladen oder Rückmeldungen zum Produktionsfortschritt erfasst werden können. Arbeiten, die den gleichen Prinzipien folgen, unterscheiden sich dabei in der konkreten Ausgestaltung der einzelnen Komponenten, wie z. B. dem Applikation & Service Subsystem (Abbildung 2.15). So zeigen z. B. Christou u. a. [359] die Implementierung von Datenanalysediensten für das Qualitätsmanagement oder Montini u. a. [360] die Schätzung der Ermüdung von Mitarbeitenden.

Zusätzlich zu den Publikationen, die die Anwendung der IoT-Systemprinzipien direkt erwähnen, existieren auch solche, die sich der Prinzipien indirekt durch die

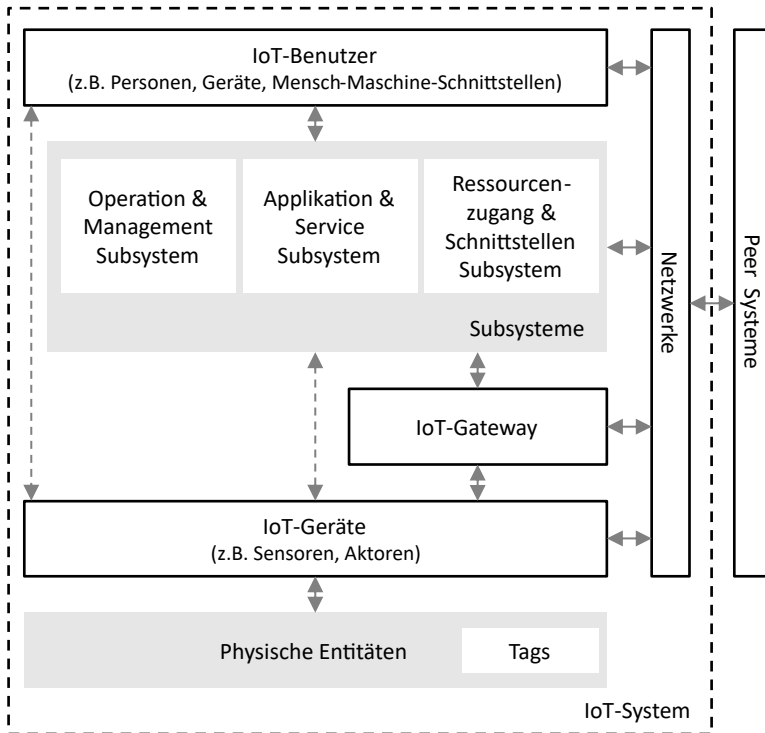


Abbildung 2.15: Entitätenbasiertes Referenzmodell in Anlehnung an ISO/IEC 30141 [355].

partielle Anwendung von Basismethoden bedienen. Dabei greifen viele Arbeiten auf ein konzeptionelles Modell, häufig als Entity Relationship Diagramm (ERD) oder Klassendiagramm in der Unified Modeling Language (UML), als Entwicklungsbasis des Assistenzsystems zurück [186], [361], [362], [363]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verwendung solcher Modelle in der Softwareentwicklung auch für Nicht-IoT-Systeme gängige Praxis ist [364]. Dieser Schritt zeigt aber auch, dass das Einbringen von domänenspezifischem Wissen bereits auf konzeptioneller Ebene notwendig ist, um das System entsprechend auf den Anwendungsfall auszurichten.

Neben den konzeptionellen Ansätzen finden sich auch auf der Umsetzungsebene zunehmend Lösungen aus dem Bereich IoT. Diese spiegeln sich insbesondere in der Netzwerkkomponente (Abbildung 2.15) und damit in den eingangs erwähnten Kommunikationsstrukturen wider. Hier kommen Middleware-Lösungen zum Einsatz, deren Ziel es ist, die zum Teil sehr heterogene IT-Landschaft in Fabriken zu verbind-

den [365]. Dazu werden unterschiedliche Maschinen und Geräte über IoT-Gateways an IoT-Plattformstrukturen angebinden. Dabei findet häufig eine Harmonisierung auf ein Protokoll statt, da in der Industrie eine Vielzahl von Protokollen zum Einsatz kommt. Ein bekannter Vertreter, der teilweise auch als De-Facto-Standard im Bereich des IoT bezeichnet wird [366], ist Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Dieses Protokoll lässt sich mit einem Publish-Subscribe-Ansatz und einer Kommunikationsstruktur basierend auf „Topic Trees“ implementieren. Da diese keine vordefinierte Logik besitzen, gibt die Sparkplug-Spezifikation [367] Regeln für die Anwendung des MQTT-Protokolls in der Praxis vor. Dadurch kann die zugrundeliegende Struktur für die Kommunikation semantisch angereichert werden, wodurch das Protokoll insbesondere für industrielle Anwendungsfälle einsetzbar wird.

Zwischenfazit – Lösungsansätze für das Gesamtsystem:

Zusammenfassend zeigt sich, dass für die übergreifende Vernetzung der Bestandteile eines Assistenzsystems und die Realisierung eines Gesamtsystems, insbesondere durch Ansätze aus dem Bereich des IoT, bereits umfassende und methodische Grundlagen existieren. Die Strukturierung in aufgabenspezifische Schichten, wie in verschiedenen Referenzarchitekturen dargelegt, und die Nutzung standardisierter Kommunikationsprotokolle wie MQTT sind in der Forschung und Praxis für diverse Assistenzsysteme erfolgreich demonstriert worden und helfen, die Komplexität des Gesamtsystems beherrschbar zu machen.

Auch wenn eine detaillierte, spezifische Anwendung dieser IoT-Prinzipien auf assistierte Prüfprozesse in der Flugzeugproduktion in der Literatur bisher noch nicht in der Tiefe exploriert wurde, unterstreicht die technologie- und anwendungsfallunabhängige Natur der zugrundeliegenden Methoden und Werkzeuge deren prinzipielle und umfassende Übertragbarkeit. Die Entwicklung domänenspezifischer konzeptioneller Modelle und die Ausgestaltung konkreter Kommunikationsstrukturen – beispielsweise die Nutzung von MQTT für Steuerbefehle und einfache Datenübertragung, ergänzt durch andere Mechanismen für datenintensive Übertragungen wie Bilddateien oder Punktwolken – basiert auf diesen vorhandenen Werkzeugen.

Daraus folgt, dass für die Zusammenführung der Module zu einem funktionierenden Gesamtsystem sowie für dessen zugrundeliegenden Kommunikationsarchitektur kein primärer wissenschaftlicher Forschungsbedarf gegeben ist. Daher fokussiert sich diese Arbeit im Folgenden auf Komponenten des Assistenzsystems, bei denen wissenschaftliche Defizite festgestellt wurden.

2.2.4 Detaillierung der Zielsetzung und Ableitung der Vorgehensweise

Wie im Kapitel 1 gezeigt, bieten sich zur Verbesserung manueller Prüfprozesse im Flugzeugbau Assistenzsysteme an. Da sich bisher nur wenige Veröffentlichungen mit der Produktprüfung auseinandersetzen, wurde mithilfe des HAAT-Modells eine komponentenbasierte Analyse aktueller Forschungsarbeiten durchgeführt. Dabei konnten Lösungsansätze identifiziert werden, die von anderen Montageprozessen auf die Problemstellung übertragbar sind. Es wurden aber auch Lücken aufgezeigt, die den Einsatz von Assistenzsystemen im avisierten Anwendungsfeld derzeit noch behindern. Im Folgenden werden zunächst Defizite aus den vorangegangenen Analysen benannt, die sich entweder aus einer einzelnen Komponente oder aus ganzheitlichen Betrachtungen ergeben. Anschließend werden aus diesen Defiziten Ziele konkretisiert und eine Vorgehensweise zu deren Erreichung abgeleitet.

2.2.4.1 Zusammenfassung der anwendungsspezifischen Defizite des Standes der Wissenschaft

Die im Abschnitt 2.2.3 durchgeführte Analyse bisheriger Veröffentlichungen zu Assistenzsystemen im Bereich Montage und MRO bestätigt das in Abbildung 1.4 aufgeführte anwendungsspezifische Praxisdefizit. Für die Entwicklung eines Assistenzsystems für Prüfprozesse im Flugzeugbau fehlt ein grundlegendes Verständnis des Nutzungskontextes. Bisher liegen keine Arbeiten vor, die sich methodisch mit den typischen Abläufen und Merkmalen der manuellen Prüfung auseinandersetzen, um daraus Unterstützungspotenziale zu erschließen.

Die Analyse des Forschungsstandes zur **Komponente der Informationseingabe** zeigt zwar, dass einzelne Arbeiten die Unterstützung von Prüfprozessen thematisieren, jedoch handelt es sich hierbei ausschließlich um Insellösungen für einzelne Prüfverfahren. Wichtige hierbei adressierte Prüfverfahren sind die geometrische Prüfung mit handgeführten Messmitteln sowie die Vollständigkeitsprüfung, die wiederum nur eine Teilaufgabe innerhalb der Sichtprüfung darstellt. Auf den hier eingesetzten Methoden kann aufgebaut werden, jedoch fehlen für Anwendungen im Bereich der Sichtprüfung grundlegende Untersuchungen zu geeigneten Endgeräten. Darüber hinaus wird bei der Sichtprüfung der für die Flugzeugproduktion wichtige Teilprozess der visuellen Oberflächeninspektion von den bisherigen Systemen nicht abgedeckt.

Für die **Komponente der Umwelterfassung** wurde die Information über die Pose des Prüfmittels als besonders wichtig für die Assistenzfunktionalitäten iden-

tifiziert. Vorliegende Arbeiten auf dem Gebiet des Tool Trackings zeigen Lösungen, die für kontrollierte, meist kleinskalige Umgebungen zufriedenstellende Ergebnisse liefern können. Insbesondere Lokalisierungssysteme, die auf einer Kombination von Outside-In- und Inside-Out-Tracking aufsetzen, sind hier vielversprechend. Gerade in der Flugzeugproduktion ist jedoch mit Okklusionen und großen Arbeitsbereichen zu rechnen. Eine explizite Berücksichtigung dieser Dynamik erfolgt bisher nicht. Zudem sind alle vorgestellten Systeme speziell für einen Arbeitsplatz konzipiert, ohne die Möglichkeit einer einfachen Adaption an andere Arbeitsplätze mit unterschiedlichen Anforderungen zu bieten.

Darüber hinaus haben die Untersuchungen zur **Informationsausgabekomponente** gezeigt, dass diese den Forschungsschwerpunkt im Bereich der Assistenzsysteme im Produktionsumfeld darstellt. Auf Basis der Analysen können HMD-basierte AR-Systeme für den Anwendungsfall als ungeeignet eingestuft werden. Demgegenüber stellt der Einsatz von SAR einen vielversprechenden Ansatz dar, der sowohl positive Auswirkungen auf prozessbezogene Kennzahlen (Montagezeiten, Fehlerraten) als auch eine hohe Nutzungsakzeptanz (hohe Gebrauchstauglichkeit bei geringer kognitiver Arbeitsbelastung) aufweist. Eine direkte Übertragung bestehender Lösungsansätze ist aufgrund des eingangs beschriebenen fehlenden Verständnisses für den Nutzungskontext nicht möglich. Dieses Defizit führt zu unzureichenden Gestaltungsgrundlagen für diese Komponente. Im Einzelnen mangelt es an der Spezifikation der zu übertragenden Informationen sowie der Projektionstechnologie für die Anwendungsdomäne. Im Zusammenhang damit ergibt sich zeitgleich eine mangelhafte Beachtung der Luftfahrtanforderungen für SAR-Ansätze. Diese äußern sich darin, dass bislang nur einzelne Ansätze größere Arbeitsräume abdecken und diese die Technologieauswahl unter der Annahme der Okklusionsfreiheit treffen. Ein weiteres wesentliches Hindernis für den Einsatz von SAR-Ansätzen besteht darin, dass zum aktuellen Zeitpunkt keine umfassenden Bewertungen der erreichbaren Projektionsgenauigkeiten in großen Arbeitsräumen durchgeführt wurden.

Neben den zuvor dargestellten wissenschaftlichen Defiziten, die spezifische Komponentenbereiche betreffen, zeichnen die Analysen für **die Verarbeitungskomponente und das Gesamtsystem** (Abschnitt 2.2.3.3 und 2.2.3.6) ein anderes Bild ab: Hier existieren bereits etablierte und prinzipiell übertragbare Methoden und Werkzeuge. Beispielsweise sind graphenbasierte Modelle zur flexiblen Steuerung sowie IoT-Architekturen zur modularen Vernetzung als anwendbare Ansätze für die Realisierung eines Assistenzsystems im Prüfkontext zu sehen. Dies unterstreicht, dass der primäre wissenschaftliche Forschungsbedarf im Kontext dieser Arbeit nicht in

der Entwicklung neuartiger Steuerungs- und Integrationskonzepte liegt, sondern vielmehr in der Adressierung der spezifischen Defizite der erstgenannten Komponenten Informationseingabe, Umwelterfassung und Informationsausgabe.

Im Einklang mit der übergeordneten Zielsetzung dieser Arbeit – der Entwicklung fehlender technischer Lösungskomponenten zur Befähigung von Assistenzsystemen – konzentriert sich der wissenschaftliche Fokus daher auf diese drei Module, in denen die identifizierten Forschungsdefizite bearbeitet werden. Die Zusammenführung dieser neu entwickelten Module zu einem Gesamtsystem unter Nutzung etablierter Ansätze bildet die Grundlage für einen nachfolgenden Industrialisierungsprozess. Diese Überführung in ein industriereifes, produktiv einsetzbares System stellt jedoch einen Schritt dar, der über den primär wissenschaftlichen Rahmen dieser Dissertation hinausgeht, aber maßgeblich auf der hier geschaffenen Basis beruht.

2.2.4.2 Konkretisierung der Zielsetzung

Die zuvor identifizierten Defizite bilden die Grundlage für die nachfolgende Detaillierung der Zielsetzung. Abbildung 2.16 veranschaulicht die Zusammenhänge zwischen der übergeordneten Zielsetzung, den Defiziten und den zu deren Adressierung formulierten konkretisierten Zielsetzungen.

Um den aufgelisteten **übergreifenden Defiziten** zu begegnen, wird eine systematische Analyse der Anwendungsdomäne durchgeführt. Ziel hierbei ist es, eine modellhafte Abbildung der Entitäten (Produkte, Prozesse, Betriebsmittel, beteiligte Personen) sowie deren Beziehung zu erarbeiten (Zielsetzung 1.1). Eng damit verknüpft ist die Ableitung des Unterstützungsbedarfs und des Nutzungsprofils (Zielsetzung 1.2), wodurch die grundlegenden Randbedingungen und Anforderungen für die weiteren Entwicklungen von technischen Lösungskomponenten festgelegt werden. Auf diese Weise wird die erforderliche Grundlage für die Entwicklung eines Assistenzsystems für Prüfprozesse in der Flugzeugproduktion geschaffen (Zielsetzung 1). Der Einfluss dieser Analyseergebnisse auf die Erarbeitung der restlichen Zielsetzungen ist in der Abbildung mit gestrichelten Pfeilen verdeutlicht.

Bei der **Informationseingabe** 2 liegt der Schwerpunkt auf der visuellen Inspektion. Um die hier bestehenden Defizite zu adressieren, werden zunächst in anwendungsorientierten Studien anhand der Prüfung einer Flugzeugkomponente geeignete Technologien identifiziert (Zielsetzung 2.1). Dabei kommen einfache Softwareprototypen des Assistenzmoduls, ausgestattet mit essenziellen Dokumentationswerkzeugen, zum Einsatz. Basierend auf den Erkenntnissen zur geeignets-

ten Technologie wird die Weiterentwicklung der Dokumentationswerkzeuge des Prototyps vorangetrieben, mit dem Ziel, die Erfassung von Oberflächendefekten zu optimieren. Das finale Assistenzmodul wird erneut evaluiert, um nutzungszentrierte Kennzahlen zu generieren. Diese Kennzahlen ermöglichen einen Vergleich zwischen dem Ausgangs- und dem finalen Modul, um die Effekte der Weiterentwicklung zu beurteilen. Diese Entwicklung beweist nicht nur die Praxistauglichkeit, sondern schafft auch ein bisher fehlendes Werkzeug zur Dokumentation von Oberflächenfehlern (Zielsetzung 2.2).

Zur Schließung der Lücken im Bereich der **Umwelterfassung** 5 wird zunächst ein Vorgehen aufgezeigt, das die flexible Kombination unterschiedlicher Lokalisierungsverfahren in einem gemeinsamen Referenzsystem ermöglicht (Zielsetzung 3.1). Dies bietet den Ausgangspunkt für die individuelle Anpassung von Lokalisierungslösungen zugeschnitten auf dynamische Arbeitsumgebungen, wodurch modulare und multi-modale Applikationen für das Tool Tracking befähigt werden. Das Vorgehen soll anhand eines praxisnahen Beispiels aus dem Flugzeugbau demonstriert werden, um die so entstehende Tracking-Applikation und die darin verwendeten Lokalisierungsverfahren hinsichtlich der erreichbaren Lokalisierungsgenauigkeiten erproben zu können. Dies beinhaltet unter anderem die systematische Charakterisierung der einzelnen Sensormodalitäten sowie die Analyse des Einflusses von Okklusionen (Zielsetzung 3.2). Dazu werden Szenarien definiert, die durch die Abschattung eines oder mehrerer Sensoren im Arbeitsraum, z. B. durch den Prüfling selbst bei der Durchführung der Prüfaufgabe am Bauteil, gekennzeichnet sind. Durch den Nachweis der Anwendbarkeit in einem dynamischen Arbeitsumfeld werden aktuelle Hindernisse bei der Einbindung von Tool Tracking-Anwendungen abgebaut.

Das abschließende Ziel zur Adressierung der Defizite im Bereich der **Informationsausgabe** 4 fokussiert sich auf die in-situ Projektion von Prüflinginformationen. Hierzu werden die Ergebnisse der Domänenanalyse aufgegriffen, um zunächst die für den Anwendungsfall relevanten Informationen auszuwählen und eine geeignete Technologie zur Umsetzung des SAR-Ansatzes zu spezifizieren (Zielsetzung 4.1). Um die Anwendung im Flugzeugbau zu ermöglichen, werden Funktionskomponenten identifiziert, die grundsätzlich notwendig sind, um eine Projektionstechnologie einsetzen zu können. Darunter fallen z. B. geeignete Kalibrierfunktionen zur Referenzierung des Projektors zum Prüfling sowie Steuerungsfunktionen (Zielsetzung 4.2). Das resultierende Modul wird hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit näher charakterisiert, indem mögliche Fehlerquellen und die Projektionsgenauigkeit untersucht werden (Zielsetzung 4.3). Somit werden die Rahmenbedingungen geschaf-

fen, um beurteilen zu können, ob das Projektionssystem für die präzise, räumliche Darstellung von Prüfinformationen in einem gegebenen Anwendungsfall grundsätzlich geeignet ist. Erstmals wird dadurch eine messtechnische Erfassung der Genauigkeit von SAR-Technologien in einem großen Arbeitsumfeld durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die detaillierte Untersuchung und Entwicklung der einzelnen technischen Lösungskomponenten (Informationseingabe, Umwelterfassung, Informationsausgabe). Jedes dieser Module birgt spezifische wissenschaftliche Herausforderungen – von der Auswahl geeigneter Technologien über die Entwicklung neuartiger Algorithmen bis hin zur Evaluation unter praxisnahen Bedingungen – deren Überwindung den Kern des Forschungsbeitrags dieser Dissertation darstellt.

Die vorgestellten Zielsetzungen stellen die wesentlichen Kapitel dieser Arbeit dar. Die weitere Vorgehensweise zur Erfüllung der Zielsetzungen sowie die damit einhergehende Detaillierung der Strukturierung der Kapitel wird im folgenden Abschnitt behandelt.



Abbildung 2.16: Darstellung der übergeordneten Zielsetzung, der aus der Forschungsanalyse identifizierten Defizite sowie der abgeleiteten, konkretisierten Zielsetzungen dieser Arbeit mit entsprechenden Nummerierungen wie ①.

2.2.4.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

Die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit ist darauf ausgerichtet, neue wissenschaftliche Erkenntnisse für das Forschungsfeld der Assistenzsysteme zu gewinnen. Die hierfür notwendige Basis wird durch die systematische Konzeption und Entwicklung technischer Lösungskomponenten geschaffen. Dabei wird eine hohe Nutzungsakzeptanz der entwickelten Komponenten angestrebt. Zu diesem Zweck erfolgt eine Orientierung am menschenzentrierten Entwicklungsprozess der ISO 9241-210 [368]. Für die vorliegende Arbeit wird dieser Prozess an die zuvor definierten Lösungskomponenten nach HAAT-Modell angepasst, woraus sich die in Abbildung 2.17 veranschaulichte Vorgehensweise ergibt. Diese Vorgehensweise beinhaltet die durchgängige Anwendung wissenschaftlicher Methoden, um die in Abschnitt 2.2.4.2 formulierten und in Abbildung 2.16 visualisierten konkretisierten Zielsetzungen zu erreichen. Die einzelnen Phasen des Vorgehens und deren Bezug zu den Forschungszielen dieser Arbeit gliedern sich wie folgt:

Die erste Phase, „Verstehen und Festlegen des Nutzungskontexts“ (Kapitel 3), dient der Erfüllung der ersten konkretisierten Zielsetzung (Ziel ① in Abbildung 2.16): der systematischen Erschließung der Anwendungsdomäne. Dabei wird der Nutzungskontext in Anlehnung an den Ansatz der Produkt-Prozess-Ressource [97] aus der Montagesystemplanung strukturiert und analysiert, wobei die „Ressourcen“ in diesem Fall nochmals in die eingesetzten Betriebsmittel sowie die Nutzungsgruppe, d. h. das Prüfpersonal, unterteilt werden können. Die hierbei erarbeitete Modellierung sowie die darauf aufbauende Ableitung des Unterstützungsbedarfs und des Nutzungsprofils liefern erstmalig die empirisch gestützte Basis für die Ableitung von spezifischen Anforderungen an die Assistenz in manuellen Prüfprozessen und bilden die Grundlage für die nachfolgende Komponentenentwicklung.

Die nachfolgenden Kapitel 4, 5 und 6 widmen sich der Erarbeitung und Evaluation der drei technologischen Kern-Lösungskomponenten dieser Arbeit. Dabei wird in Kapitel 4 die konkretisierte Zielsetzung ② (Informationseingabemodul), in Kapitel 5 die Zielsetzung ③ (Umwelterfassungsmodul) und in Kapitel 6 die Zielsetzung ④ (Informationsausgabemodul) systematisch bearbeitet, jeweils inklusive der in Abbildung 2.16 definierten Unterziele. Die Struktur dieser drei Kapitel folgt einem einheitlichen, bei Bedarf iterativen Vorgehen:

- Im ersten Hauptabschnitt jedes dieser Kapitel erfolgt das „Festlegen der Nutzungsanforderungen“. Dies beinhaltet die Definition eines Referenzprozesses sowie die Ableitung von funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an das jeweilige Modul, basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 3 und den

identifizierten Forschungslücken. Angepasst an die spezifizierten Anforderungen werden zudem geeignete Evaluierungsmethoden festgelegt.

- In den folgenden Hauptabschnitten wird die „Erarbeitung von Gestaltungslösungen“ für die Lösungskomponenten verfolgt. Dieser Prozess ist darauf ausgerichtet, die zuvor definierten Anforderungen zu erfüllen und die zugrundeliegenden technischen sowie wissenschaftlichen Herausforderungen des jeweiligen Moduls zu adressieren. Hierfür werden zunächst detaillierte Lösungskonzepte erarbeitet. Deren Umsetzung in erste evaluierbare Prototypen erfolgt beispielsweise durch die Überführung der konzipierten Funktionen in Softwarebausteine innerhalb eines geeigneten Frameworks. Je nachdem, ob es sich um eine initiale Entwicklung oder – basierend auf dem Feedback einer vorangegangenen Evaluationsphase – um eine Weiterentwicklung handelt, kann dieser Schritt die Neukonzeption oder die gezielte Verfeinerung bestehender Gestaltungslösungen beinhalten. Die konkrete Ausgestaltung dieser Aktivitäten ist dabei modul- und iterationspezifisch.
- An die Erarbeitung schließt sich die Phase der „Evaluierung und Diskussion von Gestaltungslösungen“ an. Hierbei wird jede entwickelte Komponente bzw. Iterationsstufe zunächst einer systematischen Evaluierung unterzogen: Mittels der zuvor festgelegten Methoden werden die entwickelten Lösungen bewertet, um beispielsweise ihre Leistungsfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit sowie ihren Beitrag zur Erreichung der zuvor definierten Anforderungen zu evaluieren. Die bedarfsorientierten Iterationsschleifen ermöglichen dabei eine gezielte Re-Evaluierung weiterentwickelter Lösungsansätze. Aufbauend auf diesen Evaluationsergebnissen werden die Resultate anschließend eingehend diskutiert, insbesondere im Hinblick darauf, inwiefern sie zur Schließung der in der Forschung identifizierten Lücken beitragen.

Der prozessorientierte Aufbau der Kapitel 4 bis 6 geht somit über die reine Entwicklung von technischen Lösungsmodulen hinaus. Er zielt darauf ab, originäre Beiträge zum Wissensstand hinsichtlich der Gestaltung, Implementierung und Leistungskennzahlen von Assistenzsystemkomponenten für Prüfprozesse an Großbauteilen zu erarbeiten und so einen Mehrwert für das Forschungsfeld zu schaffen.

Die Arbeit schließt mit Kapitel 7. Dieses fasst zunächst die zentralen Ergebnisse zusammen und ordnet sie im Forschungsfeld ein (Abschnitt 7.1). Der Ausblick (Abschnitt 7.2) erörtert daran anknüpfend zum einen das Potenzial zur Industrialisierung und Systemintegration der entwickelten Komponenten, auch unter Bezug-

nahme auf das bereits in einer begleitenden Publikation [83] konzeptionell skizzierte übergreifende Systemkonzept. Zum anderen werden, ausgehend von den erreichten Ergebnissen sowie den verbleibenden Herausforderungen und Defiziten der entwickelten Assistenzsystemkomponenten, konkrete Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsarbeiten aufgezeigt. Durch die Darlegung dieser beiden Perspektiven – des industriellen Anwendungspotenzials und der wissenschaftlichen Weiterentwicklung – wird die Anschlussfähigkeit der Arbeitsergebnisse demonstriert.

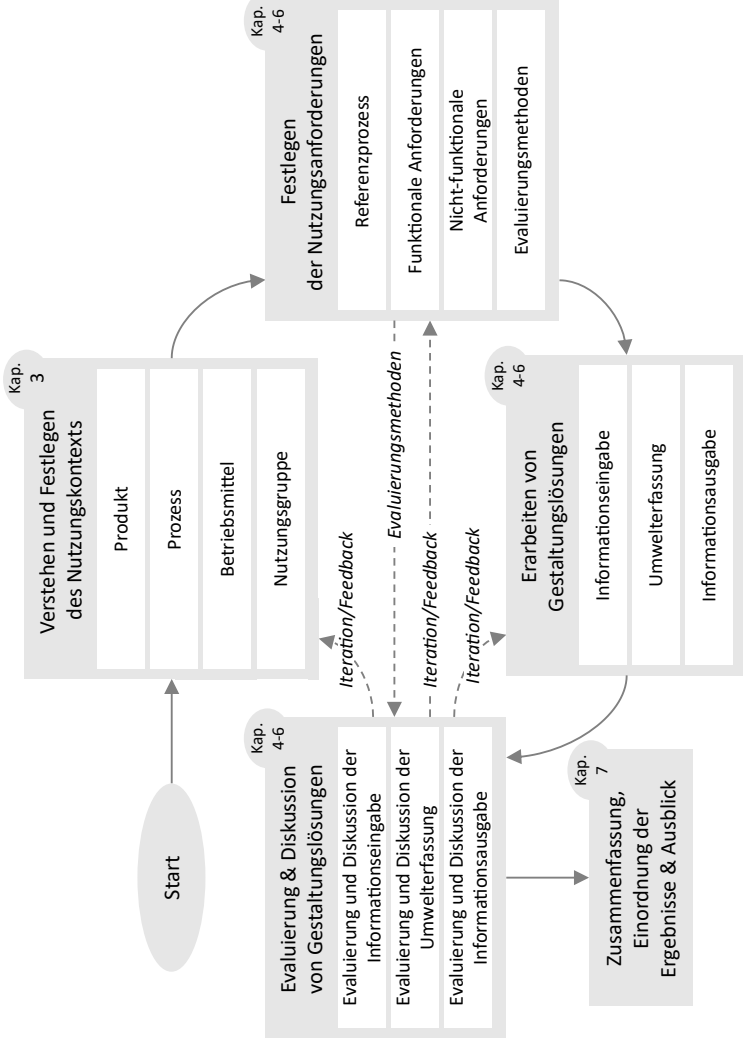


Abbildung 2.17: Vorgehensweise dieser Arbeit als menschenzentrierter Entwicklungsprozess (basierend auf dem ISO-Rahmenwerk [368]) ergänzt durch die Teilkomponenten des HAAAT-Modells, der Zusammenfassung, der Einordnung der Ergebnisse und dem Ausblick sowie entsprechenden Kapitelverweisen.

3 Analyse: Verstehen und Festlegen des Nutzungskontexts

Teilergebnisse dieses Kapitels wurden in vorangegangenen Veröffentlichungen [83], [369], [370], [371] publiziert.

Dieses Kapitel legt den wissenschaftlichen Grundstein für die Entwicklung der Assistenzsystemkomponenten, indem es den Nutzungskontext systematisch analysiert und modelliert. Das Ziel ist es, ein tiefgreifendes, empirisch fundiertes Verständnis der Rahmenbedingungen, Anforderungen und Unterstützungsbedarfe in der industriellen Prüfung von Großbauteilen zu gewinnen – eine Domäne, die in der Assistenzsystemforschung bisher wenig Beachtung fand. Hierfür wurde ein qualitativer Forschungsansatz gewählt, der in Kooperation mit Zulieferern von Kabinen- und Rumpfkomponten Werksbegehungen, Workshops und strukturierte Experteninterviews umfasste. Der Fokus dieser empirischen Erhebung lag auf der Endprüfung (Abschnitt 2.1.1.1) der Produkte, da hier aufgrund der Prozess- und Prüfvielfalt ein signifikanter Bedarf und Hebel für Assistenzlösungen besteht.

Zur Analyse dieses Nutzungskontextes wurden in Kooperation mit Zulieferern von Kabinen- und Rumpfkomponten Werksbegehungen, Workshops und Experteninterviews durchgeführt. In beiden befragten Unternehmen lag der Fokus auf den potenziellen Nutzenden der in Abschnitt 2.1.1.1 erläuterten Endprüfung der Produkte. Hier besteht aufgrund der Vielzahl der Prüfungen der größte Hebel für den Einsatz von Assistenzlösungen.

Die Inhalte des Kapitels gliedern sich zunächst nach einem erweiterten PPR-Ansatz im Abschnitt 3.1 zu den untersuchten Produkten, Prozessen und Ressourcen (Betriebsmittel, Mensch). In diesem Zusammenhang wird der Begriff Entität verwendet, um Objekte oder Elemente zu beschreiben, die Produkten, Prozessen oder Ressourcen zugeordnet werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in einem Datenmodell im Abschnitt 3.2 dokumentiert, dessen Ziel es ist, die Beziehungen zwischen den einzelnen Entitäten einer Prüfung zu verdeutlichen. Abschließend werden im Abschnitt 3.3 der Unterstützungsbedarf anhand von Pro-

zessschwachstellen und die Implikationen des Nutzungsprofils auf den Entwicklungsprozess aufgezeigt.

3.1 Analyse von Produkten, Prozessen und Ressourcen

Dieser Abschnitt entlehnt sich der Produkt-Prozess-Ressource (PPR)-Methode, die unter anderem für die Planung und Analyse von Montagesystemen [92], [372], [373] angewendet wird. Da es sich bei einem Assistenzsystem um einen Teil eines Montagesystems auf Arbeitsstationsebene handelt, ist dieser Ansatz für die Strukturierung der Analyse übertragbar. Aufgrund der definierten menschenzentrierten Entwicklungsmethodik in Abschnitt 2.2.4.3 werden die Ressourcen der PPR-Methode in die verwendeten Betriebsmittel und das Prüfpersonal aufgeteilt. Für die Analyse werden im Bereich des Flugzeugrumpfes eine Hecksektion (Abbildung 3.1) und im Bereich der Flugzeugkabine eine „Single-Aisle-Lavatory“ (Abbildung 3.2) untersucht. Diese Analyse stellt eine Vertiefung der im Abschnitt 1.3 dargestellten Rahmenbedingungen der Flugzeugproduktion mit Fokus auf die manuellen Prüfprozesse dar, die bisher im Kontext der Assistenzsysteme nicht näher betrachtet wurden. Die Analysen der einzelnen Bestandteile verfolgen die nachfolgenden Ziele:

- **Produktanalyse:** Ziel der Produktanalyse ist die Beschreibung der relevanten Prüfmerkmale, die durch manuelle Prüfprozesse erfasst werden, sowie der begleitenden Arbeitsdokumente.
- **Prozessanalyse:** Ziel der Prozessanalyse ist es, den Prozess vom Eingang des Prüflings bis zum Verlassen des Prüfbereichs darzustellen.
- **Ressourcenanalyse:** Ziel der Ressourcenanalyse ist zum einen die Identifikation der relevanten Prüf- und Messmittel und zum anderen die Darlegung der Eigenschaften, die das Prüfpersonal charakterisieren.

Die gewählte Vorgehensweise ist prinzipiell unabhängig von einem bestimmten Produktspektrum anwendbar und kann bei Bedarf auf andere Produkte der Domäne transferiert werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass in den folgenden Abschnitten sowie im weiteren Verlauf der Arbeit aus Gründen der Vertraulichkeit auf die Spezifikation von Prüfparametern (z. B. Toleranzbereiche) sowie auf die detaillierte Beschreibung von Prüfplänen verzichtet wird. Eine abstrakte Darstellung dieser Aspekte ist für die Erarbeitung eines grundlegenden Nutzungskontextes ausreichend.

3.1.1 Produkte

Die Definition, welche Merkmale eines Produkts als Prüfmerkmale definiert werden, wird bei beiden Zulieferkomponenten gemeinsam mit den OEMs getroffen. Die Entscheidungsgrundlagen sind in erster Linie sicherheitskritische und regulatorische Gesichtspunkte. Aber auch Auswirkungen einer Merkmalsausprägung auf die Montierbarkeit in der FAL, die aerodynamischen Fähigkeiten, die Funktionen für Flugpersonal, Fluggäste und Wartungspersonal sowie Ästhetik werden berücksichtigt. Abbildung 3.3 dient in diesem und den folgenden Abschnitten dazu, die Ergebnisse der Ausführungen zusammenzufassen. In der Abbildung wird keine Unterscheidung zwischen den betrachteten Produkten bzw. Prüflingen (Lavatory, Hecksektion) getroffen.

Sowohl bei der Hecksektion (Abbildung 3.1) als auch bei der Lavatory (Abbildung 3.2) sind dimensionale Größen wie z. B. Längen, Abstände, aber auch Form- und Lagemerkmale (Winkligkeiten, Parallelitäten, Positionen) vorkommende Prüfmerkmale. Einfache Funktionsprüfungen, für die keine speziellen Messgeräte erforderlich sind, z. B. die Prüfung eines Hebels oder die einer Wartungsklappe, sind bei der manuellen Prüfung beider Produkte vorgesehen. Neben diesen dimensional Größen gehören auch qualitative Merkmale wie das Vorhandensein und die korrekte Montage von Bauteilen zu den Prüfmerkmalen. Ferner ist die Sicherstellung der Unversehrtheit der Materialoberflächen ein weiteres Prüfmerkmal. Für Komponenten der Flugzeugkabine, die die Qualitätswahrnehmung des Fluggastes wesentlich prägt, ist das Prüfmerkmal der optischen Unversehrtheit von besonderer Bedeutung.

Weitere relevante Merkmale, die an der Hecksektion zu erfassen sind, ergeben sich insbesondere aus aerodynamischen und sicherheitstechnischen Anforderungen. In diesem Zusammenhang sind die Eigenschaften der Niet als dominierende Verbindungselemente von zentraler Bedeutung. Geprüft werden beispielsweise der Nietkopfüberstand- bzw. unterstand in Abhängigkeit des Niettyps (Vollniet,



Abbildung 3.1: Untersuchte Hecksektion in einer Haltevorrichtung.

Hi-Lok), Randabstände, Abstände zwischen einzelnen Nieten oder Nietkopfverkipfung [101]. Im Zuge dessen wird auch die Erscheinung dieser Verbindungselemente bewertet, also auf offensichtliche Beschädigungen untersucht. Als Teil der Primärstruktur trägt die Einhaltung dieser Merkmale zur Stabilität des Flugzeugs und zur gleichmäßigen Lastverteilung bei [374]. Spalt- und Versatzmaße von Teilen der Außenhaut zueinander sind als Prüfmerkmale für Strukturbauteile ebenfalls von Belang. Denn zu große Spalt- und Versatzmaße führen zusammen mit erhöhten Nietkopfüberständen zu ungünstigen aerodynamischen Eigenschaften des Flugzeugs und damit zu einem verstärkten Emissionsausstoß im Betrieb. Folglich ist die Einhaltung dieser Merkmale auch für die Fluggesellschaften als Endkunden von erheblichem wirtschaftlichem Interesse.

Die genannten Prüfmerkmale unterscheiden sich dadurch, dass sie entweder besser quantitativ oder qualitativ beschrieben werden können. Im ersten Fall werden sie mittels einer Geometrieprüfung, im letzteren durch eine Sichtprüfung beurteilt (Abbildung 3.3).



(a) Frontansicht.

(b) Innenansicht.

Abbildung 3.2: Verschiedene Ansichten der untersuchten Lavatory.

Die Prüfmerkmale sowie alle notwendigen Informationen zu deren Erfassung werden in einem Prüfplan festgehalten. Für die Hecksektion als invariante Komponente sind diese Informationen durch die Prüfplanung vollständig definiert. Im Gegensatz dazu ist der Planungsaufwand für die Definition eines Prüfplans für jede Produktvariante bei Kabinenkomponenten zu hoch, weshalb hier mit Prüfplänen für Produktfamilien gearbeitet wird. Diese enthalten einen festen Satz von Merkmalen, die allen Varianten einer Familie gemeinsam sind. Variantenspezifische Prüfmerkmale werden auf Basis der Konstruktionsunterlagen und der Expertise des Prüfpersonals eigenständig ausgewählt, geprüft und dokumentiert.

	 Manuelle Geometrieprüfung	 Visuelle Prüfung (Sichtprüfung)
Prüfmerkmale 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Längen und Abstände ▪ Positionen ▪ Winkligkeit, Parallelität ▪ Nietcharakteristika ▪ Spalt- und Versatzmaße 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfache Funktionsprüfungen ▪ Anwesenheit von Komponenten ▪ Korrekte Montage von Komponenten ▪ Oberflächen ▪ Beschädigungen von Verbindungselementen
Arbeitsdokumente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prüfplan mit Prüfanweisungen ▪ Prüfprotokolle ▪ Technische Zeichnungen/Stücklisten ▪ Typische Fehlerbilder ▪ Q-Gate-Protokolle ▪ Freigabeprotokolle 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prüfplan mit Prüfanweisungen ▪ Prüfprotokolle ▪ Technische Zeichnungen/Stücklisten ▪ Typische Fehlerbilder ▪ Leitlinien zur Bewertung des Erscheinungsbilds ▪ Q-Gate-Protokolle ▪ Freigabeprotokolle
Prüf- & Hilfsmittel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bandmaß, Stahllineal, Messschieber ▪ Tiefenmessschieber ▪ Winkel, Wasserwaage ▪ Fühlerlehre, Prüfstifte ▪ Digitale Messschieber (in Erprobung) ▪ Handgeführte Laserlinienscanner (in Erprobung) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Prüfmittel <hr/> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Klebemarker zur Markierung von aufgefundenen Defekten am Bauteil
Schwachstellen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auftretende Fehlerarten: <ul style="list-style-type: none"> - Zuordnungsfehler (z.B. falsche Niet) - Übertragungsfehler (Medienbruch) ▪ Erhöhter Zeitbedarf zum Auffinden der Prüfpositionen ▪ Redundante Prüfungen durch verteilte Prüfprotokolle ▪ Lange Reaktionszeiten (zeitlicher Versatz zwischen Datenaufnahme und digitaler Verfügbarkeit) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auftretende Fehlerarten: <ul style="list-style-type: none"> - Klassifikationsfehler (z.B. falsche Defektklasse) - Übertragungsfehler (Medienbruch) ▪ Redundante Prüfungen durch verteilte Prüfprotokolle ▪ Lange Reaktionszeiten (zeitlicher Versatz zwischen Datenaufnahme und digitaler Verfügbarkeit) ▪ Unstrukturierte und personenabhängige Dokumentation

Abbildung 3.3: Prüfmerkmale, relevante Arbeitsdokumente, Prüf- und Hilfsmittel und Schwachstellen in geometrischen und visuellen Prüfungen der untersuchten Flugzeugkabinen- und Strukturkomponenten.

Weitere mit dem Prüfplan verbundene Arbeitsdokumente sind die zur Dokumentation erforderlichen Prüfprotokolle sowie technische Zeichnungen und Stücklisten der Prüflinge. Technische Zeichnungen dienen dabei der Kennzeichnung von Prüfpositionen oder zur Veranschaulichung von Prüfanweisungen. Häufig werden

zur Unterstützung der Fehleridentifikation typische, auftretende Fehlerbilder in Form von Fotos beigelegt. Insbesondere bei der subjektiven Sichtprüfung helfen diese dem Prüfpersonal bei der Beurteilung von Fehlern und haben zusätzlich die Funktion eines „Grenzmusters“, d.h. die Darstellung, ab wann ein Merkmal als n.i.O. einzustufen ist. Einschränkungen ergeben sich jedoch auch in diesem Zusammenhang durch die hohe Varianz von Flugzeugkabinen, die z. B. aufgrund der kundenspezifischen Oberflächengestaltungen zustande kommt, sodass nicht jede Variante mit einem eigenen Grenzmuster illustriert werden kann. Zur Abstraktion der Grenzmuster werden daher Leitlinien formuliert, die eine verallgemeinerte Vorgehensweise zur Qualitätsbewertung in der Sichtprüfung festlegen. Neben Dokumenten, die sich aus der Spezifikation des Arbeitsprozesses motivieren, haben verschiedene Protokolle die Funktion, die Einhaltung interner oder branchenspezifischer Qualitätsstandards sicherzustellen. Dabei werden über den gesamten Herstellungsprozess Quality Gates definiert, an denen die einzelnen Prüfergebnisse konsolidiert werden und eine interne Freigabe erfolgt. Aufgrund der luftfahrtspezifischen Regularien sind zusätzliche Freigabeprotokolle vonnöten, die die Lufttüchtigkeit der Prüflinge und damit die Erfüllung der Anforderungen der Luftfahrtbehörden bescheinigen.

3.1.2 Prozesse

Die Grundschritte in der Durchführung der Prüfprozesse von Hecksektion und Lavatory unterscheiden sich nicht, wodurch sie mithilfe eines gemeinsamen Diagramms in „Business Process Model and Notation“ (BPMN) [375] dargestellt werden können (Abbildung 3.4).

Der Prozess startet mit dem Eingang des Prüflings in den Arbeitsbereich (Prüfstation) der Endprüfung. Die Organisationsform dieser Arbeitsbereiche kann in beiden Fällen als „Werkstattmontage“ beschrieben werden. Infolge des Umfangs der erforderlichen Prüfungen sind in diesen Arbeitsbereichen häufig mehrere Personen am Prüfprozess beteiligt. Zunächst werden die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Arbeitsdokumente (Prüfplan und Bezugsdokumente) zum Auftrag gesichtet. Diese können an einem Rechner im Arbeitsbereich aus einem Computer-Aided Quality (CAQ)-System oder Manufacturing Execution System (MES) eingesehen und ausgedruckt werden. Prüfpläne sind in verschiedene Prüfschritte gegliedert, die die Erfassung der definierten Prüfmerkmale zum Ziel haben. Da ein Prüfmerkmal, wie z. B. der Nietkopfüberstand, ggf. mehrfach an einem Bauteil überprüft werden muss, beinhaltet jeder Prüfschritt wiederum Prüfpositionen, die einen ört-

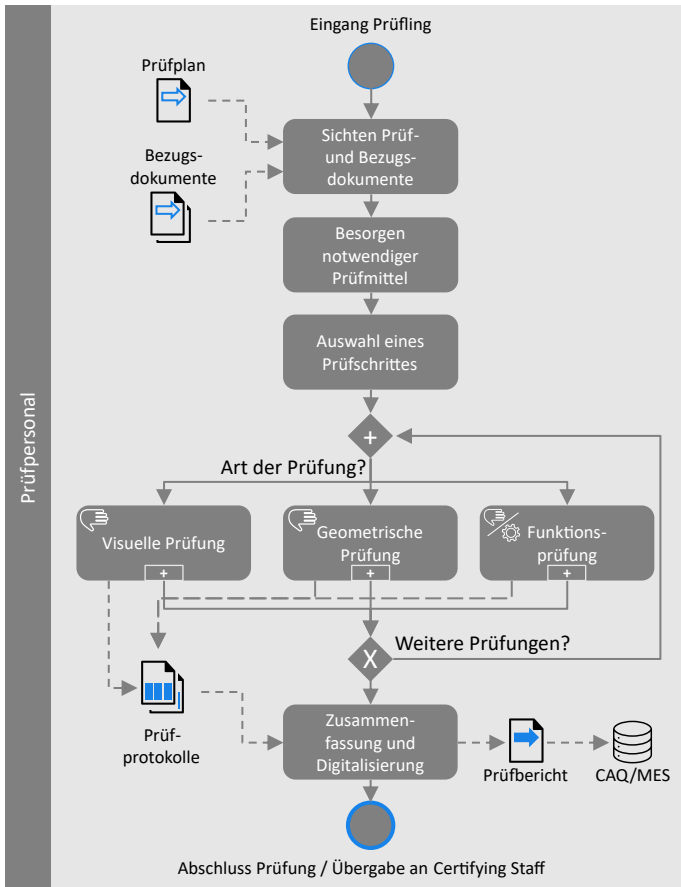


Abbildung 3.4: Prüfprozess von Eingang des Prüflings in den Arbeitsbereich bis zur Übergabe an das Certifying Staff bzw. Verlassen des Arbeitsbereiches in BPMN-Notation.

lichen Bezug von Merkmalen zum Bauteil herstellen. Bei geometrischen Prüfungen beziehen sich die definierten Toleranzbereiche daher immer auf eine bestimmte Prüfposition.

Vor Beginn der eigentlichen Prüfungen wird sichergestellt, dass sich alle im Prüfplan aufgeführten Prüfmittel im Arbeitsbereich befinden und eine gültige Kalibrierung aufweisen. Es folgt die Abarbeitung des Prüfplans, die mit der Auswahl eines Prüfschrittes beginnt. Da diese Abarbeitung keiner vorgeschriebenen Reihenfolge

unterliegt, können die verschiedenen Prüfschritte von mehreren Personen parallel durchgeführt werden. Die in der Endprüfung vorkommenden Prüfverfahren sind neben den beschriebenen manuellen visuellen und geometrischen Prüfungen auch teilautomatisierte Funktionsprüfungen. Hierbei werden z. B. elektrische oder hydraulische Systemkomponenten an spezialisierte Messgeräte angeschlossen, um die Betriebsbedingungen zu simulieren und zu testen. Diese sind aus Gründen der Vollständigkeit ebenfalls in der Abbildung dargestellt, werden aber nachfolgend nicht im Detail betrachtet. Die Prozesse der geometrischen und visuellen Prüfung sind hier vereinfacht mit dem BPMN-Element „Unterprozess“ illustriert, welches als Blackbox zu interpretieren ist. Eine Auffächerung dieser Kernprozesse erfolgt in den Kapiteln 4 und 5 im Rahmen der Modulentwicklung.

Unabhängig von der Art der Prüfung erfolgt bei beiden befragten Unternehmen die Dokumentation der Prüfergebnisse handschriftlich auf ausgedruckten Prüfprotokollen. Die Prüfprotokolle sind eindeutig einem Auftrag zugeordnet und bilden die Grundlage für die Dokumentation gegenüber Kunden und Luftfahrtbehörden. Nach Abschluss aller im Prüfplan aufgeführten Prüfschritte werden die Prüfprotokolle gesammelt und ein abschließender Prüfbericht erstellt. Da diese in Papierform vorliegen, müssen die Ergebnisse manuell in das CAQ-System bzw. MES übertragen werden. Mit dieser Tätigkeit ist der Prozess für das Prüfpersonal abgeschlossen und es folgt die Übergabe der Dokumente an den sogenannten „Certifying Staff“, der auf Basis des Prüfberichtes eine Verwendungsentscheidung trifft [376]. Im Falle der Konformität eines Prüflings folgen die Erstellung der Freigabeprotokolle und die Übergabe des Bauteils an den Warenausgang.

3.1.3 Betriebsmittel

Die für die Prüfung der betrachteten Produkte eingesetzten Betriebsmittel können in Prüfmittel und Hilfsmittel unterteilt werden. Prüfmittel dienen der direkten Erhebung der Kenngrößen, die das Prüfmerkmal beschreiben. Hilfsmittel haben dagegen eine rein unterstützende Funktion. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass in beiden Fällen Geometrieprüfungen überwiegend mit einfachen, handgeführten Mess- und Prüfmitteln wie Messschiebern oder Fühlerlehren durchgeführt werden (Abbildung 3.3). Vereinzelt wird jedoch bereits versucht, diese durch digitale Pendant, z. B. Messschieber mit digitalen Schnittstellen, zu ersetzen. Daneben werden zudem handgeführte Laserlinienscanner erprobt, die eine Vielzahl von Prüfmerkmalen erfassen können. Damit kann nicht nur der Dokumentationsaufwand reduziert, sondern auch eine höhere Messgenauigkeit als mit konventionellen

Messmitteln erreicht werden. Die vorgefundenen Messmittel in der Flugzeugproduktion und die erkennbaren Bestrebungen hin zu digitalen Messmitteln decken sich mit den Erkenntnissen aus der Forschungsanalyse im Abschnitt 2.2.3.2.

Im Kontrast dazu erfolgt die visuelle Prüfung gänzlich ohne Prüfmittel, allein auf Basis der Sinneswahrnehmung und des Urteilsvermögens des Prüfpersonals. Allerdings werden hier Hilfsmittel zur Markierung der gefundenen Fehler eingesetzt. Dazu werden Klebmarkierungen in unmittelbarer Nähe der Fehler angebracht. Ziel dieser Maßnahme ist die Reduzierung der Suchzeiten in den nachfolgenden Nacharbeitsprozessen, die an separaten Arbeitsplätzen und von anderem Personal durchgeführt werden.

3.1.4 Prüfpersonal

Da die Endprüfung die letzte Instanz vor der Auslieferung der Produkte an die OEMs darstellt und insbesondere die Hecksektion eine hohe Sicherheitsrelevanz hat, schlägt sich dies in den Qualifikationsanforderungen an das Prüfpersonal nieder. Das Prüfpersonal in der Flugzeugproduktion zeichnet sich dadurch aus, dass in vielen Fällen mindestens eine Berufsausbildung (z. B. Fluggerätmechaniker), aber auch ein Techniker- oder Meisterabschluss Voraussetzung für die Ausübung der Tätigkeit sein kann. Für die Anwendung spezieller Prüfverfahren, wie z. B. Röntgen- oder Ultraschallprüfung, sind weitere Schulungen zu absolvieren. Darüber hinaus sind branchenspezifische, zertifizierte Aus- und Weiterbildungen, insbesondere für die Freigabe von Luftfahrzeugen (wie z. B. CAT B1/B2, EASA Part 21G und Part 66 [377], [378]), für das Certifying Staff zwingend erforderlich.

Diese Ausführungen zeigen, dass die weitreichende Verantwortung des Prüfpersonals mit einer entsprechenden Fachkompetenz einhergeht. Anders als in anderen Industriezweigen sind diese Qualifizierungsmaßnahmen für das Personal nicht nur aus unternehmerischer Sicht notwendig, um eine hohe Produktqualität zu gewährleisten. Sie sind integraler Bestandteil der Luftfahrtgesetzgebung und Teil branchenspezifischer Standards. Neben der Qualifikation zur Durchführung von Prüfprozessen wird auf ein hohes Qualitätsbewusstsein der Mitarbeitenden hingewirkt. Für die Zertifizierung eines QM-Systems nach EN ISO 9100 [379], die eine Voraussetzung für Zulieferer in der Luftfahrtindustrie ist, müssen z. B. die Qualitätspolitik und die Qualitätsziele (Abbildung 2.3) allen Mitarbeitenden bekannt sein. Die Mitarbeitenden benötigen zudem ein klares Verständnis darüber, wie sie selbst zur Gewährleistung einer hohen Qualität und Produktsicherheit beitragen und welche Konsequenzen individuelle Fehler für den Kunden haben können [66].

Das beschriebene Qualitätsbewusstsein wird im Rahmen der Zertifizierung sowie in regelmäßigen Audits auf allen Personalebene überprüf. Zusammenfassend können das Prüfpersonal und damit die potenziellen Nutzenden des zu entwickelnden Assistenzsystems als Fachkräfte mit ausgeprägter Expertise eingestuft werden.

Trotz des fortgeschrittenen Qualifikationsniveaus sind Fehler beim Prüfen der vorgestellten Produkte unvermeidbar. Aus diesen auftretenden Fehlern und den Rahmenbedingungen des Prozesses lässt sich der grundsätzliche Unterstützungsbedarf erkennen, der durch das Assistenzsystem gedeckt werden soll. Dieser wird zusammen mit dem Nutzungsprofil im Abschnitt 3.3 näher erläutert. Zuvor werden jedoch im folgenden Abschnitt die bisherigen Ausführungen in einem Datenmodell zusammengefasst, das die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten Produkt, Prozess und Betriebsmittel veranschaulicht.

3.2 Ableitung eines Datenmodells

Ziel dieses Abschnitts ist die Ableitung eines Datenmodells auf Basis der Analyseergebnisse der PPR-Methode. Dieses Datenmodell des Nutzungskontextes stellt einen Beitrag zu den Zielen dieser Arbeit (Abbildung 2.16) dar und ermöglicht eine Abbildung der zugrundeliegenden Datenstruktur. Grundsätzlich kann dieses Datenmodell auch für die Entwicklung anderer technischer Systeme in diesem Nutzungskontext verwendet bzw. je nach Anwendungsfall angepasst oder erweitert werden.

Im Kontext von Assistenzsystemen, die als mechatronische Systeme durch Software gesteuert werden und Daten zwischen den einzelnen Komponenten austauschen (Abschnitt 2.2.2), bildet ein Datenmodell die Grundlage der Entwicklung. Insbesondere für die Integration der einzelnen Teilkomponenten ist es entscheidend zu verstehen, welche Informationen zur Verfügung stehen und wie diese miteinander verknüpft sind. Das im Folgenden vorgestellte konzeptionelle Datenmodell ermöglicht die Migration in ein logisches und physisches Datenmodell. Beide Datenmodelle stellen die Blaupause für die Implementierung einer Datenbank und der Kommunikationsstruktur dar, die für die Integration der Teilmodule im Rahmen einer Industrialisierung unerlässlich ist.

Ein häufig verwendetes Werkzeug zur Entwicklung konzeptioneller Datenmodelle ist das Entity Relationship Diagramm (ERD). Es erlaubt, die relevanten Informationsobjekte (Entitäten) abzubilden und ihre logischen Beziehungen in Form von Kardinalitäten festzuhalten [364]. Abbildung 3.5 zeigt das ERD des beschrie-

der Eigenschaften einzelner Entitäten vorgesehen sind, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht abgebildet. So wird z. B. die Prüfposition, die ein Attribut eines Prüfschrittes ist, nicht dargestellt. Zur Anreicherung der einzelnen Entitäten mit Attributen wird auf verschiedene Normen und Veröffentlichungen aus den Bereichen der Prüfplanung [112], [381], [382] bzw. des Prüfmittelmanagements [383], [384] verwiesen.

3.3 Unterstützungsbedarf und Nutzungsprofil in der manuellen Prüfung

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die grundlegenden Charakteristika einer manuellen Prüfung untersucht und in einem Datenmodell (ERD) zusammengeführt wurden, soll in diesem Abschnitt der vorherrschende Unterstützungsbedarf und das Nutzungsprofil präzisiert werden. Dadurch soll gemäß der festgelegten Zielsetzung die Nutzung von Assistenzsystemen für Prüfprozesse erschlossen werden (Abbildung 2.16).

Ein Unterstützungsbedarf entsteht grundsätzlich dort, wo in manuellen Prozessen Fehler auftreten, die durch gezielte Assistenz potenziell vermieden werden könnten. Die Ergebnisse der folgenden Schwachstellenanalyse sollen daher Antwort auf die Leitfrage geben: *„Welche wiederkehrenden Schwachstellen (Fehler) existieren in den aktuellen manuellen Prüfprozessen und bieten Ansatzpunkte für eine Unterstützung durch Assistenzlösungen?“* Daran anknüpfend zielt die Untersuchung des Nutzungsprofils auf die Beantwortung der Leitfrage: *„Welche Implikationen ergeben sich aus den Eigenschaften der Nutzenden für die Entwicklung von Assistenzsystemkomponenten?“* ab.

3.3.1 Unterstützungsbedarf: Prozessschwachstellen der manuellen Prüfung

Zur Beantwortung der zuvor formulierten ersten Leitfrage werden nachfolgend die im Rahmen der Prozessanalyse identifizierten Schwachstellen (Fehler) der untersuchten manuellen Prüfungen dargestellt. Diese Fehler definieren den spezifischen Unterstützungsbedarf, der durch Assistenzlösungen adressiert werden kann und Ansatzpunkte für deren Konzeption bietet.

Dazu werden die im Abschnitt 2.1.1.3 vorgestellten Fehlerkategorien herangezogen und für die beiden Prüfverfahren (geometrisch, visuell) aufgeschlüsselt (Abbildung 3.3). Da gerade die Kategorie der „groben Prüffehler“ und deren Unterkategorien auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführen sind und somit durch

Assistenzlösungen behoben werden können, erfolgt eine Reduktion auf diese Fehlerkategorie. Die im Folgenden detaillierten Schwachstellen basieren auf den Prozessanalysen der beteiligten Unternehmen. Sie stellen einen repräsentativen Auszug des für den Anwendungsbereich typischen Fehlerspektrums dar. Obwohl diese Erhebung nicht erschöpfend ist, ermöglicht sie einen ersten fundierten Einblick in die spezifischen Herausforderungen. Diese Erkenntnisse sind für die Forschung von besonderer Bedeutung, da eine vergleichbare systematische Analyse des Prozessstyps „Prüfen“ im Kontext der Assistenzsysteme bisher aussteht.

Die vorherrschende Fehlerkategorie bei den analysierten geometrischen Prüfungen ist der **Zuordnungsfehler**, der auf die zeichnungsbasierte Visualisierung der Prüfpositionen zurückzuführen ist. Das Prüfpersonal hat die Aufgabe, die auf der 2D-Zeichnung markierten Prüfpositionen gedanklich auf die tatsächlichen Objektkoordinaten zu übertragen. Selbst für erfahrenes Personal stellt dies eine Herausforderung dar, wodurch insbesondere Prüfmerkmale mit sehr vielen Prüfpositionen anfällig für diese Fehlerkategorie sind. Hier sind in erster Linie Nietprüfungen zu nennen, da Niete eines Typs visuell nicht unterscheidbar sind und sich über die gesamte Bauteilstruktur erstrecken. Ein Nebeneffekt ist der erhöhte Zeitbedarf zum Auffinden der richtigen Prüfposition am Bauteil, wodurch die Durchführungszeit ansteigt.

Bei der visuellen Prüfung hingegen tritt diese Fehlerkategorie nicht auf, da die Prüfpositionen nicht durch Koordinaten, sondern durch einzelne Komponenten (bis hin zum kompletten Prüfling) beschrieben werden. Stattdessen können jedoch **Klassifizierungsfehler** auftreten, wie sie in Abbildung 2.5 beispielhaft dargestellt sind. Im schlimmsten Fall führen diese Klassifikationsfehler zu einem Durchschlupf eines Defekts, welcher erst in der FAL des OEMs aufgefunden wird. In der Folge kann es zu kostenintensiven Nacharbeiten (in der FAL) oder zur Rücksendung des gesamten Produktes an den Lieferanten kommen.

Aufgrund der papiergestützten Dokumentation der geometrischen und visuellen Prüfungen sind beide von **Übertragungsfehlern** betroffen. Übertragungsfehler äußern sich in diesem Fall in der fehlerhaften Übernahme der Prüfergebnisse in das betriebliche Informationssystem. Gründe hierfür können einfache Tippfehler oder Fehlinterpretationen analoger Aufzeichnungen sein, die stark von der jeweiligen Handschrift der prüfenden Person beeinflusst werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Personen, die die Ergebnisse digitalisieren, diese nicht notwendigerweise selbst erhoben haben müssen. Häufig werden mehrere Prüfprotokolle gesammelt und dann entkoppelt vom Prüfprozess gebündelt in ein Informationssystem einge-

geben. Da sich die Abarbeitung von Prüfschritten mit vielen Prüfpositionen auch über mehrere Schichten erstrecken kann, kann die ausführende Person sogar innerhalb eines Protokolls variieren.

Negative Begleiterscheinungen in diesem Zusammenhang sind, dass es zu **redundanten Prüfungen** kommen kann, wenn z. B. bei einem Schichtwechsel ein noch unvollständiges Prüfprotokoll nicht ordnungsgemäß übergeben wird. Während sich der Prüfling am Prüfplatz befindet, fehlt der Überblick über den aktuellen und prüfpositionsgenauen Abarbeitungsstand des Prüfplans. Die zeitliche Entkopplung zwischen Datenerfassung und Digitalisierung dieser Informationen führt nicht nur zu einem fehlenden Verständnis der durchzuführenden Tätigkeiten, sondern auch zu langen Reaktionszeiten bei auftretenden n.i.O.-Ergebnissen, auf die erst reagiert werden kann, wenn sie digital und für alle beteiligten Personen zugänglich vorliegen.

Ein besonderer Effekt im Rahmen der Sichtprüfung, der durch die Dokumentation in Papierform negativ beeinflusst wird, ist die stark **schwankende Dokumentationsqualität** der gefundenen Fehler. Wird ein Fehler am Bauteil identifiziert, wird dieser über Freitextfelder beschrieben. Der Informationsgehalt dieser unstrukturierten Daten ist somit stark von der Sorgfalt des Prüfpersonals abhängig. Die fehlende Definition eines notwendigen Mindestinformationsgehaltes und der möglichen Ausprägungen der einzelnen Informationen erschweren die standardisierte Auswertung dieser Qualitätsdaten. Datenbasierte Verfahren, wie z. B. Pareto-Analysen zur Identifikation häufiger Produktfehler, sind daher zwangsläufig mit einem erheblichen Mehraufwand an Datenvorverarbeitung (Bereinigung, Zusammenführung etc.) verbunden. Dieser Effekt betrifft nicht die geometrischen Prüfungen, bei denen die Information vollständig durch das Mess- bzw. Prüfergebnis (Ist-Wert) beschrieben wird.

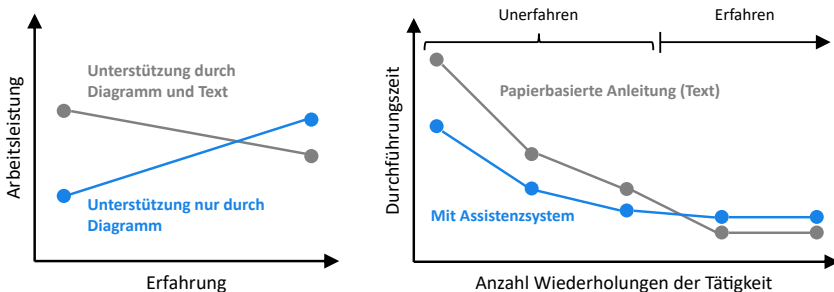
Die Analyse zeigt, dass in der manuellen geometrischen und visuellen Prüfung verschiedene Fehlerarten auftreten, was einen Unterstützungsbedarf schafft, den das Assistenzsystem adressieren soll. Die Ergebnisse fließen in die Entwicklung der einzelnen Lösungsmodule ein und es wird abschließend diskutiert, inwieweit ein Beitrag zur Behebung dieser Schwachstellen durch die Lösungsmodule geleistet werden kann.

3.3.2 Implikationen des Nutzungsprofils auf den Entwicklungsprozess

Um aus den vorangegangenen Ausführungen Implikationen für den Entwicklungsprozess ableiten zu können, ist es notwendig, die tatsächlichen Nutzenden des zu entwickelnden Assistenzsystems nochmals genauer zu betrachten.

Im Kontext von Assistenzsystemen ist die *extrinsische Belastung* eine zentrale Größe aus der Cognitive Load Theory (CLT), da sie durch die Gestaltung der Instruktionen beeinflusst wird [385]. Assistenzsysteme sollten diese Belastung minimieren, um kognitive Ressourcen für die eigentliche Aufgabenbewältigung und das Lernen verfügbar zu halten.

Um extrinsische Belastungen gezielt zu minimieren, ist eine bedarfsgerechte Informationsgestaltung von zentraler Bedeutung. Der „Expertise-Reverse-Effekt“ besagt, dass detaillierte Anweisungen für weniger Erfahrene hilfreich sein können, während die gleichen Informationen von Erfahrenen als überflüssig empfunden werden und die extrinsische kognitive Belastung erhöhen können [386]. Abbildung 3.6a veranschaulicht diesen Effekt an einem Beispiel: Versuchsgruppen mit unterschiedlichem Erfahrungsniveau bearbeiteten Aufgaben zu einem elektrischen Schaltplan und erhielten entweder Text und Diagramme oder nur Diagramme zur Unterstützung. Die Ergebnisse zeigen, dass weniger erfahrene Personen von umfangreicher Unterstützung profitieren, während erfahrene Personen mit rein visueller Unterstützung effizienter arbeiten [387].



(a) Expertise-Umkehr-Effekt in Anlehnung an [387], [388]. (b) Lernkurven mit und ohne Verwendung eines Assistenzsystems als Zusammenhang zwischen Durchführungszeiten und Anzahl der Wiederholungen einer Tätigkeit in Anlehnung an [233].

Abbildung 3.6: Expertise-Umkehr-Effekt und Lernkurven.

Unter Berücksichtigung dieses Phänomens ergibt sich die erste Implikation für die Entwicklung dieses Assistenzsystems: Die **Notwendigkeit der Anpassung der Informationsgestaltung an den Erfahrungsstand des Prüfpersonals**. Dies gilt umso mehr, als die Vernachlässigung von Zielgruppen mit hoher Expertise negative Auswirkungen auf die Arbeitsleistung haben kann.

Dass die Zielgruppe der hoch qualifizierten Mitarbeitenden bei der Entwicklung von Assistenzsystemen bisher wenig Beachtung gefunden hat, zeigt Abbildung 3.6b aus [233]. Hier wird eine qualitative Zusammenfassung der erreichten Lernkurven aus verschiedenen Studien zu aktuellen Assistenzsystemen für die Kontrollgruppe „papierbasierte Anleitungen“ dargestellt. Die konvergierenden Lernkurven zeigen, dass mit den bisherigen Assistenzsystemen vor allem bei unerfahrenen Mitarbeitenden ein positiver Effekt erzielt wird, während bei erfahrenen Mitarbeitenden die Durchführungszeit hinter der papierbasierten Unterstützung zurückbleibt. Als Grund hierfür wird von [233] die fehlende Zentrierung auf die Bedürfnisse erfahrener Mitarbeitender und deren tatsächliche Arbeitsprozesse genannt. So werden in der Literatur oftmals stark vereinfachte oder fingierte Montageszenarien (z. B. Montage von Bauklötzen) als Grundlage für die Entwicklung und Evaluierung genutzt. Hieraus wird die zweite Implikation abgeleitet: Die Entwicklung und Evaluierung der Module des Assistenzsystems muss auf **realitätsnahen Anwendungsfällen und deren Prozessen** basieren.

4 Entwicklung des Informationseingabemoduls für die Sichtprüfung mit Fokus auf Oberflächendefekten

Teilergebnisse dieses Kapitels wurden bereits in vorangegangenen Veröffentlichungen [389], [390], [391] publiziert.

Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung einer digitalen Lösung zur Unterstützung des Arbeitspersonals im Sichtprüfungsprozess. Es handelt sich um eine Informationseingabekomponente nach dem HAAT-Modell (Abschnitt 2.2.2) und repräsentiert die in Abbildung 2.7 gezeigte sensorische Assistenzfunktion des „Dokumentieren“. Der Aufbau dieses Kapitels orientiert sich am zuvor definierten, menschenzentrierten Entwicklungsprozess (Abschnitt 2.2.4.3) und gliedert sich wie folgt:

- Im Abschnitt 4.1 wird ein Prozessablauf für die assistierte Sichtprüfung konzipiert, der als Grundlage für die weiteren Abschnitte und für die Ableitung von funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen sowie geeigneten Evaluierungsmethoden dient.
- Im Abschnitt 4.2 wird eine begründete Technologieauswahl getroffen. Aufgrund des Mangels an menschenzentrierten Systembetrachtungen bezüglich assistierter Lösungen für die Sichtprüfung wird diese mithilfe einer komparativen Gebrauchstauglichkeitsbewertung durchgeführt. Dazu werden die Kernanforderungen sowohl für die Entwicklung einer Applikation auf Basis eines handgeführten Tablets als auch auf Basis einer AR-Brille verwendet. Diese Applikationen stellen jeweils eine 1. Systemiteration der Lösung dar.
- Im Abschnitt 4.3 wird die Gebrauchstauglichkeit in zwei identischen Studien mit unabhängigen Versuchsgruppen unter Verwendung des SUS-Fragebogens evaluiert. Die Technologie mit dem höheren Gebrauchstauglichkeitswert wird als bevorzugte Lösungsalternative eingestuft.

- Abschnitt 4.4 befasst sich mit der Weiterentwicklung der 1. Systemiteration der bevorzugten Technologie. Dazu werden die Ergebnisse und das Feedback der Versuchsgruppe aus der vorangegangenen Studie genutzt. Dadurch hat diese Studie neben ihrem komparativen auch einen formativen Charakter.
- Im Abschnitt 4.5 wird die resultierende 2. Systemiteration wiederum unter gleichen Versuchsbedingungen untersucht, um mögliche Auswirkungen der Anpassungen auf die Gebrauchstauglichkeit zu erfassen. Zusätzlich wird die Arbeitsbelastung während der Benutzung der Applikation mittels des NASA-TLX-Fragebogens ermittelt. Zur Bewertung der entwickelten Funktionskomponenten werden darüber hinaus quantitative Untersuchungen zu Genauigkeiten der in der 2. Systemiteration eingeführten Defektlokalisierung durchgeführt. Weitere nicht quantifizierbare Merkmale, wie z. B. Segmentierungsqualität und Reproduzierbarkeit, werden qualitativ bewertet.
- Abschließend werden im Abschnitt 4.6 die Ergebnisse und Erkenntnisse des Entwicklungszyklus zusammengefasst, diskutiert und in den Gesamtkontext dieser Arbeit eingeordnet.

4.1 Festlegen der Nutzungsanforderungen

Dieser Abschnitt stützt sich auf verschiedene definitorische Grundlagen. Zunächst werden sowohl der Inhalt als auch der Ablauf der Sichtprüfung näher spezifiziert. Ziel ist es, sowohl die grundlegenden Tätigkeiten als auch die Defektklassen, die während dieser Tätigkeiten auftreten können, zu definieren. Übergreifend wird ein Ablauf beschrieben, der die Vorgehensweise eines Prüfers bei der Durchführung einer Sichtprüfung festlegt. Ausgehend von den Teilschritten dieses Ablaufs, der als Referenzprozess dient, werden Funktionskomponenten, Anforderungen an diese und Evaluierungsmethoden abgeleitet.

4.1.1 Definition eines Referenzprozesses

Für Sichtprüfungen werden im Folgenden in Anlehnung an [132] vier grundsätzliche **Tätigkeiten** festgelegt (Abbildung 4.1). Diese lassen sich wie folgt beschreiben:

- **Objekt- und Lageerkennung:** Das Erkennen von Objekten und die Zuordnung zu einer Kategorie aufgrund spezifischer Eigenschaften oder ihrer Lage ist als unterstützendes Element innerhalb der Produktionsprozesskette von Bedeutung. Die Erkennung eines Objektes erfolgt beispielsweise an der Teilenummer

und kann im Rahmen eines Sortiervorgangs ausgeführt werden. Bei der Objekt- und Lageerkennung können auch einfache Funktionsprüfungen von Bauteilen durchgeführt werden, wie z. B. das Betätigen eines Schließhebels.

- **Form- und Abmessungsprüfung:** Auf der Grundlage der Informationen über ein Bauteil trifft die prüfende Person eine Beurteilung, ob die geforderten Qualitätsstandards eingehalten wurden. Da dieser Vorgang in der Regel ohne technische Hilfsmittel abläuft, können nur Abweichungen erfasst werden, die deutlich mit dem menschlichen Auge erkennbar sind.
- **Vollständigkeits- und Korrektheitsprüfung:** Hierzu zählen alle Aktivitäten, die zum Ziel haben, die Vollständigkeit von Bauteilen und Fertigungsmerkmalen sowie deren korrekte Montage zu kontrollieren. Auch hier können Untersuchungen zur Funktionalität einzelner Komponenten erforderlich sein. Beispielsweise kann ein Prüfling auf die Anwesenheit und Ausprägung von geplanten Bohrungen untersucht werden.
- **Oberflächenprüfung:** Diese Art der Sichtprüfung konzentriert sich auf die Konformität der Oberflächen eines Prüflings. Aufgrund der Vielfalt der in der Industrie verwendeten Werkstoffe gibt es eine Vielzahl von Farben, Mustern, Texturen und Oberflächenbeschaffenheiten, die bei diesem Arbeitsschritt eine Rolle spielen.

Im Gegensatz zu den Tätigkeiten lassen sich die **Defektklassen** nicht im Vorhinein definieren, da sie stark von unternehmens- und produktspezifischen Faktoren abhängen. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Kategorisierung der Defektklassen in dieser Arbeit unter Berücksichtigung der vorhandenen Literatur, die sich der visuellen Inspektion von Flugzeugkomponenten widmet. Die Auswertung verschiedener Publikationen [260], [392], [393], [394], [395], [396] erlaubt die Identifikation von vier spezifischen Defektklassen. Die Defektklassen sind in Abbildung 4.1 dunkelblau visualisiert und mit verschiedenen Beispielen illustriert, die in der Fachliteratur mehrfach angeführt werden. Die Durchführung dieser Tätigkeiten zur Ermittlung der Defektklassen erfolgt während der Untersuchung des Prüflings. Für diesen Prozess wird im Folgenden ein Referenzprozess definiert.

Der **Ablauf einer Sichtprüfung** ist grundsätzlich unabhängig von den zuvor definierten Tätigkeitsklassen. Dies ist damit zu begründen, dass die tatsächlich am Bauteil auftretenden Defekte im Vorfeld der Prüfung nicht bekannt sind. In der

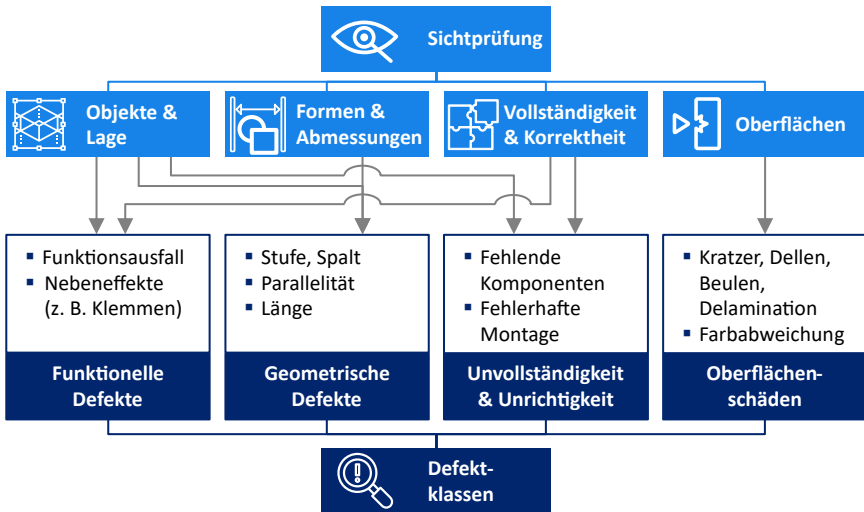


Abbildung 4.1: Tätigkeiten der Sichtprüfung (hellblau) und zugehörige Defektklassen (dunkelblau).

Regel sind zwar für einen bestimmten Bauteiltyp die Eintrittswahrscheinlichkeiten für einzelne Defekte bekannt, wodurch entsprechende Tätigkeiten für diesen Typ an Bedeutung gewinnen. Dies schließt jedoch das Auftreten anderer Defekte nicht vollständig aus. Die Sichtprüfung wird daher in dieser Arbeit als ein Vorgang innerhalb des Prüfplans verstanden, bei dem der Prüfling grundsätzlich auf das Vorhandensein von Defektklassen untersucht wird.

Aus diesem Grund wird die Sichtprüfung hier als ein Vorgang innerhalb eines Prüfplans verstanden, bei dem der Prüfende den Prüfling grundsätzlich auf das Vorhandensein aller Defektklassen untersucht. Ausnahmen bilden hier Prüflinge ohne Funktionsmerkmale, bei denen die entsprechende Defektklasse entfällt.

Wird ein Defekt festgestellt, muss dieser dokumentiert werden. Die notwendigen Annotationen unterteilen sich in textuelle und bildliche Annotationen sowie die Markierung eines Defektbereichs. Zu den textuellen Annotationen gehören die Einordnung des Defekts in eine der definierten Defektklassen sowie die nähere Beschreibung des einzelnen Fehlers (siehe Beispiele in Abbildung 4.1) und die Bewertung der Schwere des Defekts (z. B. kosmetischer Defekt oder sicherheitskritischer Defekt). Bildliche Annotationen umfassen das Fotografieren des Mangels in einem oder mehreren Bildern. Eine weitere Annotationsmöglichkeit besteht darin, das Bauteil, an dem der Defekt aufgetreten ist, oder den Defektumriss selbst zu mar-

kieren. Da in der industriellen Praxis die Ergebnisse eines Sichtprüfungsprozesses zumeist handschriftlich festgehalten werden (Abschnitt 3.1), folgt dieser Teil bisher keiner standardisierten Form. Beispielsweise kann der Defektbereich auf einer technischen Zeichnung markiert oder auf Basis des Fotomaterials mit einer Bildbearbeitungssoftware eingefügt werden. Da die hier vorgestellte Lösungskomponente auf einem durchgängig digitalen Ansatz beruht, wird in den folgenden Abschnitten davon ausgegangen, dass die Defektmarkierung durch geometrische Formen auf einer Bilddatei beschreibbar ist. Nachdem alle Defekte beschrieben sind, wird im letzten Schritt aus den gesammelten Informationen ein Prüfergebnis für die Sichtprüfung abgeleitet und dokumentiert. Der zuvor vorgestellte Referenzprozess ist in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt und bezieht sich auf den Unterprozess „visuelle Prüfung“ in Abbildung 3.4.

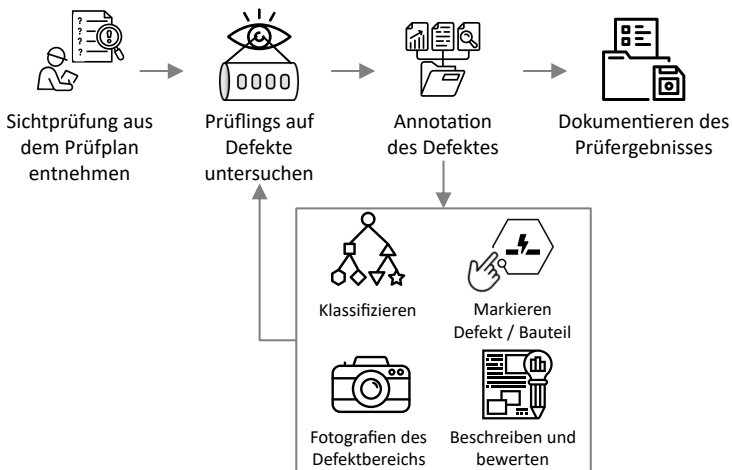


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Referenzprozesses zur Durchführung einer Sichtprüfung.

4.1.2 Ableitung von Anforderungen und Festlegung von Evaluierungsmethoden

Aus diesem Referenzprozess lassen sich Anforderungen an eine Anwendung ableiten, die die Prüfenden im Sichtprüfungsprozess unterstützen (Tabelle 4.1). Funktionale Hauptanforderungen führen direkt zu Softwaremodulen mit entsprechenden

Untermodulen. Übergreifende (nicht-funktionale) Anforderungen, die an die Gesamtanwendung gestellt werden, sind im unteren Teil der Tabelle 4.1 unter der doppelten Trennlinie aufgeführt. Um die Zuordnung der Inhalte zu den Anforderungen zu erleichtern, werden diese im Folgenden mit der Abkürzung *AF* in Verbindung mit der laufenden Nummer referenziert.

Die Funktion zur **Markierung von Defektbereichen** (AF 3) wird besonders hervorgehoben, da sie gezielt die in der Defizitanalyse (Abschnitt 2.2.3.2) identifizierte Forschungslücke in der Oberflächenprüfung adressiert. Darüber hinaus greifen sie das im Abschnitt 3.3.1 skizzierte Praxisdefizit der analogen und unstrukturierten Dokumentation auf. Die übrigen funktionalen Anforderungen sind für die vollständige Abbildung eines Sichtprüfprozesses unerlässlich, werden aber aufgrund ihrer geringeren wissenschaftlichen Relevanz untergeordnet behandelt. Ihre Bedeutung für die Behebung der aufgezeigten Prozessschwachstellen (Abschnitt 3.3.1) wird aber im Laufe der Diskussion herausgestellt.

Für die zentrale Funktion der Defektmarkierung werden nicht-funktionale Anforderungen definiert, die spezifizieren, wie die Funktion ausgeführt wird. Dabei soll die Defektsegmentierung sowohl effizient als auch qualitativ hochwertig sein. Beide Kriterien stehen zwangsläufig in Wechselwirkung zueinander. So beschreibt die **Effizienz** (AF 3.2) in diesem Zusammenhang das Verhältnis zwischen der erreichten Qualität der Maskierung unter Berücksichtigung der dafür erforderlichen Interaktionen durch die Benutzenden. Zur Unterscheidung der beiden Anforderungen bezieht sich die Effizienz hier primär auf die notwendigen Eingaben durch den Prüfenden, was gleichzeitig auch die Evaluierungsgrundlage darstellt.

Zur quantitativen Bewertung der **Segmentierungsqualität** (AF 3.3) wird in der maschinellen Bildverarbeitung im Rahmen von Objekterkennungsaufgaben häufig die Intersection over Union (IoU) verwendet [397]. Da die für eine direkte Anwendung der IoU erforderlichen Datensätze nicht zur Verfügung stehen, werden die resultierenden Segmentierungsmasken qualitativ bewertet. Dazu werden einzelne Segmentierungsmasken oder Paare aus verschiedenen Systemiterationen analysiert und diskutiert. Dieses Vorgehen lässt sich damit begründen, dass die eigentlichen Defektmasken (Ground Truth-Masken) häufig durch manuelle Auswahl von Pixelbereichen durch einen Menschen erzeugt werden, der damit letztlich die „bestmögliche“ Maske definiert.

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Typ
1	Textuelle Defektdokumentation		
1.1	Interaktives Formular	Die Applikation ermöglicht die Eingabe von Textannotationen zur Beschreibung von Defekten.	Funktional
1.2	Defekt-klassifizierung	Die Applikation bietet Auswahlfelder mit vordefinierten Defektklassen an.	Funktional
2	Bildbasierte Defekt-dokumentation	Die Applikation ermöglicht die Aufnahme von Fotos.	Funktional
3	Markierung von Defektbereichen mittels geometrischen Segmentierungsmasken		
3.1	Segmentierungswerkzeuge	Die Applikation bietet Werkzeuge zur Erzeugung geometrischer Formen (z. B. Kreise, Rechtecke) zur Maskierung von Defektbereichen.	Funktional
3.2	Effizienz	Die Applikation ermöglicht das Anlegen einer hinreichend genauen Defektmaskierung bei möglichst geringem Eingabeaufwand.	Nicht funktional
3.3	Segmentierungsqualität	Die Applikation ermöglicht eine hinreichend genaue Segmentierung von Objekten, die einen Defektbereich definieren.	Nicht funktional
3.4	Reproduzierbarkeit	Die Applikation ermöglicht eine vom Benutzenden weitestgehend unabhängige Segmentierung für einen Defektbereich.	Nicht funktional
4	Nutzungserfahrung		
4.1	Gebrauchstauglichkeit (Usability)	Die Applikation führt dazu, dass Benutzende aus subjektiver Sicht ihre Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend erreichen.	Nicht funktional
4.2	Arbeitsbelastung (Workload)	Die Applikation führt bei Nutzung zu einer vertretbaren kognitiven und physischen Belastung.	Nicht funktional

Tabelle 4.1: Übersicht der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an die Applikation zur Informationseingabe in Sichtprüfungen.

Daneben ist die **Reproduzierbarkeit** (AF 3.4) der Segmentierungsmaske als nicht-funktionale Anforderung von Bedeutung. Dies ist insbesondere dadurch motiviert, dass bei den untersuchten Prüfprozessen eine hohe Unabhängigkeit vom Prüfenden erwünscht ist (Abschnitt 3.3.1). Die in der Messtechnik genutzte Vergleichspräzision zur Bewertung der Reproduzierbarkeit basiert auf der Ermittlung der Streuung von Messergebnissen über eine Gruppe an Prüfenden für eine spezifische Messaufgabe. Damit diese für die vorliegende Prüfaufgabe genutzt werden kann, muss die Streuung in den Segmentierungsmasken berechnet werden. Allerdings setzt das eine statische Kameraperspektive voraus, wenn die Streuung untereinander und nicht zum Ground Truth bestimmt werden soll. Dadurch verbleibt für die Bewertung der Reproduzierbarkeit ebenfalls nur ein subjektiver Vergleich der Segmentierungsmasken.

Die Anforderungen an Effizienz, Segmentierungsqualität und Reproduzierbarkeit stehen in direktem Zusammenhang mit der Reife der entwickelten Funktionen. Sie werden demzufolge erst im Rahmen der Evaluierung der 2. Systemiteration erfolgen, da diese den finalen Prototypen mit vollem Funktionsumfang repräsentiert.

Neben den aufgeführten nicht-funktionalen Anforderungen an die Komponente zur Markierung von Defektbereichen sind die Gebrauchstauglichkeit sowie die Anpassbarkeit und Skalierbarkeit weitere übergreifende nicht-funktionale Anforderungen an die Gesamtanwendung. Aufgrund der starken Interaktion zwischen dem Nutzenden und der Anwendung spielt die **Nutzungserfahrung** AF 4 eine zentrale Rolle. Sie entscheidet darüber, ob die Technologie erfolgreich eingesetzt und nachhaltig in der Produktionsumgebung etabliert werden kann. Dies gilt insbesondere in Bereichen wie der Qualitätssicherung, in denen Fachkräfte unterstützt werden sollen [398]. Die Nutzungserfahrung wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, u. a. von der generellen Einstellung gegenüber neuartigen Technologien, der Übereinstimmung der Technologie mit den Bedürfnissen der Nutzenden oder der Gebrauchstauglichkeit (Usability). Dabei kann die Gebrauchstauglichkeit nach [399] als ein zentraler Faktor angesehen werden, der durch Befragungen erfasst und optimiert werden kann. Darauf aufbauend wird **Gebrauchstauglichkeit** (AF 4.1) als eine zentrale nicht-funktionale Anforderung definiert .

Zur quantitativen Bewertung von nutzungszentrierten Evaluationsgegenständen wurden im Abschnitt 2.1.2.3 verschiedene Methoden vorgestellt. Dabei stellt insbesondere die SUS eine etablierte Methode zur quantifizierbaren Erhebung von Kennzahlen zur Gebrauchstauglichkeit dar. Daher wird er in dieser Arbeit sowohl zur Technologieauswahl verwendet als auch um die 1. und 2. Systemiteration mit-

einander zu vergleichen. Ergänzt wird dieser Fragebogen durch weitere Zusatzfragen und Freitextfelder, um ein tiefergehendes Feedback der Versuchsgruppen zu erhalten.

Neben der Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit wird häufig die **Arbeitsbelastung** (Workload) (AF 4.2) zur Bewertung von Assistenzlösungen herangezogen. Die Erfassung der Arbeitsbelastung kann Hinweise darauf geben, ob die Nutzung des Assistenzsystems zu Stress, Überforderung oder Ermüdung führt. Dies kann mithilfe des NASA-TLX-Fragebogens bewertet werden (Abschnitt 2.1.2.3). Der Einsatz des NASA-TLX-Fragebogens ist jedoch erst für die 2. Systemiteration vorgesehen, da die 1. Systemiteration ein Minimum Viable Product (MVP) darstellt, um eine grundlegende Nutzbarkeit der Funktionsprinzipien der Anwendung sicherzustellen. Eine Bewertung der Arbeitsbelastung ist demnach mit dem Endprodukt (2. Systemiteration) sinnvoll.

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Auswahl zweier Basistechnologien und der darauf aufbauenden Umsetzung der zuvor beschriebenen funktionalen Anforderungen.

4.2 Entwicklung der ersten Systemiterationen

Um die zuvor beschriebenen Anforderungen in funktionsfähige Anwendungen zu überführen, müssen zunächst **geeignete Technologien** identifiziert werden. Mit Blick auf die Literatur im Bereich der Prüfung und Inspektion (MRO) von Produkten lassen sich diese im Wesentlichen auf Tablets [259], [261], [262] und AR-Brillen [400], [401], [402] eingrenzen. Beide Technologien ermöglichen die Interaktion mit den Nutzenden und die Entwicklung problemadäquater Anwendungen über verschiedene Frameworks. Darüber hinaus können beide vom Menschen im Raum bewegt werden, was die notwendige Mobilität für die Prüfung großer Bauteile bietet.

Bisherige Studien zeigen eine Bevorzugung des Tablets gegenüber der AR-Brille, jedoch überwiegend für deren Nutzung innerhalb der Informationsausgabekomponente (Abschnitt 2.2.3.5). Als Beispiel kann eine aktuelle Studie von [403] herangezogen werden. Diese untersucht die grundsätzliche Eignung verschiedener Technologien für Assistenzsysteme im Kontext der Luftfahrtindustrie. Dazu wurde eine Befragung von Montagepersonal aus dem Flugzeugbau durchgeführt und eine Auswertung auf Basis des TAM (Abschnitt 2.1.2.3) vorgenommen. Die Ergebnisse

der Studie deuten darauf hin, dass beim Einsatz von Tablets in Assistenzsystemen mit einer hohen Nutzungsakzeptanz zu rechnen ist, bei gleichzeitig zu erwartenden positiven Effekten („Technology Impact“) auf das Prozessergebnis. Da aber auch der Technology Impact bei AR-Brillen hoch sein kann, legen die Studienergebnisse nahe, anwendungsfallspezifische Untersuchungen zur Bewertung der Technologie vorzunehmen. Diese Handlungsempfehlung deckt sich mit dem allgemeinen Vorgehen dieses Kapitels und es werden daher **Tablets und AR-Brillen als Basistechnologien** ausgewählt. Nachfolgend werden (Software-)Prototypen entwickelt, die im Sinne eines MVP die zentralen Funktionen zur textuellen und bildbasierten Dokumentation sowie zur Defektsegmentierung enthalten. Da sich dieses Kapitel auf die Defektsegmentierung konzentriert, werden die übrigen Funktionen nur verkürzt dargestellt.

4.2.1 Entwicklung der Tabletapplikation

Für die Entwicklung der Segmentierungswerkzeuge in einer Tablet-Applikation werden drei geometrische Formen für die Defektsegmentierung verwendet: Rechtecke, Kreise und Polygonzüge (Abbildung 4.3). Diese werden über Toucheingaben wie folgt erzeugt:

- **Rechtecke:** Ein Fingerdruck definiert den Startpunkt auf dem Bildschirm. Durch Bewegungen des Fingers diagonal wird die gegenüberliegende Ecke des Rechtecks festgelegt. Das Abheben des Fingers vervollständigt das Rechteck auf der Zeichenfläche.
- **Kreise:** Der durch die erste Berührung gesetzte Punkt wird zum Mittelpunkt des Kreises. Die Bewegung des Fingers bestimmt den Radius. Der Kreis wird durch das Anheben des Fingers auf der Zeichenfläche dargestellt.
- **Polygonzüge:** Der Startpunkt wird durch Berühren gesetzt. Durch erneutes Berühren werden zusätzliche Zwischenpunkte hinzugefügt. Der Polygonzug wird geschlossen, indem der Startpunkt ein weiteres Mal berührt wird.

Die Implementierung der Tabletsegmentierung erfolgt mit Webtechnologien, um hardwareunabhängig zu sein. Als Framework wird React [404] verwendet, das eine plattformübergreifende Bedienoberfläche ermöglicht. Als Hardware wird ein *Apple iPad Pro* genutzt, auf dem zunächst die native Kamerafunktion über die Browser-API aufgerufen wird, um ein Foto aufzunehmen. Dieses Foto dient als Grundlage

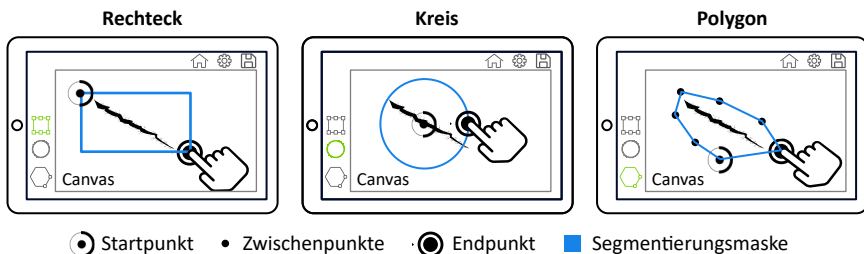


Abbildung 4.3: Konzeptionelle Darstellung zur Segmentierung eines Defektbereichs auf der Bedienoberfläche über Toucheingaben des Benutzenden.

für die Zeichenfläche, auf der geometrische Formen wie Rechtecke, Kreise und Polygone zur Markierung von Defekten erstellt werden. Jede geometrische Form wird dabei in Bezug auf das Bildkoordinatensystem beschrieben.

Nach der erfolgreichen Erzeugung einer Form werden zusätzliche Informationen zur Beschreibung und Klassifizierung der Defekte hinzugefügt. Dies wird durch interaktive Bedienelemente in React umgesetzt, die verschiedene Eingabemöglichkeiten bieten: Defektklassen werden über Dropdown-Menüs ausgewählt, auftretende Defekte durch Tags definiert, die Schwere des Defekts auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet und weitere Details über Freitext-Eingabefelder ergänzt. So entsteht für jede geometrische Form eine Annotationsdatei, die den Defekt vollständig beschreibt, indem sie die geometrischen Informationen, die ausgewählte Defektklasse, den Schweregrad und weitere Details enthält.

Zusätzlich zu den Kernfunktionen wird eine Übersicht bisher getätigter Defekte sowie eine farbliche Unterscheidung zwischen den definierten Defektklassen eingeführt. Eine exemplarische Darstellung der Bedienoberfläche nach erfolgreicher Markierung und Annotation verschiedener Defekte zeigt Abbildung 4.4.

4.2.2 Entwicklung der AR-Applikation

Die Erstellung von Rechtecken und Kreisen im dreidimensionalen Raum mit einer AR-Brille ist nicht intuitiv, da diese Formen eine flache und statische Zeichenfläche voraussetzen. Die Vektorzug-Methode ist hingegen besser geeignet, da sie eine flexible Platzierung von Punkten im Raum erlaubt.

Der Vektorzug wird durch Raycasting und Pinch-Gesten erstellt (Abbildung A.1). Die Nutzenden setzen einen Startpunkt auf der Oberfläche des Bauteils mittels einer kurzen Pinch-Geste. Die Oberfläche des Bauteils sowie der restlichen Umge-

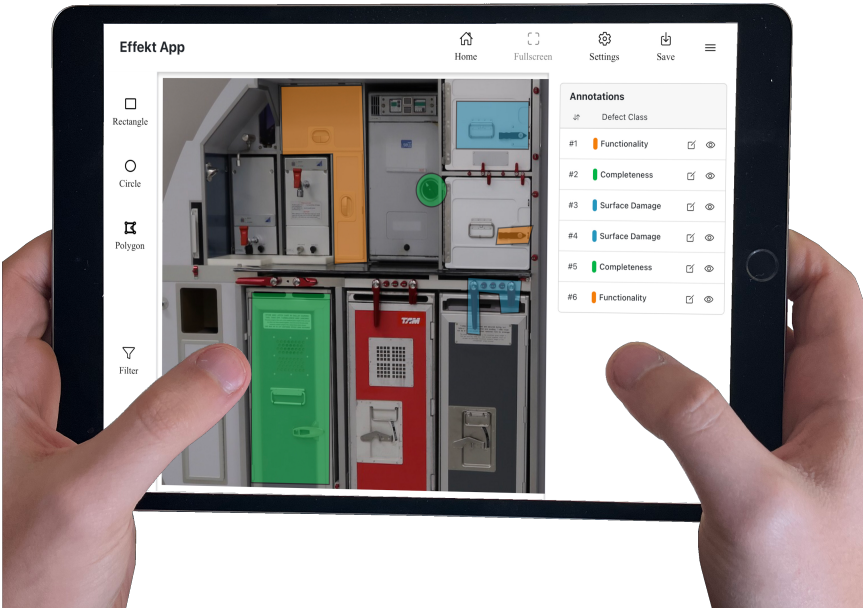


Abbildung 4.4: Bedienoberfläche der Tablet-Applikation nach Markierung verschiedener Defekte am Beispiel eines Kabinenmonuments. Defektklassen unterscheiden sich dabei farblich.

bung wird dadurch mithilfe der Tiefensensorik der AR-Brille als dreidimensionales Netzmodell („Spatial-Mesh“) erzeugt. Weitere Zwischenpunkte werden ebenfalls durch kurze Pinch-Gesten hinzugefügt. Alle Punkte bleiben statisch im Raum positioniert, da ihre Lage durch das interne Positions- und Bewegungstracking der AR-Brille relativ zur Umgebung fortlaufend aktualisiert wird. Der Vektorzug wird durch eine lange Pinch-Geste geschlossen, die den Endpunkt definiert.

Die Implementierung der AR-Segmentierung basiert auf der HoloLens 2 [332] und erfolgt unter Verwendung des Mixed Reality Toolkit (MRTK) [405] und Unity [406]. Im AR-Bereich gibt es derzeit keine plattformunabhängigen Entwicklungswerkzeuge mit einem breiten Funktionsumfang. Aufgrund dieser Einschränkungen fiel die Entscheidung auf die HoloLens 2, die am weitesten verbreitete Hardware im AR-Bereich. Zu Beginn wird die Applikation initialisiert, wodurch das Spatial-Mesh sowie eine Karte der Umgebung über native Funktionen der HoloLens 2 erzeugt werden. Nach der Platzierung der Punkte und dem Schließen des Polygonzugs (Abbildung 4.5a) ermöglicht das MRTK die Weiterverarbeitung.



(a) Bedienoberfläche der AR-Applikation nach Markierung eines Defekts an einem Kabinenteil. (b) Bedienoberfläche der AR-Applikation zur Annotation eines Defekts an einem Kabinenteil.

Abbildung 4.5: Beispielhafte Bedienoberflächen der AR-Applikation.

Anstelle von Dropdown-Menüs werden Defektklassen über visuelle Icons ausgewählt, um die Interaktion in der AR-Umgebung schlanker zu gestalten. Die Schwere eines Defekts wird über einen interaktiven Slider festgelegt. Für die Dokumentation können abschließend durch einen virtuellen Button Fotos erstellt werden, die die im Raum platzierten Punkte auf eine zweidimensionale Bildebene projizieren. Die Bedienoberfläche für die Annotation des Defekts wird in Abbildung 4.5b gezeigt. Durch diese Projektion werden die 3D-Punkte auf die Bildebene übertragen, was eine konsistente Dokumentation ermöglicht. Am Ende wird eine strukturierte Datei mit definierten Key-Value-Werten erzeugt, die alle relevanten Informationen wie die Defektklasse, die Schwere und die projizierten Punktkoordinaten enthält. Die entstehende Dokumentation ist daher strukturell identisch mit der Datei, die unter Verwendung des Tablets generiert wird.

4.3 Komparative und formative Evaluation von AR-Brille und Tablet

Die zuvor entwickelten Applikationen erfüllen beide die technischen Voraussetzungen den Prüfenden bei der Prozessdurchführung zu assistieren. Nachfolgend werden die beiden Technologien in einer komparativen Evaluation in Bezug auf

ihre Gebrauchstauglichkeit näher untersucht. Dabei wird der Fragebogen nach SUS als Werkzeug genutzt, um die geeignetere Technologie zu identifizieren.

4.3.1 Versuchsaufbau

Ziel des Versuchs ist es, die Gebrauchstauglichkeit von AR-Brillen im Vergleich zu Tablets für den Anwendungsfall der Sichtprüfung zu bewerten. Dafür werden 20 Versuchspersonen, die ähnliche Erfahrungslevel mit der jeweiligen Technologie und einen ingenieurwissenschaftlichen Hintergrund aufweisen, in zwei gleich große, unabhängige Gruppen aufgeteilt. Die eine Gruppe erhält das Tablet („T-Gruppe“), die andere die AR-Brille („AR-Gruppe“). Beide Gruppen führen eine identische Sichtprüfung an einem Flugzeugkabinenmonument (Abbildung A.2) in einer Laborumgebung durch. Das Ziel besteht darin, mehrere vordefinierte Defekte (Tabelle 4.2) zu erfassen.

Nr.	Betroffenes Bauteil	Defektklasse	Auftretender Fehler
1	Wandschiene	Unrichtigkeit	Falsche Anbringung
2	Ablage oben	Geometrischer Defekt	Falsche Bohrungsmaße
3	Hebel	Funktionalität	Quietschen
4	Textilbezug Seitenwand	Unrichtigkeit	4x Falsche Anbringung
5	Textilbezug Seitenwand	Oberflächenschaden	2x Materialabtrag

Tabelle 4.2: Auflistung der auftretenden Fehler, deren Defektklassen und den jeweils betroffenen Bauteilen.

4.3.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Die **Versuchsdurchführung** gliedert sich technologieunabhängig in die folgenden vier Phasen:

1. **Einführung:** Die Teilnehmenden erhalten eine kurze Einführung in den Versuchsablauf. Dabei werden sowohl die einzelnen Fehler, deren Klasse und Ort den Teilnehmenden auf einem Foto zur Verfügung gestellt. Dies gewährleistet, dass sich die Studie ausschließlich auf die Erfassung und Dokumentation von

Defekten (Segmentieren, Klassifizieren, Bewerten und Beschreiben) bezieht und nicht auf deren reine Auffindung.

2. **Schulung:** Die Teilnehmenden werden in der Nutzung der jeweiligen Technologie geschult, um sicherzustellen, dass Unterschiede in der Leistung auf die Technologie und nicht auf eine unterschiedliche Vertrautheit mit dem Gerät zurückzuführen sind.
3. **Durchführung der Sichtprüfung:** Jede Person führt die vorgegebenen Aufgaben mit der zugewiesenen Technologie aus. Die Aufgaben sind für beide Technologien identisch, um eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Dabei ist allerdings anzumerken, dass sich die notwendigen Prozessschritte zur Annotation technologiebedingt leicht unterscheiden (Abschnitt 4.2).
4. **Bewertung:** Nach Abschluss der Aufgaben füllen die Teilnehmenden einen Fragebogen aus, der auf der standardisierten SUS basiert, und geben ein qualitatives Feedback zu ihrer Erfahrung anhand von drei Zusatzfragen in Freitextform.

Bei der **Auswertung der beiden Studien** ergeben sich durchschnittliche Gesamtpunktzahlen von 75 für die AR-Gruppe ($\sigma = 16,42$) und 83,25 für die T-Gruppe ($\sigma = 10,28$). Zur besseren Interpretation dieser Werte wird die SUS-Skala von [211] herangezogen, wodurch sich beide Technologien sowohl in einem annehmbaren Bereich als auch in einer Adjektivbewertung zwischen „gut“ und „exzellent“ bewegen. Unterschiedlich sind hier die Notenskalen von C (AR-Gruppe) und B (T-Gruppe). Beide prototypischen Implementierungen weisen eine überdurchschnittliche Gebrauchstauglichkeit auf der SUS-Skala auf, was durch die Überschreitung des in [407] definierten Grenzwertes von 70,14 bestätigt wird.

Neben der reinen Betrachtung von Mittelwerten und Standardabweichungen können aus den Studienergebnissen weitere statistische Kennwerte berechnet werden, um eine Aussage über die Signifikanz der Ergebnisse treffen zu können. Dazu werden zunächst die 95%-Konfidenzintervalle berechnet. Das Konfidenzintervall der AR-Gruppe ist breiter (64,01-87,49) als das der T-Gruppe (75,90-90,60). Dieser breitere Bereich deutet auf eine größere Variabilität der SUS-Werte in der AR-Gruppe oder auf eine geringere Genauigkeit bei der Schätzung des wahren durchschnittlichen SUS-Wertes hin. Dies legt nahe, dass die Antworten zu dieser Technologie stärker streuen. Darüber hinaus ist anzumerken, dass das Fehlen einer Überschneidung zwischen der oberen Grenze des Intervalls der AR-Gruppe und der unteren Grenze des Intervalls der T-Gruppe ebenfalls darauf hindeutet, dass es einen Trend zu einer höheren Nutzbarkeit in der T-Gruppe geben könnte, auch wenn dieser

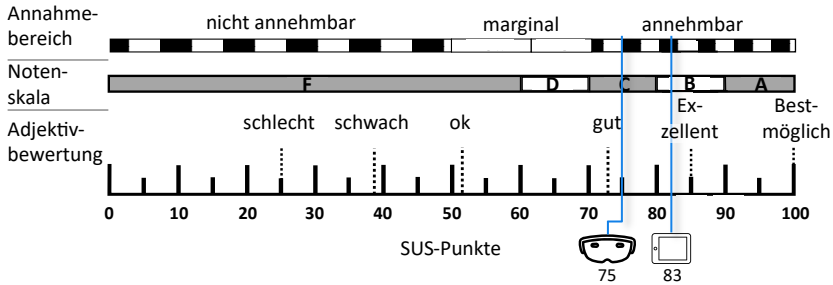


Abbildung 4.6: Einordnung der Studienergebnisse der komparativen Evaluation von AR-Brille und Tablet auf der SUS-Skala nach [211].

nicht eindeutig ist. Die höhere untere Grenze des Intervalls der zweiten Studie (75,90) im Vergleich zur oberen Grenze der ersten Studie (87,49) weist ebenfalls darauf hin, dass die Teilnehmenden das System in der T-Gruppe generell als benutzerfreundlicher einstufen.

Um weitere geeignete statische Metriken zu ermitteln, werden die p-Werte der Studienergebnisse anhand des Shapiro-Wilk-Tests berechnet. Die Ergebnisse des Tests geben Aufschluss über die Verteilungscharakteristika der einzelnen Studien. Mit p-Werten von 0,437 für die AR-Gruppe und 0,423 für die T-Gruppe deutet der Test an, dass die Daten in beiden Fällen annähernd normalverteilt sind. Die zuvor beschriebenen statistischen Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Konfidenzintervall, p-Wert) sind für beide Gruppen in Tabelle 4.3 dargestellt.

Metriken	AR-Gruppe	T-Gruppe
Mittelwert	75,75	83,25
Standardabweichung	16,42	10,28
95% Konfidenzintervall	(64,01; 87,49)	(75,90; 90,60)
Shapiro-Wilk p-Wert	0,437	0,423

Tabelle 4.3: Statistische Werte für die Studienergebnisse der AR- und der T-Gruppe.

Da die Shapiro-Wilk-Tests keine signifikante Abweichung von der Normalverteilung zeigen und die Standardabweichungen stark voneinander abweichen, eignet sich der Welch-Test zur Untersuchung der Unterschiede zwischen den Mittelwerten der beiden Studien. Die Ergebnisse des Welch-Tests ergeben einen p-Wert von 0,239, der deutlich über dem üblichen Schwellenwert von 0,05 liegt. Dadurch lässt sich hier keine statistische Signifikanz feststellen, was bedeutet, dass die Unter-

schiede in den Mittelwerten nicht zwingend durch eine bessere Gebrauchstauglichkeit hervorgerufen werden. Aufgrund der kleinen Teilnehmendenzahl von 10 Personen je Studie wird daher ergänzend die Effektgröße mithilfe von Cohen's d berechnet. Cohen's d gibt die Größe eines Effekts in Bezug auf die Standardabweichung an und ist besonders nützlich, um die Stärke des Unterschieds zwischen zwei Gruppen unabhängig von der Stichprobengröße zu messen. Für Cohen's d ergibt sich ein Wert von 0,548, welcher allgemein hin auf einen mittleren Effekt hinweist. Dadurch kann auf eine praktische Relevanz der Mittelwertunterschiede geschlossen werden, obwohl der p -Wert nicht auf eine statistische Signifikanz deutet. Die vergleichende Analyse ist in Tabelle 4.4 abgebildet.

Vergleichende Metriken	Wert
Differenz der Mittelwerte	7,5
Differenz der Standardabweichungen	-6,14
Welch's t-Test t-Wert	-1,224
Welch's t-Test p -Wert	0,239
Cohen's d	0,548

Tabelle 4.4: Vergleichende statistische Werte für die Studienergebnisse der AR- und T-Gruppe.

Zusammenfassend kann die Defektsegmentierung auf Basis der Tablet-Applikation als favorisiert angesehen werden, da sie im Vergleich zur AR-Brille eine höhere durchschnittliche Gebrauchstauglichkeit aufweist (83,25 zu 75). Zusätzlich weist das engere Konfidenzintervall der Tablet-Gruppe (75,90-90,60) auf eine geringere Variabilität hin, was auf eine konsistentere Benutzungserfahrung schließen lässt. Auch wenn die Unterschiede nicht statistisch signifikant sind (p -Wert 0,239), deutet eine mittlere Effektgröße (Cohen's $d = 0,548$) auf eine praktische Relevanz zugunsten des Tablets hin. Aus diesem Grund wird nachfolgend das Tablet als Basistechnologie für die weitere Entwicklung verwendet.

Damit eine menschenzentrierte Weiterentwicklung der Tablet-Applikation gewährleistet werden kann, wird das **Feedback der Studienteilnehmenden** der Zusatzfragen der T-Gruppe ausgewertet. Diese drei Fragen lauten wie folgt:

1. *Welche Funktionen haben Ihnen besonders gefallen?*
2. *Haben Ihnen Funktionen nicht gefallen bzw. haben Sie Funktionen als nicht notwendig empfunden? Falls ja, warum?*
3. *Fehlen Ihnen Funktionen? Falls ja, welche?*

Die ersten beiden Fragen helfen, die Hauptfaktoren für eine hohe Gebrauchstauglichkeit der Anwendung zu identifizieren und bestehende Defizite einzugrenzen. Die letzte Frage nutzt die Ideen der Teilnehmenden, um neue Funktionalitäten für die 2. Systemiteration zu ermitteln. Sieben von zehn Teilnehmenden loben den intuitiven Aufbau der Applikation, insbesondere die Foto- und Textannotati-on. Sechs kritisieren jedoch die zeitaufwendige Defektmarkierung, was auf einen Entwicklungsbedarf bei den Segmentierungswerkzeugen hinweist. Die 2. Systemiteration muss daher die Segmentierungswerkzeuge weiterentwickeln und die Anforderungen an Effizienz, Segmentierungsqualität, Reproduzierbarkeit und Gebrauchstauglichkeit im direkten Vergleich zur ersten Systemiteration verbessern. Der restliche Aufbau der Applikation sowie die bildliche und textuelle Annotati-on hingegen werden aus Sicht der Nutzenden als zufriedenstellend bewertet und können in dieser Form auch in der 2. Systemiteration genutzt werden.

Darüber hinaus lässt sich aus der dritten Frage weiterer Entwicklungsbedarf in Bezug auf zusätzliche Funktionalitäten entnehmen. Hier geben vier der zehn Versuchspersonen an, dass eine Defektlokalisierung direkt am Prüfling bzw. am 3D-Modell des Prüflings eine sinnvolle Erweiterung der Applikation darstellt. Daraus ergibt sich eine weitere Anforderung ((AF 5), die in Tabelle 4.5 definiert ist. Evaluierungsmethoden für diese Anforderungen werden im entsprechenden Abschnitt 4.5.1 vorgestellt. Damit ist die Evaluierung der ersten Systemiteration abgeschlossen und es folgt die Entwicklung und Evaluierung der 2. Systemiteration auf Basis des Tablets. Der Fokus liegt dabei zum einen auf der neu einzuführenden Defektlokalisierungsfunktion in die Applikation selbst und in den Prüfablauf, zum anderen auf der Verbesserung der Segmentierungswerkzeuge.

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Typ
5	Lokalisierung von Defekten am CAD-Modell des Prüflings		
5.1	Defekt-lokalisierung	Die Applikation bietet Werkzeuge, welche den Ort eines aufgefundenen Defekts im CAD-Modell bestimmt.	Funktional
5.2	Genauigkeit	Die Applikation ermöglicht die Defektlokalisierung verwechslungsfrei, sodass kein Defekt einem falschen Bauteil des Prüflings zugeordnet wird.	Nicht funktional

Tabelle 4.5: Ergänzung der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an die Applikation zur Informationseingabe in Sichtprüfungen durch die Defektlokalisierung.

4.4 Entwicklung der zweiten Systemiteration

Für die Entwicklung der 2. Systemiteration wird der Referenzprozess so angepasst, dass sich die neue Funktionalität der „Defektlokalisierung“ in den Gesamtprozess eingliedert (Abbildung 4.7). Darüber hinaus werden in dieser Systemiteration auch der Import der Prüfpläne ❶ zur Initiierung sowie der Export des Prüfreports ❷ zum Abschluss des Sichtprüfungsprozesses dargestellt. Diese sind allerdings für den Kern der Systemkomponente von zweitrangiger Bedeutung und werden daher nicht näher ausgeführt. Im Folgenden wird der Gesamtprozess kurz erläutert.

Nach der Einleitung der Sichtprüfung beginnt der Prozess mit der Bewertung des Prüflings durch den Prüfenden. Wird ein Defekt gefunden, wird dieser zunächst einem Bauteil auf dem Prüfling zugeordnet. Dies geschieht durch eine Kombination aus markerbasierter Lokalisierung und Schnittpunktberechnung, welche im Abschnitt 4.4.1 detailliert beschrieben wird. Bei erfolgreicher Lokalisierung kann der Prüfende mit der Aufnahme eines Fotos des Defektbereiches fortfahren ❷, das als „Übersichtsbild“ bezeichnet wird. Dieses Bild wird auf der Bedienoberfläche angezeigt und der Prüfende wählt auf diesem mit seinem Finger das betroffene Bauteil aus ❸. Anschließend erfolgt die Erfassung und Annotation der Defekte ❹❺❻. Da auf einem Übersichtsbild mehrere Defekte markiert werden können, wird für jeden gefundenen Defekt nochmals ein Detailbild aufgenommen ❹, welches das jeweilige „Defektbild“ darstellt. Dieses bildet den Input für das neu gestaltete Segmentierungsmodul ❺, welches in Abschnitt 4.4.2 näher beleuchtet wird. Die weitere Annotation des Defekts erfolgt analog zu den Teilprozessen der 1. Systemiteration (Abschnitt 4.2).

Innerhalb dieses Gesamtprozesses sind mehrere hierarchisch geordnete Schleifen, welche sich an der Gliederung der Defektbilder orientieren, zu finden. Dabei wird für jeden Defektbereich in Prozessschritt 2 ein Übersichtsbild erfasst, welche die äußerste Schleife widerspiegelt. In diesem Übersichtsbild können mehrere Defekte mithilfe der in Schritt 3 entwickelten Lokalisierungslösung identifiziert werden. Dies bildet eine weitere Schleife. Des Weiteren werden einzelne Defekte an diesem Bauteil mit Defektbildern in Schritt 4 erfasst und annotiert. Befinden sich mehrere Defekte unterschiedlicher Klassen an einem Bauteilbereich, entsteht hierdurch eine Schleife auf unterster Ebene.

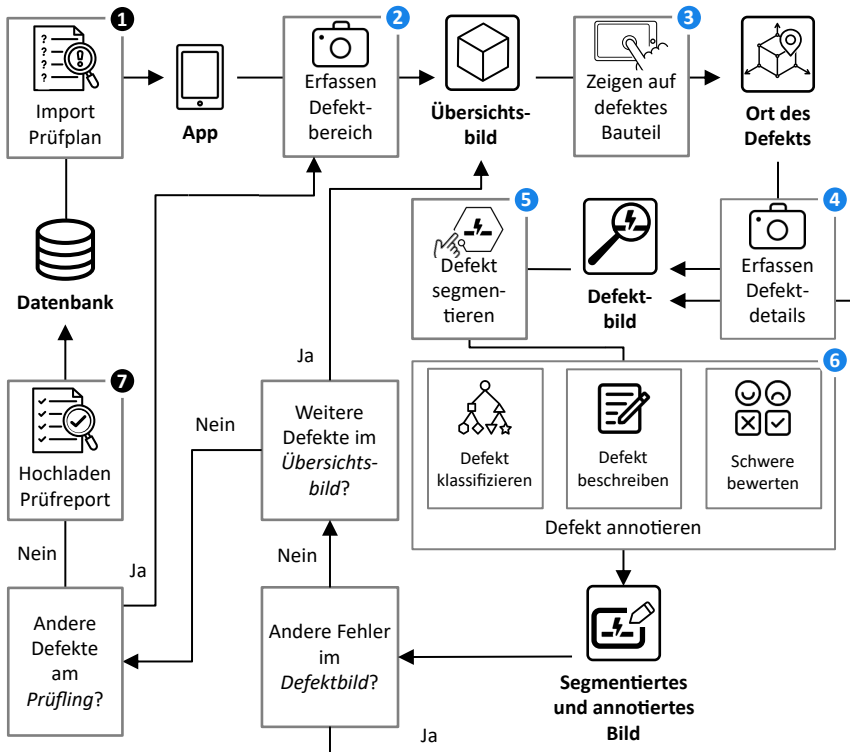


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Prozessablaufs bei Benutzung der Tablet-Applikation zur Unterstützung der Sichtprüfung.

Die Systemarchitektur folgt einem Server-Client-Prinzip, bei dem rechenintensive Aufgaben wie Defektlokalisierung und Segmentierung auf einen leistungsstarken Server ausgelagert werden, während die Bedienoberfläche als webbasierte Anwendung auf einem Tablet ausgeführt wird.

Auf dem Server befinden sich neben den Modulen zur Realisierung der Segmentierung und der Defektlokalisierung auch ein Modul zur Kommunikation zwischen Client und Server sowie ein Modul zur Datenbankanbindung. In den folgenden Abschnitten werden die Funktionsmodule der Defektlokalisierung und Segmentierung zunächst konzeptionell vorgestellt und anschließend deren Implementierung erläutert. In diesem Zusammenhang wird außerdem näher auf die Kommunikation eingegangen.

4.4.1 Markerbasierte 3D-Defektlokalisierung

Prinzipiell stellt die 3D-Defektlokalisierung eine örtliche Zuordnung eines Fehlers zu einem Bauteil dar, woraus auf die betroffene Komponente des Prüflings geschlossen werden kann. Grundvoraussetzung für diese örtliche Zuordnung ist die Kenntnis der Kamerapose relativ zum Prüfling. Hierzu können verschiedene Trackingmethoden eingesetzt werden. Da Tablets häufig nur über eine Kamera als Eingabemedium verfügen, werden im Folgenden kamerabasierte Verfahren betrachtet. Diese teilen sich in markerbasiertes und markerloses Tracking [408].

Markerlose Trackingverfahren verwenden charakteristische Merkmale der Umgebung oder des Bauteils, oft basierend auf CAD-Modellen, um die Pose zwischen Kamera und Objekt zu bestimmen. Methoden wie Template Matching oder vSLAM kommen hierbei zum Einsatz, zeigen allerdings Schwächen in merkmalsarmen Umgebungen, wie sie bei großen Strukturbauteilen oder schwer zugänglichen Bereichen häufig vorkommen. **Markerbasierte Trackingverfahren** hingegen setzen auf künstliche Marker, die eine stabile Referenz bieten, jedoch einen hohen Vorbereitungsaufwand erfordern. Schwächen entstehen, wenn Marker in schwer zugänglichen Bereichen nicht erfasst werden können, was auch hier zu ungenauen Ergebnissen führt.

Werden die Eigenschaften der beiden Verfahren im Hinblick auf den Anwendungsfall zusammenfassend betrachtet, lässt sich hier ein grundsätzliches Problem erkennen. Um einen Oberflächendefekt möglichst detailliert erfassen zu können, muss ein qualitativ hochwertiges Bild des Fehlers aufgenommen werden. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass der Defekt einen hohen Pixelanteil in der Aufnahme hat. Durch die Positionierung der Kamera in der Nähe des Fehlers wird zwar der Bildanteil zur Beschreibung des Fehlers erhöht, jedoch gehen den Trackingverfahren dadurch potenziell Merkmale bzw. Marker zur räumlichen Lokalisierung verloren.

In bisherigen Arbeiten auf diesem Gebiet (Abschnitt 2.2.3.2) beschränkt sich die Anwendung auf die Vollständigkeitsprüfung. Bei dieser Tätigkeit tritt das beschriebene Problem nicht auf, da die Kamera einen größeren Abstand zum Bauteil einnehmen muss, um fehlende Bauteile zu erkennen. Für die in diesem Kapitel fokussierte Prüfung auf Oberflächenschäden ist ein solcher Abstand zu groß.

Daraus folgt, dass die Lokalisierung des Tablets während der Defektaufnahme auf Basis gängiger Technologien nicht ohne erheblichen Mehraufwand, z. B. durch großflächiges Anbringen von Tags am Bauteil, gewährleistet werden kann. Für die Anwendung wird daher die Defektaufnahme von der Defektlokalisierung entkop-

pelt. Diese Entkopplung ist in Abbildung 4.7 bereits durch die Trennung der Prozessschritte ② und ③ von den Prozessschritten ④ bis ⑥ angedeutet. Das Grundkonzept sieht vor, dass der Prüfende zunächst einen gewissen Abstand zum Bauteil einnimmt. Dies ermöglicht den Einsatz verschiedener Trackingverfahren. Aufgrund der Vorteile bei großen Bauteilen mit wenigen Merkmalen wird hier die markerbasierte Lokalisierung gewählt. Aus dieser Entscheidung folgt, dass sich bei der Aufnahme des Übersichtsbildes zur Detektion des Fehlerbereichs immer ein Marker im Sichtbereich der Kamera befinden muss. Die eigentliche Lokalisierung des Defekts erfolgt durch eine Eingabe des Benutzenden auf dem Übersichtsbild. Die technische Ausgestaltung dieses Konzepts wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.4.1.1 Bauteilzuordnung mit ArUco-Markern und Schnittstellenberechnung

Die technische Ausgestaltung des Konzepts gliedert sich im Wesentlichen in die Auswahl eines geeigneten Markertyps zur Lokalisierung des Tablets sowie des Raycastings (der Schnittstellenberechnung) basierend auf der Eingabe des Nutzens.

In wissenschaftlichen Arbeiten haben sich ArUco Marker (AM) [288] als effizient für die Lokalisierung von mobilen Geräten in dynamischen Umgebungen erwiesen [409], [410], [411]. Sie bieten eine gute Balance zwischen Leistungsfähigkeit und Recheneffizienz und sind robust gegenüber Rotationen sowie variierenden Umgebungsbedingungen (z. B. Lichtverhältnisse) [410], [411], was sie für den adressierten Anwendungsfall besonders geeignet macht.

Der Algorithmus zur Bestimmung der Kamerapose, beispielhaft dargestellt in Abbildung 4.8a, benötigt als Eingabe das Kamerabild, die Kamerakalibrierdaten (intrinsische Parameter, Auflösung) und die physikalische Größe des Tags. Um einen AM zu lokalisieren, wird das Kamerabild zunächst verarbeitet, um die Marker zu detektieren und ihre Ecken im Bild zu lokalisieren. Durch eine perspektivische Transformation wird das Bild des Tags normalisiert, um das binäre Muster zu dekodieren und den Tag zu identifizieren. Anschließend wird die Position der Markierung relativ zur Kamera unter Verwendung der Kamerakalibrierungsdaten und der Größe der Markierung nach dem Perspective-n-Point-Problem [412] berechnet.

Zur Ausgestaltung des Raycastings sind weitere Inputinformationen notwendig. Diese sind die Beschreibung der Markerposen im Weltkoordinatensystem über Transformationsmatrizen, der Eingabepunkt als 2D-Pixelkoordinaten, ein Mesh des CAD-Modells sowie die Lage des Bauteils im Weltkoordinatensystem. Es bietet

sich an, das Weltkoordinatensystem im Ursprung des Bauteils zu wählen, wodurch zusätzliche Transformationen vom Welt- zum Bauteilkoordinatensystem entfallen. Eine exemplarische Punkteingabe ist in Abbildung 4.8b in der Bildmitte gezeigt.

Der Ansatz zur Berechnung der Schnittstelle zwischen dem 2D-Eingabepunkt und dem 3D-CAD-Modell basiert auf der Rückprojektion des Lochkameramodells. Dabei wird eine Schnittgerade bestimmt, die von der Kamera in Richtung des anvisierten Bildpunktes verläuft und die potenziellen Punkte im Raum repräsentiert (Abbildung 4.8c). Durch eine Kollisionsabfrage zwischen dieser Geraden und dem Mesh des 3D-Modells werden die Schnittpunkte ermittelt. Der Punkt mit dem geringsten Abstand entspricht der Zielcoordinate des Bauteils, die zur Identifikation des Bauteils in den CAD-Daten verwendet wird. Die konkrete Umsetzung dieser Funktionsmodule sowie die Interaktion des Nutzens durch entsprechende Bedienoberflächen wird im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

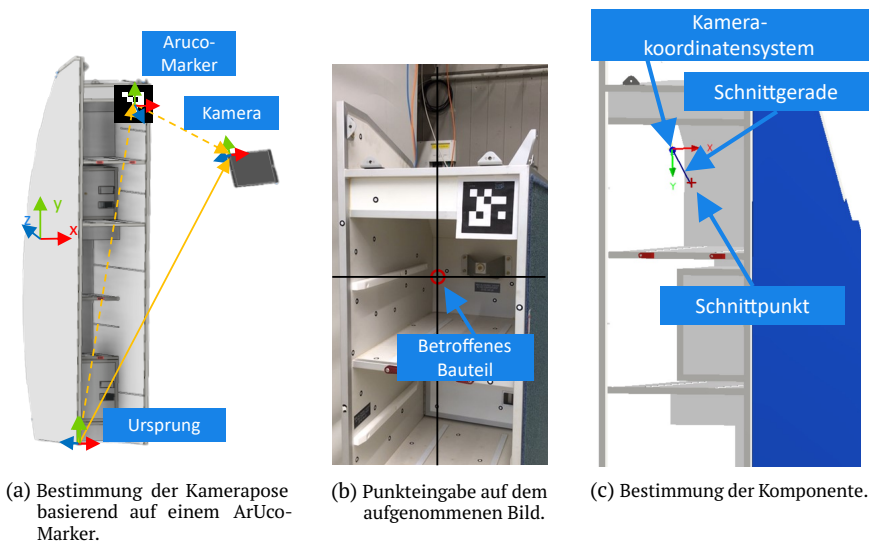
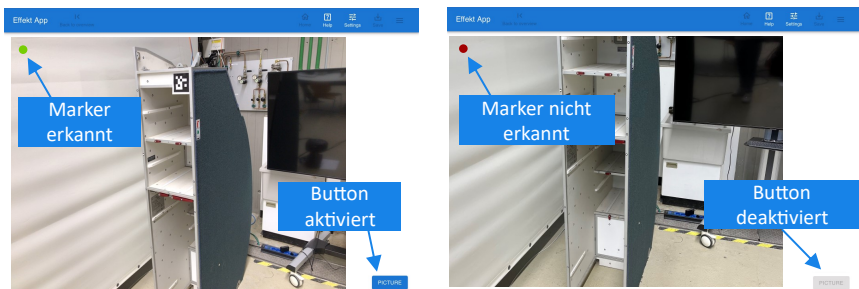


Abbildung 4.8: Illustration der 3D-Defektlokalisierung anhand eines Flugzeugkabinenbauteils.

Bei der Tablet-Lokalisierung werden OpenCV's ArUco-Tag-Erkennungsfunktionen [414] genutzt. Der Videostream liefert Frames, die auf Tags geprüft werden, woraus ein binärer Output resultiert, der entweder „0: keine Marker erkannt“ oder „1: Marker erkannt“ anzeigt. Dieser Output aktiviert eine „Ampelfunktion“ am Tablet, die das Fotografieren nur erlaubt, wenn Marker sichtbar sind (Abbildung 4.10). Fotos ohne Markerlokalisierung werden so verhindert. Für das Übersichtsfoto werden intrinsische Kameraparameter verwendet, die durch eine Schachbrettmusterkalibrierung [415] bestimmt wurden.



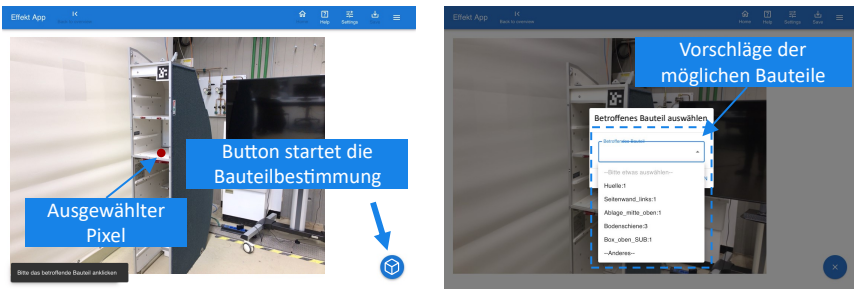
(a) Zustand 1: Marker wurde erkannt und die Fotofunktion ist freigeschaltet.

(b) Zustand 2: Marker wurde nicht erkannt und die Fotofunktion ist gesperrt.

Abbildung 4.10: Ampelsystem zum Sperren und Entsperren der Fotofunktion basierend auf der Markererkennung.

Nach Berechnung der Pose wird diese an den Webservice zur Schnittstellenberechnung übergeben, wodurch dieser nun auf die Eingabe des Benutzenden wartet. Durch eine Infobox auf der Bedienoberfläche, wie in Abbildung 4.11a gezeigt, wird der Benutzende dazu angeleitet. Sobald das Bauteil per Toucheingabe auf dem Tablet ausgewählt und mit einem Button bestätigt wurde, wird die Pixelkoordinate übertragen und die Schnittberechnung durchgeführt. Zunächst wird in diesem Webservice die Schnittgerade auf Basis der gegebenen Informationen aufgestellt. Zur Bestimmung des Schnittpunktes werden die Gerade und das CAD-Modell (bspw. im STEP-Format) in OpenCascade [416] importiert und eine Kollisionsprüfung zwischen beiden durchgeführt. OpenCascade läuft ebenfalls als Modul auf dem Server und kann über eine Application Programming Interface (API) Befehle empfangen. Das Ergebnis der Kollisionsprüfung ist eine Menge von Schnittpunkten, von denen derjenige mit dem kürzesten Abstand zur Tabletkamera ausgewählt wird. Dieser wird jedoch nicht direkt zur Ableitung eines Bauteils verwendet.

Stattdessen wird eine zusätzliche Kontrollfunktion implementiert und zwischen- geschaltet. Der Grund für diese Vorgehensweise ist, dass die zu erwartenden Un- genauigkeiten des Lokalisierungsverfahrens in Kombination mit einer begrenz- ten Genauigkeit der Toucheingabe zu fehlerhaften Ausgaben führen können. Um daraus resultierende Fehlzuordnungen zu vermeiden, wird um den ausgewählten Punkt ein Kugelkörper mit definiertem Radius gelegt. Dieser dient als Input für die Kollisionsabfrage von OpenCascade, die die Bauteile innerhalb des Kugelkörpers identifiziert und deren Schwerpunkte zurückgibt. Die Liste der Bauteile wird nach der Nähe der Schwerpunkte zum Kugelmittelpunkt sortiert und dem Benutzenden zur Auswahl präsentiert (Abbildung 4.11b). Der Kugelradius wird an das Bauteil an- gepasst, um eine effektive Defekterkennung zu gewährleisten. Die korrekte Zu- ordnung ist essenziell für die Ursachenanalyse im Rahmen der Qualitätsverbesserung (Abschnitt 2.1.1.2).



(a) Auswahl des betroffenen Bauteils durch den Benutzenden.

(b) Ausgabe der Ergebnisse der Schnittstellenbe- rechnung.

Abbildung 4.11: Bedienoberflächen für die Zuordnung eines Defekts zu einem Bauteil.

Darüber hinaus sind neben dem oben beschriebenen idealtypischen Ablauf zwei Ausnahmen definiert, die durch individuelle Abfragen und Bedienoberflächen ab- gefangen werden. Die erste Ausnahme ergibt sich daraus, dass in der Praxis sowohl Bill of Materials (BOM) als auch CAD-Modelle nicht immer vollständig gepflegt werden. Insbesondere bei kundenindividuellen Produkten werden aufgrund des hohen Planungsaufwands eher übergeordnete Produktfamilien als jede einzelne Variante aktuell gehalten. Das kann dazu führen, dass die konkreten Positionen von Komponenten an einer Variante abweichen oder dass variantenspezifische Kompo- nenten gar nicht erst vorhanden sind. Zum Umgang mit diesen Fehlern wird dem Benutzenden auf einer Bedienoberfläche ein Dropdown mit allen Unterkomponen- ten, welche in der CAD-Datei hinterlegt sind, sowie ein Freitextfeld zur Angabe

einer Komponente zur Verfügung gestellt (Abbildung A.3a). Die zweite Ausnahme resultiert aus einer fehlgeschlagenen Ausgabe eines Bauteils durch OpenCascade. In erster Linie treten diese durch Punkteingaben in Übergangsbereichen von Bildbereichen von Bauteil zum Hintergrund auf. Bedingt durch die beschriebenen Ungenauigkeiten von Lokalisierung und Eingabe selbst können Geraden entstehen, die das Bauteil verfehlen, wodurch die Ausgabe von Schnittpunkten nicht möglich ist. OpenCascade gibt in diesem Fall einen Fehler aus, welcher dem Frontend übergeben wird und in einer Infobox, wie in Abbildung A.3b gezeigt, visualisiert wird. Der Benutzende kann das betroffene Bauteil selbst bestimmen und mit der Annotation fortfahren.

Der im Rahmen dieses Abschnitts vorgestellten Defektlokalisierung bedarf es neben der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit weiterer Ansätze, um die Anwendbarkeit in der Praxis zu bewerten. Hierzu zählen zum einen die Funktionsprüfung und zum anderen die Evaluation der Genauigkeit der Schnittstellenberechnung. Diese hat einen zentralen Einfluss darauf, ob das System in der Lage ist, aus den Eingaben des Benutzenden sinnvolle Komponentenvorschläge auszugeben. Zu diesem Zweck wird im Abschnitt 4.5.1 eine Genauigkeitsevaluierung im Laborumfeld durchgeführt.

4.4.2 Zero-Shot Segmentierung mit Vision Foundation Modellen

Um die Segmentierung effizienter zu gestalten, lassen sich verschiedene Ansätze identifizieren. Sinnvoll erscheint eine automatische Defektsegmentierung z. B. über DL-Methoden. In planbaren Prüfsituationen zur Lösung aufgabenspezifischer Probleme sind DL-Ansätze in der Lage, den visuellen Prüfprozess von der Erkennung bis zur Annotation (Segmentierung, Klassifikation) vollständig zu übernehmen und damit den Menschen zu ersetzen [417]. Der Aufwand, diese Algorithmen auf einen Anwendungsfall zu trainieren, steigt jedoch mit der Varianz in den Defektbildern. Aufgrund der handgeführten Bewegung der Kamera zu den Defekten ist davon auszugehen, dass diese Bilder in variierenden Kameraperspektiven, Abständen und Beleuchtungssituationen vorliegen. Für eine ausreichende Erkennungsleistung des Algorithmus steigt somit die Anzahl an benötigten Trainingsdaten.

Dies führt zu dem grundsätzlichen Problem der Verfügbarkeit von Trainingsdaten und der Flexibilität klassischer DL-Ansätze insbesondere in domänenspezifischen Anwendungsfällen. Zudem haben klassische DL-Ansätze oft Probleme, auf neue, unbekannte Defekte angewendet zu werden. Im Flugzeugbau sind aufgrund der geringen Produktionsraten kaum Trainingsdaten verfügbar. Darüber hinaus ist es bei

hochvariablen Flugzeugkomponenten, wie z. B. Kabinenbaugruppen, aufgrund der kundenspezifischen Oberflächengestaltung nahezu unmöglich, alle auftretenden Defekte vollständig in einem Datensatz abzubilden.

Die oben genannten Herausforderungen an die Generalisierungsfähigkeit bisheriger DL-Systeme sind ein wesentlicher Grund für die aufkommende Entwicklung und zunehmende Verbreitung von Vision Foundation Models (VFMs). Zu diesem Zweck nutzen die Modelle eine wesentlich umfangreichere und vielfältigere Datenbasis für das Training. VFMs bieten den entscheidenden Vorteil, dass sie entweder ganz ohne spezifische Trainingsdaten auskommen oder nur ein „Fine-Tuning“ mit sehr wenigen Trainingsdaten aus der Zieldomäne erforderlich ist [418]. Diese Fähigkeiten werden als „zero-shot-“ (keine Trainingsdaten) bzw. „few-shot-Learning“ (wenige Trainingsdaten) bezeichnet [419].

Neben dem Bild als Input können gewisse Modelle ebenfalls weitere menschliche Eingaben in Form von sogenannten „Prompts“ entgegennehmen. Diese können beispielsweise textuell oder visuell sein. Die Ausgabe eines VFM hängt stark von der jeweiligen Zielsetzung des Modells ab. Im Kontext der Segmentierung reicht diese von der Ausgabe klassenloser Masken [420] bis hin zu semantischer [421], instanzierter [422] oder panoptischer [423] Segmentierung. Trotz der starken Generalisierungsfähigkeit der VFMs ist es nicht möglich, ohne weitere Trainingsdaten domänenspezifische Defekte, wie Kratzer oder Dellen, an Flugzeugbauteilen einer Klasse zuzuordnen, da diese nicht in der Trainingsdatenbasis enthalten sind. Allerdings sind sie dazu in der Lage, selbstständig relevante Objekte und Strukturen in Bildern zu identifizieren und zu isolieren. Damit können defekt-agnostische Segmentierungsmasken erzeugt werden, welche die prüfende Person nutzen kann, um sie mit ihrem Fachwissen weiter mit Informationen (Defektklasse, Fehlertyp) anzureichern.

Im Folgenden wird daher die Betrachtung auf Modelle eingeschränkt, welche darauf ausgelegt sind, ohne Trainingsdaten eine klassenlose Segmentierung zu generieren. Speziell wird der Fokus auf das Segment Anything Model (SAM) [424] als bekanntesten Vertreter dieser Modelle gelegt [425]. Innerhalb eines Assistenzsystems wurden bislang noch keine VFMs genutzt, daher werden zunächst die funktionelle Eignung des SAM für die Anwendung in der Sichtprüfung erläutert (Abschnitt 4.4.2.1) und geeignete Promptingmethoden identifiziert (Abschnitt 4.4.2.2). Darauf folgt die Integration der Promptingmethoden in die 2. Systemiteration der Applikation (Abschnitt 4.4.2.3). Nicht nur innerhalb von Assistenzsystemen, sondern allgemeinhin gilt die Interaktion von Menschen mit Künstlicher Intelligenz (KI) in bildbasierten Aufgaben als kaum erforscht [426]. Aus diesem Grund kann die

darauf folgende nutzungsorientierte Evaluation im Abschnitt 4.5.2 nicht nur als Vergleich zur 1. Systemiteration, sondern auch für die Einschätzung des Potenzials des SAM als VFM in der Mensch-Maschine Interaktion (MMI) genutzt werden.

4.4.2.1 Das Segment Anything Projekt

Die folgenden Erläuterungen des Segment Anything (SA)-Projekts von Meta AI folgen [424]. Das Projekt setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen. Ein Teil ist die Definition einer „**Aufgabe**“ (**Task**) für die Segmentierung in Form von verschiedenartigen Prompts. Diese Aufgabe kann aus textuellen oder örtlichen bzw. visuellen Prompts bestehen, welche zur Segmentierung eines Objekts innerhalb eines Bildes dienen.

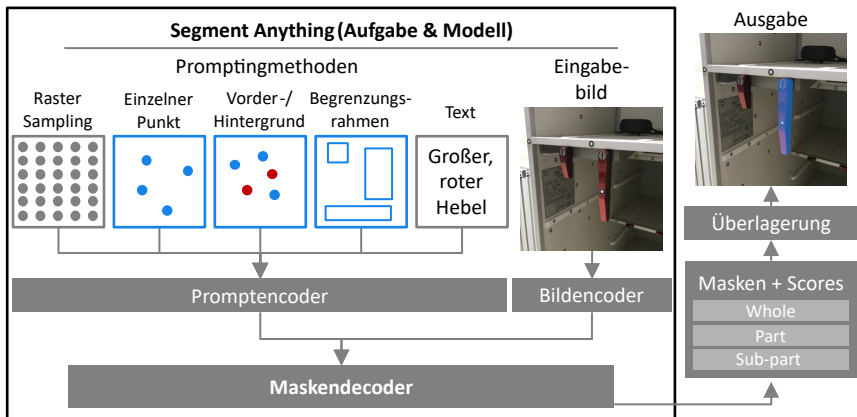


Abbildung 4.12: Aufbau und Promptingmethoden des SAM und Überlagerung einer Maske über ein Beispielbild eines Hebels eines Flugzeugkabinenmonuments.

Daneben ist das **SAM** Bestandteil des Projekts, welches zur Verarbeitung der Prompts in Kombination mit einem Eingabebild eine Ausgabe generiert. Kern des Modells bilden dabei ein Bildencoder, ein Promptencoder und ein Maskendecoder. Der Bildencoder ist für die Umwandlung eines Eingangsbildes in kompakte Darstellung verantwortlich. Im SAM wird ein Vision Transformer (ViT) [427] als Bildencoder verwendet. Dieser Encoder verarbeitet das Bild einmalig und erzeugt eine Bildeinbettung (Image Embedding), die dann für verschiedene Prompts wiederverwendet werden kann. Prompts können z. B. aus Punkten, Begrenzungsrahmen (Bounding Box) oder Freitext bestehen (Abbildung 4.12). Für räumliche Prompts,

wie z. B. Punkteingaben, verwendet das SAM Positionscodierungen in Kombination mit gelernten Einbettungen für jede Promptingmethode. Textbasierte Prompts werden mit einem Text-Encoder, wie dem von Contrastive Language–Image Pre-training (CLIP) [428], verarbeitet. Der Maskendecoder kombiniert die Bildeinbettungen mit den Einbettungen des Promptencoders, um die endgültige Ausgabe zu generieren. Dabei ist der Maskendecoder darauf ausgelegt, mit Mehrdeutigkeiten in Ausgaben umzugehen, indem es drei Masken („whole“/„part“/„subpart“) für einen einzelnen Prompt erzeugt. Zusammen mit jeder Maske gibt der Maskendecoder auch eine Konfidenz aus. Dieser Konfidenzwert (Score) ist in der Regel definiert als eine Schätzung der Schnittmenge zwischen der vorhergesagten Maske und dem tatsächlichen Objekt, welche als IoU bezeichnet wird. Durch die vollständige Entkopplung vom Bildencoder und der zusätzlich leichtgewichtigen Architektur (reduzierte Schichten) des Maskendecoders kann dieser auch mit geringen Rechenressourcen Ausgaben erzeugen. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig für interaktive Anwendungen wie diese Sichtprüfungsapplikation. Die zuvor beschriebenen Komponenten der Aufgabe und des Modells sind in Abbildung 4.12 zusammenhängend dargestellt.

Die dritte Komponente bildet der sogenannte **SA-1B-Datensatz**, welcher zum Trainieren des ViT des SAM genutzt wurde. Dieser enthält 11 Millionen Bilder mit circa einer Milliarde korrespondierender Masken. Damit stellt SA-1B den größten Datensatz seiner Art dar. Mithilfe dieses Datensatzes versucht das SA-Projekt für die beschriebenen Promptingmethoden eine hohe Generalisierung auf unterschiedliche Bilddaten zu erreichen. Diese Eigenschaft kann bei der Segmentierung von Defekten an Flugzeugbauteilen genutzt werden.

Zur Bewertung der Eignung für die Luftfahrtindustrie zeigen die Ergebnisse einer am Institut für Flugzeug-Produktionstechnik (IFPT) durchgeführten qualitativen Studie [389], an der der Verfasser dieser Arbeit mitgewirkt hat, dass ein breites Spektrum von Bauteilen zufriedenstellend segmentiert werden kann. Dabei wurden potenzielle Anwendungsfälle für die Produktion und MRO skizziert und repräsentative Bilddaten von Bauteilen aus diesem Spektrum analysiert. Der Fokus lag dabei auf der Verwendung des SAM ohne zusätzliches Fine-Tuning durch domänenspezifische Trainingsdaten.

4.4.2.2 Auswahl geeigneter Promptingmethoden

Zunächst werden aus den verfügbaren Promptingmethoden die relevanten Eingabemöglichkeiten eingegrenzt. Dafür werden im Folgenden die punktbasierten Prompts (Einzelpunkt und Vordergrund/Hintergrund) und die Prompts basierend auf Begrenzungsrahmen näher beleuchtet.

Um eine effiziente Defektsegmentierung zu gewährleisten, ist es wichtig, dass die erforderlichen Eingaben seitens des Prüfenden gering gehalten werden. Gleichzeitig müssen diese Eingaben zu einer zufriedenstellenden Maskierung des Defekts führen. Punktbasierte Eingaben mit dem SAM können entweder als Einzelpunkt oder aufbauend darauf mit zusätzlichen Punkten (Multipunkt) erzeugt werden. Wird eine Maske mit einem Einzelpunkt generiert, können durch die Auswahl zusätzlicher Punkte weitere Bereiche in die Maske einbezogen bzw. aus der Maske entfernt werden. Jeder zusätzliche Punkt ist bei der visuellen Inspektion mit einer weiteren Eingabe und damit mit einem erhöhten Zeitaufwand verbunden.

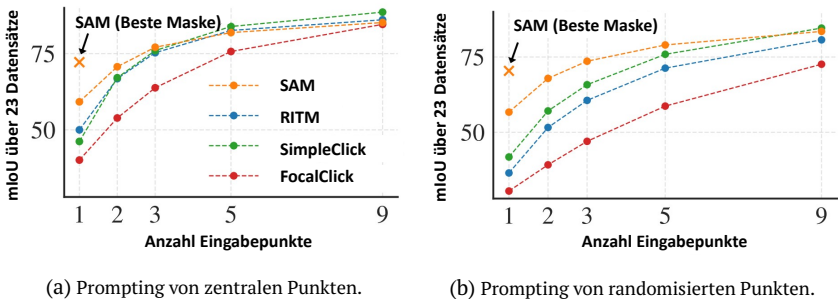


Abbildung 4.13: Vergleich der Mean Intersection over Union (mIoU) der Segmentierungsansätze FocalClick [429], SimpleClick [430], RITM [431] und SAM über 23 Datensätze (beispielsweise [432], [433], [434], [435]) bei steigenden Eingabepunkten (in Anlehnung an [424]).

Daher ist die Fähigkeit, qualitativ hochwertige Masken aus einem einzigen Punkt zu erzeugen, von entscheidender Bedeutung. Bei Vorstellung des SA-Projekts wurde diese Fähigkeit in [424] für die punktbasierte Eingabe untersucht und die Ergebnisse der durchgeführten Studien sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Es zeigt sich, dass das SAM bei der Eingabe von bis zu drei Punkten anderen Ansätzen zur punktbasierten Segmentierung überlegen ist. Dabei ist zu beachten, dass alle Ansätze bei einem Punkt nur eine relativ geringe mIoU über die Datensätze erreichen. Dies kann auf die Mehrdeutigkeit der Segmentierungsaufgabe selbst zurückgeführt

werden. Mehrdeutigkeit bedeutet, dass ein Objekt in der Regel aus verschiedenen Teilobjekten besteht.

So kann bei der Segmentierung einer Person die zugrundeliegende Ground Truth-Maske die ganze Person sein, aber auch z. B. ihre Kleidung (T-Shirt, Hose). Eine signifikante Steigerung der mIoU in den Studien ist erkennbar, wenn anstelle der Standardausgabemaske die bestmögliche Ausgabemaske manuell ausgewählt wird. Neben einer effizienten Segmentierung ist auch eine weitgehende Unabhängigkeit vom Prüfenden von Bedeutung. Es ist zu erwarten, dass die Punkteingabe durch die Prüfenden einer natürlichen, personenindividuellen Streuung unterliegt. In diesem Zusammenhang zeigt Abbildung 4.13b, dass das SAM selbst bei der Auswahl von Punkten außerhalb des Objektmittelpunkts deutlich leistungsfähiger als andere Verfahren ist. Diese Fähigkeit des SAM deutet darauf hin, dass trotz der Streuung hochwertige Masken erzeugt werden können.

Zusammenfassend erfüllt das punkt-basierte Prompting des SAM die grundlegenden Anforderungen für den Einsatz der interaktiven Segmentierung in der Sichtprüfung. Zusätzlich zu den punkt-basierten Annotationsmethoden wird die Bounding Box verwendet. Dies ist damit zu begründen, dass die Bounding Box in bildbasierten Aufgaben ein häufig verwendetes Mittel zur Annotation von Objekten ist. Es ist jedoch zu beachten, dass die Bounding Box im Gegensatz zu Abbildung 4.3 die Eingabe für das SAM ist und nicht die endgültige Maske darstellt. Als Ausgabe erzeugt das SAM wie bei den punkt-basierten Methoden pixelgenaue Masken. Die konzeptionelle Einbindung der beschriebenen Promptingmethoden orientiert sich an Abbildung 4.3 und ist exemplarisch in Abbildung 4.14 dargestellt.

Das Text- sowie das Rastersampling (Abbildung 4.12) lassen sich für den Anwendungsfall als nicht geeignet ausschließen. Das Rastersampling generiert für alle Objekte innerhalb eines Bildes Masken und ist nicht für die Einzelobjektsegmentierung vorgesehen. Das Prompting über Freitexte ist durch die Eingabe von Texten sehr zeitintensiv und darüber hinaus nur auf das Segmentieren von „Common Objects“ (Alltagsgegenstände) ausgelegt. Dadurch sind domänenspezifische Objekte sowie Defekte, wie sie in der Flugzeugproduktion vorkommen, nicht abgedeckt.

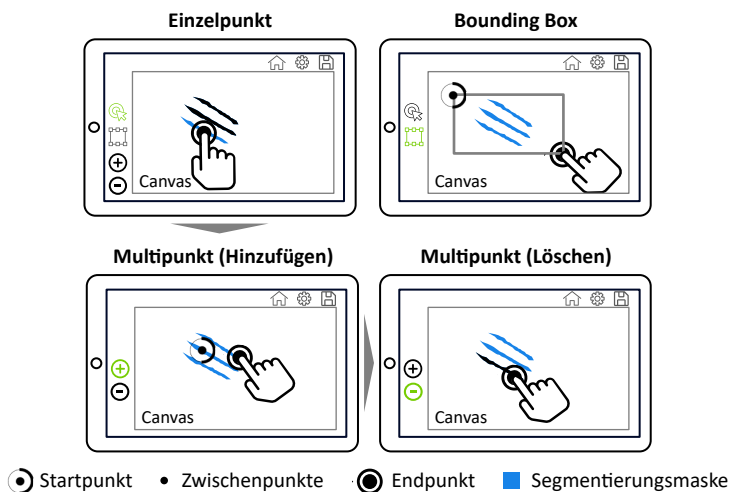


Abbildung 4.14: Konzeptionelle Darstellung der ausgewählten Promptingmethoden der Tabletapplikation.

4.4.2.3 Umsetzung der Defektannotation

Nach Aufnahme des Defektbildes werden die entwickelten Segmentierungswerkzeuge über Buttons zur Auswahl bereitgestellt (Abbildung 4.15). Dabei sind die Einzelpunkt- sowie die Vorder- /Hintergrundprompts in einer gemeinsamen Funktion integriert, welche als **1** in Abbildung 4.15 gekennzeichnet ist. Des Weiteren sind das Bounding Box-Prompting **2** und die manuellen Maskierungswerkzeuge **3** aus der 1. Systemiteration auf dieser Bedienoberfläche anwählbar.

Zur exemplarischen Erläuterung weiterer untergeordneter Bedienoberflächen dient Funktion **1**. In Abbildung 4.16 ist diese Bedienoberfläche mit einer getätigten Punkteingabe und der entsprechenden überlagerten Segmentierungsmaske dargestellt. Der Benutzende hat die Möglichkeit zwischen drei Ausgabemasken des SAM durch Pfeiltasten **4** auszuwählen. Dabei ist die Standardausgabemaske die mit dem höchsten Score. Ist die Überlagerungsmaske nicht zufriedenstellend für den Benutzenden, können über **5** und **6** weitere Punkte zur Erweiterung oder Verkleinerung der Maske hinzugefügt werden. Die Auswahl einer dieser beiden Buttons stellt das Umschalten auf das Vorder- /Hintergrundprompting dar. Darüber hinaus kann bei Erreichen einer subjektiv ausreichenden Qualität der Defektmaskierung die Auswahl bestätigt werden **7**, wodurch die Bedienoberfläche für die textuelle

Annotation des Defekts geöffnet wird. Bei falscher Eingabe eines Punktes kann die Auswahl über **8** verworfen werden.

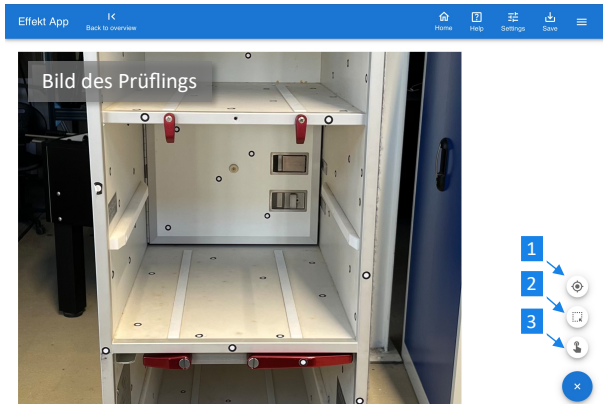


Abbildung 4.15: Bedienoberfläche des Tablets nach Aufnahme eines Defektbildes mit den Punkt- und Vorder-/Hintergrundprompts **1**, den Boundingbox-Werkzeugen **2** sowie den manuellen Werkzeugen **3** aus der ersten Systemiteration.

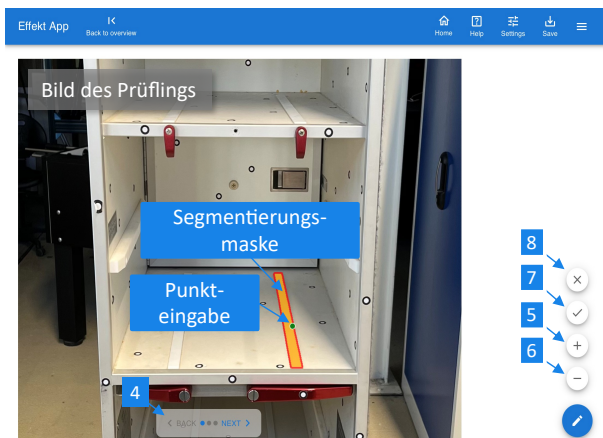


Abbildung 4.16: Bedienoberfläche des Tablets nach einer Punkteingabe mit der überlagerten Segmentierungsmaske. Werkzeuge zum Umschalten zwischen den drei Segmentierungsmasken **4**, Hinzufügen von Punkten für das Vorder-/Hintergrundprompting **5** **6**, sowie Akzeptieren **7** und Verwerfen **8** der aktuellen Auswahl.

4.5 Komparative und summative Evaluierung der zweiten Systemiteration

4.5.1 Genauigkeitsevaluierung der Defektlokalisierung

Ziel dieser Evaluierung ist es, die Genauigkeit der Schnittstellenberechnungen für die Defektlokalisierung im 3D-Modell zu quantifizieren. Dafür werden die Kennzahlen der Absolut- und Wiederholgenauigkeit in Anlehnung an die ISO-Norm 9283 [436] verwendet (in der Messtechnik als Richtigkeit und Präzision bezeichnet). Diese Norm wird in ihrer eigentlichen Verwendung für die Charakterisierung von Robotersystemen genutzt, wird aber auch in anderen Publikationen für die Evaluation von Lokalisierungssystemen appliziert, z. B. in [437].

4.5.1.1 Versuchsaufbau

Der physische Versuchsaufbau besteht aus mehreren Komponenten. Zum einen wird ein „Ground Truth-System“ benötigt, mit welchem die Objekte im Raum zueinander eingemessen werden können. Für dieses werden drei *OptiTrack Prime 13-Kameras von NaturalPoint* verwendet [438], die rund um die Versuchsfläche angeordnet sind (Absolutgenauigkeit: 0,46 mm; Wiederholgenauigkeit: 0,25 mm nach Kalibrierung gemäß [439]). Das OptiTrack (OT)-System ist darauf ausgelegt, passive, retroreflektierende Marker zu erkennen, die auf den zu lokalisierenden Objekten angebracht werden.

Zum anderen wird für die Evaluierung der Schnittstellenberechnung eine definierte und reproduzierbare Position und Orientierung des Tablets im Raum benötigt, welche über die Handhabung mittels eines Robotersystems realisiert wird. In diesem Versuch wird ein *UR10e von Universal Robot* eingesetzt (Wiederholgenauigkeit: 0,05 mm [440]; Absolutgenauigkeit: 1 mm [441]). Das OT-System und die Roboterplattform mit Tabletaufnahme bilden gemeinsam das **Referenzsystem** für den Versuch. Die Genauigkeitskennzahlen der einzelnen Komponenten dieses Referenzsystems liegen deutlich unter den im Versuch zu erwartenden Abweichungen, sodass das System als Referenz geeignet ist.

Neben dem Referenzsystem wird ein **Versuchskörper** auf der Versuchsfläche platziert, auf welchem ein AM (90x90mm) sowie eine Zielscheibe mit bekannter Position zum Marker befestigt werden. Der Marker dient zur Lokalisierung und der Mittelpunkt der Zielscheibe simuliert dabei eine punktuelle Auswahl eines defekten

Bauteils durch den Nutzenden. Die beschriebenen Systeme sind in Abbildung 4.17 dargestellt.

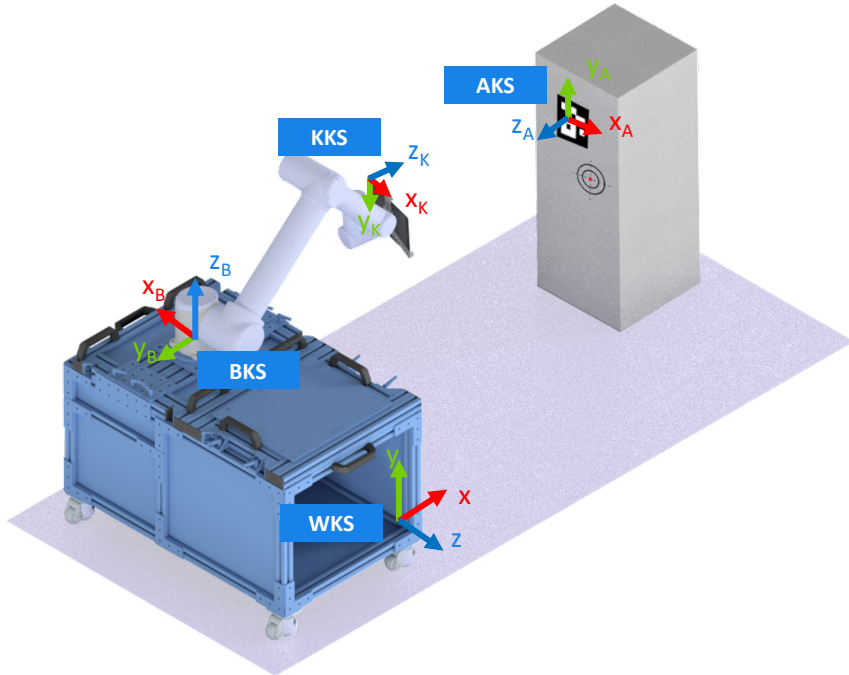


Abbildung 4.17: Physischer Versuchsaufbau der Genauigkeitsevaluierung.

Um die physischen Objekte in einen lokalen Bezug zueinander zu setzen, wird das OT-System genutzt. Zunächst wird das Koordinatensystem des OT-Systems als Weltkoordinatensystem (WKS) definiert und auf dem Boden der Versuchsfläche über einen Kalibrierkörper eingemessen. Anschließend werden auf der mobilen Roboterplattform, um die AM sowie die Zielscheibe Marker angebracht. Da das OT-System in dem Schwerpunkt der Marker den Koordinatenursprung des zu lokalisierenden Objekts definiert, können über geschickte Markerpositionierung bekannte Punkte als Ursprünge eingemessen werden. Durch dieses Vorgehen können die Koordinatensysteme im nächsten Schritt über einfache Transformationen in die vorgesehenen Position und Orientierung gebracht werden. So wird ausgehend von der mobilen Plattform das Basis-Koordinatensystem (BKS) des Roboters entsprechend seiner Kinematik festgelegt und das AM-Koordinatensystem (AKS)

im Mittelpunkt des Markers mit den X- und Y-Achsen entlang der Kanten des Versuchskörpers. Die Bestimmung des Kamerakoordinatensystems erfolgt mithilfe des Roboters durch die Verschiebung des Tool Center Point (TCP) in die Mitte der Kameralinse, wodurch die TCP-Pose direkt die Kamerapose widerspiegelt. Grundlage für die nachfolgenden Versuche stellen entsprechende Transformationen dieser Koordinatensysteme zueinander dar (Abbildung 4.18; Tabelle 4.6).

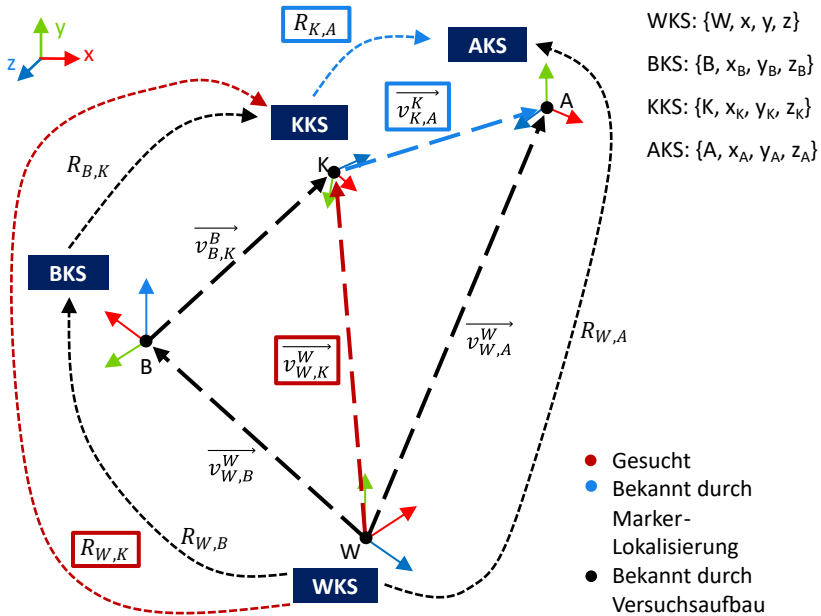


Abbildung 4.18: Koordinatensysteme im Versuchsaufbau und deren Beziehungen.

4.5.1.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Um die Versuche durchzuführen, wird der Roboter-TCP an 15 Punkte im Raum bewegt. Dafür werden drei Ebenen in einer kreuzförmigen Anordnung definiert, mit jeweils fünf Punkten pro Ebene, wobei der Mittelpunkt jedes Kreuzes zentral auf den Ursprung des AM ausgerichtet ist (Abbildung 4.19). Damit der AM immer vollständig im Blickfeld der Tablet-Kamera bleibt, wird an jedem angefahrenen Punkt das entsprechende Robotergelenk so eingestellt, dass die Kamera auf den AM gerichtet ist. An jedem Punkt wird die Kamerapose gespeichert und über eine manuelle

Formel	Herkunft
$\overrightarrow{v_{W,B}^W}$	Translation aus OT-System
$\overrightarrow{v_{W,A}^W}$	Translation aus OT-System
$\overrightarrow{v_{B,K}^B}$	TCP-Position aus Robotersystem
$\overrightarrow{v_{K,A}^K}$	Kamera-Position aus AM-Lokalisierung
$R_{W,B}$	Ausrichtung aus OT-System
$R_{W,A}$	Ausrichtung aus OT-System
$R_{B,K}$	TCP-Ausrichtung aus Robotersystem
$R_{K,A}$	Kamera-Ausrichtung aus AM-Lokalisierung

Tabelle 4.6: Beschreibung der Formelzeichen

Eingabe ein Foto mit der Tablet-Kamera in höchster Auflösung (4032x3024 Pixel) aufgenommen. Für jedes Bild werden nachträglich die Pixelkoordinaten der Zielscheibenmitte manuell bestimmt, welche als Input für die Berechnung der Schnittgerade benötigt werden. Als Referenzsystem dient hierbei das OT-System.

Die auf diese Weise gewonnenen Daten können genutzt werden, um die eigentliche Genauigkeitsevaluierung durchzuführen. Hierfür wird ein Datensatz erstellt und dem Modul der Schnittpunktberechnung übergeben. Der Datensatz besteht aus 15 punktindividuellen Einträgen, wobei sich diese jeweils aus den Kameraposen aus der AM-Detektion und den Pixeldaten der Bildaufnahmen zusammensetzen. Darüber hinaus ist ein einfaches CAD-Modell des Versuchskörpers als Kollisionsfläche für die Schnittgerade notwendig. Als Ausgabe werden die Schnittpunkte im AM-Koordinatensystem generiert. Da die Zielscheibe auf der X-Y-Achse des AM-Koordinatensystems liegt und deren Mittelpunkt eine bekannte Verschiebung von 140 mm in negativer Y-Richtung und positiver X-Richtung aufweist, können die Ergebnisse entsprechend Abbildung 4.20 in einen zweidimensionalen Graphen übertragen werden.

Darüber hinaus können basierend auf den Abweichungen der berechneten Punkte zum Zielscheibenmittelpunkt die Kenngrößen der Absolut- und Wiederholgenauigkeit nach ISO berechnet werden:

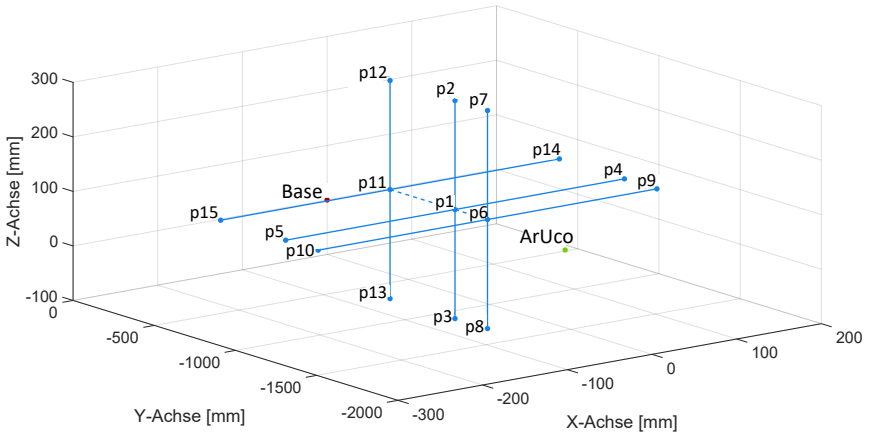


Abbildung 4.19: Festgelegte Wegpunkte (hellblau) als kreuzförmige Ebene mit unterschiedlichen Abständen zum AM (grün).

Kenngröße	Wert
Absolutgenauigkeit (Richtigkeit)	21,34 mm
Wiederholgenauigkeit (Präzision)	1,10 mm

Tabelle 4.7: Berechnete Kenngrößen aus der Schnittstellenberechnung gemäß [436].

4.5.2 Gebrauchstauglichkeits- und Arbeitsbelastungsevaluierung

Neben der Genauigkeitsevaluierung wird eine nutzungszentrierte Evaluierung durchgeführt, welche zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit und der Arbeitsbelastung bei Benutzung der Applikation abzielt. Zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit wird, wie in der vorangegangenen Studie der SUS verwendet, zur Bewertung der Arbeitsbelastung der NASA-TLX. Neben den Items dieser beiden Methoden enthält der abschließende Fragebogen für die Studie weitere selbst definierte Fragen. Die Teilnehmenden bewerten, ob sie die beiden neuen bzw. überarbeiteten Hauptfunktionen – der KI-gestützten Defektsegmentierung und der Defektlokalisierung – als nützlich erachten. Darüber hinaus wird ermittelt, ob die Versuchsperson die Anwendung bereits aus der Vorgängerstudie kennt, um zwischen erstmaligen und wiederkehrenden Teilnehmenden differenzieren zu können.

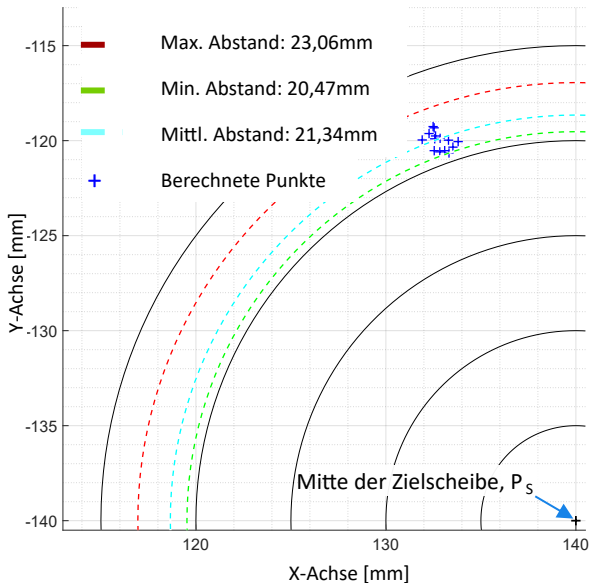


Abbildung 4.20: Darstellung der Verteilung einzelner, berechneter Trefferpunkte auf der Zielscheibe im AKS. Der Punkt P_S repräsentiert den Mittelpunkt der Zielscheibe. Im Diagramm sind die Trefferpunkte durch blaue Kreuze visualisiert.

4.5.2.1 Versuchsaufbau

Bei der grundsätzlichen Versuchsgestaltung wird auf die erste Studie aus Abschnitt 4.3 zurückgegriffen. Dabei ist anzumerken, dass die zugrundeliegenden Aufgaben unverändert bleiben. Es wird eine Sichtprüfung am selben Flugzeugkabinenbauteil mit den identischen Defektbereichen und Einzelfehlern durchgeführt. Um die zusätzliche Funktion der Defektlokalisierung nutzen zu können, wird am Bauteil ein AM angebracht, der es ermöglicht, mithilfe eines einzelnen Übersichtsfotos alle Defekte des Prüflings zuzuordnen. Die Studie wird mit einer Gruppe von 16 Personen durchgeführt, von denen 4 an der ersten Studie teilgenommen haben.

4.5.2.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Da die Versuchsdurchführung nahezu identisch mit der Evaluation der ersten Systemiteration ist, wird an dieser Stelle auf den Abschnitt 4.3.2 verwiesen. Unterschiede

bestehen darin, dass die Defektlokalisierung sowohl bei der Schulung als auch bei der Durchführung der Sichtprüfung ein zusätzlicher Bestandteil ist und dass der abschließende Fragebogen durch die Berücksichtigung der mentalen Belastung umfangreicher wird.

Die Auswertung der **SUS-Fragen** ergibt eine durchschnittliche Gesamtpunktzahl von 91,88 ($\sigma = 4,55$). Bei der Einordnung in die SUS-Skala nach [211] fällt die zweite Systemiteration der Applikation in die höchste Adjektivbewertung zwischen „exzellent“ und „bestmöglich“, was der Höchstnote „A“ entspricht. Beim Vergleich der durchschnittlichen Bewertungen von erstmaligen und wiederkehrenden Teilnehmenden (Abbildung A.4) lässt sich erkennen, dass wiederkehrende Teilnehmende die Applikation besser bewerten ($\bar{x} = 95$) als erstmalige Teilnehmende ($\bar{x} = 90,83$). Im Vergleich dazu wurde die Benutzerfreundlichkeit der Vorgängerversion in der Vorstudie mit 83,25 Punkten bewertet, die AR-Applikation mit 75 Punkten (Abbildung 4.21).

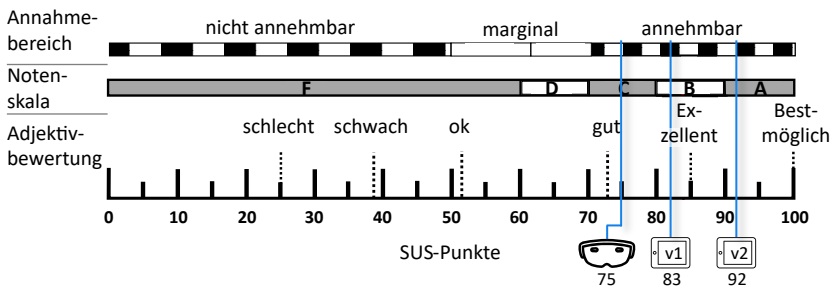


Abbildung 4.21: Einordnung der Studienergebnisse der ersten Systemiteration basierend auf AR-Brille und Tablet (v1) sowie der zweiten Tablet-Systemiteration (v2) auf der SUS-Skala nach [211].

Wie bereits in Abschnitt 4.3 werden auch hier weitere statistische Metriken zur genaueren Analyse der Studien herangezogen. Es erfolgt ein direkter Vergleich mit der 1. Systemiteration der Tablet-Applikation. Das 95%-Konfidenzintervall der 2. Systemiteration (89,37-94,38) zeigt eine deutliche Verengung gegenüber der 1. Systemiteration (75,90-90,60). Die Bewertungen spiegeln dadurch eine konsistentere Erfahrung wider, was auf effektive Verbesserungen im Design oder in der Funktionalität des Systems hinweist. Darüber hinaus zeigt das Fehlen einer Überschneidung zwischen der oberen Grenze des Intervalls der 1. Systemiteration und der unteren Grenze des Intervalls der 2. Systemiteration, dass es einen klaren Trend zu einer hö-

heren Gebrauchstauglichkeit durch die Weiterentwicklung gibt. Die höhere untere Grenze des Intervalls der 2. Systemiteration (89,37) im Vergleich zur oberen Grenze der 1. Systemiteration (90,60) deutet darauf hin, dass die Teilnehmenden die überarbeitete Version als signifikant gebrauchstauglicher einschätzen. Der Shapiro-Wilk-Test für die 2. Systemiteration mit einem p-Wert von 0,225 zeigt, dass auch dieser Datensatz annähernd normalverteilt ist. Tabelle 4.8 stellt die beschriebenen Metriken der 1. und 2. Systemiteration einander gegenüber.

Metriken	1. Systemiteration	2. Systemiteration
Mittelwert	83,25	91,88
Standardabweichung	10,28	4,55
95% Konfidenzintervall	(75,90; 90,60)	(89,37; 94,38)
Shapiro-Wilk p-Wert	0,423	0,225

Tabelle 4.8: Statistische Werte für die Studienergebnisse der 1. und 2. Systemiteration der Tabletapplikation.

Daher ist die Voraussetzung für die Anwendung des Welch-Tests wiederum erfüllt. Dieser ergibt einen p-Wert von 0,029, was die statistische Signifikanz des Unterschieds zwischen den Systemiterationen bekräftigt. Dies bestätigt, dass die Modifikationen zu einer messbar verbesserten Erfahrung geführt haben. Das Cohen's d von 1,079 ist ein weiterer Beleg für die Stärke des Effekts; da dieser deutlich über dem Schwellenwert für einen „großen“ Effekt (0,8) liegt und die praktische Bedeutung der Änderungen verdeutlicht. Die Werte der vergleichenden Analyse lassen sich Tabelle 4.9 entnehmen.

Vergleichende Metriken	Wert
Differenz der Mittelwerte	8,63
Differenz der Standardabweichungen	-5,73
Welch's t-Test t-Wert	-2,496
Welch's t-Test p-Wert	0,029
Effektstärke über Cohen's d	1,079

Tabelle 4.9: Vergleichende statistische Werte für die Studienergebnisse der 1. und 2. Systemiteration der Tabletapplikation.

Die Auswertung der **NASA-TLX-Fragen** liefert als Ergebnis sechs gewichtete Aspekte zur wahrgenommenen Arbeitsbelastung bei der Verwendung der Applikation. Die Mittelwerte von Gewichtungen und Bewertungen der Einzelaspekte über alle

Teilnehmenden lassen sich Tabelle 4.10 entnehmen. Die Gewichtungen der Tabelle zeigen, dass die Teilnehmenden physische Aspekte wie die „körperlichen Anforderungen“ oder die „Anstrengung“ in ihrer Relevanz als eher untergeordnet erachten, wohingegen „zeitliche und geistige Anforderungen“ als besonders wichtig empfunden werden. Da die Sichtprüfung eine anspruchsvolle kognitive Aufgabe für die Prüfenden darstellt, spiegelt sich dies nicht nur in der als höher empfundenen Wichtigkeit, sondern auch in der als höher empfundenen Belastung dieser Aspekte wider. Zusammenfassend ergibt sich ein durchschnittlicher Wert von 23,33 über alle Aspekte ($\sigma = 8,92$). Zusätzlich wird die in Abschnitt 2.1.2.3 vorgestellte Tabelle 2.1 zur Interpretation der Werte des NASA-TLX verwendet. Mithilfe dieser lässt sich der Mittelwert der Belastung in einen mittleren Bereich einordnen. Da in der Vorstudie zur Technologieauswahl keine Ermittlung der Arbeitsbelastung stattgefunden hat, ist anders als bei den SUS-Ergebnissen kein Vergleich mit der 1. Systemiteration der Tablet-Applikation möglich. Um dennoch eine Abschätzung treffen zu können, ob sich die Applikation in einem Bereich angemessener Arbeitsbelastung bewegt, werden die Studien von [262], [263], [442] und [443] herangezogen. Diese Studien zeichnen sich dadurch aus, dass produktionsnahe Aufgaben durch eine Tablet-Applikation unterstützt wurden. Der Mittelwert der Ergebnisse dieser vier Studien liegt bei 26,67, was ebenfalls einer mittleren Arbeitsbelastung entspricht. Die hier vorgestellte Applikation weist demnach keine großen Abweichungen gegenüber verwandten Publikationen auf, sodass die Arbeitsbelastung als angemessen eingestuft werden kann.

Aspekt	∅ Gewichtung	∅ Wert
Zeitliche Anforderungen	23,33%	25,63
Geistige Anforderungen	22,50%	33,75
Frustration	17,50%	15,00
Leistung	17,08%	18,75
Anstrengung	10,83%	20,00
Körperliche Anforderungen	8,75%	18,13

Tabelle 4.10: Auflistung der durchschnittlichen Bewertung der einzelnen Aspekte sortiert nach der durchschnittlichen Gewichtung

Die offenen Fragen nach dem Nutzen der überarbeiteten Segmentierung sowie der neu eingeführten Defektlokalisierung werden von allen Teilnehmenden durchweg positiv beantwortet. Die Funktionen werden von zwölf Teilnehmenden als „sehr intuitiv“ bezeichnet. Aus den Antworten der wiederkehrenden Teilnehmenden

den geht auch eine wahrgenommene Effizienzsteigerung hervor. Alle vier Teilnehmenden geben an, das Gefühl zu haben, schneller und gleichzeitig viel präziser Defektkonturen anlegen zu können. Die Auswertung lässt den Schluss zu, dass diese beiden Funktionalitäten wesentlich zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit beigetragen haben, zumal der Rest der Applikation funktional unverändert geblieben ist.

4.5.3 Effizienz-, Segmentierungsqualitäts- und Reproduzierbarkeitsevaluierung

Die Bewertung der **Effizienz** kann durch eine Abschätzung der notwendigen Eingaben zur Segmentierung eines Defekts erfolgen. Im direkten Vergleich ermöglicht die geometrische Segmentierung mit Kreisen und Rechtecken eine schnelle Erzeugung von Masken. Polygone benötigen mindestens 3 Punkte, um den Polygonzug zu schließen. Bei der Betrachtung exemplarischer Segmentierungsmasken in Abbildung 4.22 fällt auf, dass hier meist mehr Stützpunkte erzeugt wurden. Im Gegensatz dazu stehen die Werkzeuge der Einzel- und Multipunktsegmentierung sowie der Bounding Box mittels VFM der 2. Systemiteration. Der Aufwand von den Kreisen und Rechtecken der 1. Systemiteration zur Bounding Box der 2. Systemiteration ist hier gleich – es wird ein Startpunkt sowie das Aufspannen der entsprechenden Form vom Nutzenden gefordert. Darüber hinaus musste keiner der Teilnehmenden auf das Mehrpunktwerkzeug zurückgreifen, wodurch sich der Aufwand pro Maske auf eine einzige Eingabe durch den Nutzenden reduziert. Zusammenfassend lässt sich hier qualitativ eine Reduzierung des Aufwands und damit eine Steigerung der Effizienz feststellen. Diese Steigerung kann jedoch nicht losgelöst von der Qualität der erzeugten Segmentierungsmasken betrachtet werden, weshalb diese im Folgenden näher untersucht wird.

Indirekt können aus der Studie weitere Erkenntnisse in Bezug auf die **Segmentierungsqualität** gezogen werden. Die Segmentierung eines Oberflächenbereichs hat die pixelgenaue Abgrenzung des Bildbereichs des Defekts vom restlichen Bild zum Ziel. Wie im Abschnitt 4.1.2 beschrieben, wird zur Bewertung eine qualitative Bewertung vorgenommen. Zunächst werden die Ergebnisse eines einzelnen Teilnehmenden betrachtet, die in Abbildung 4.23 dargestellt sind. Es wird deutlich, dass das SAM auf den ersten Blick zufriedenstellende Ergebnisse für die Defektsegmentierung der verschiedenen Bereiche liefert. Dies gilt sowohl für die Segmentierung von Bauteilen z. B. für die Defektklasse „Unvollständigkeit & Unrichtigkeit“

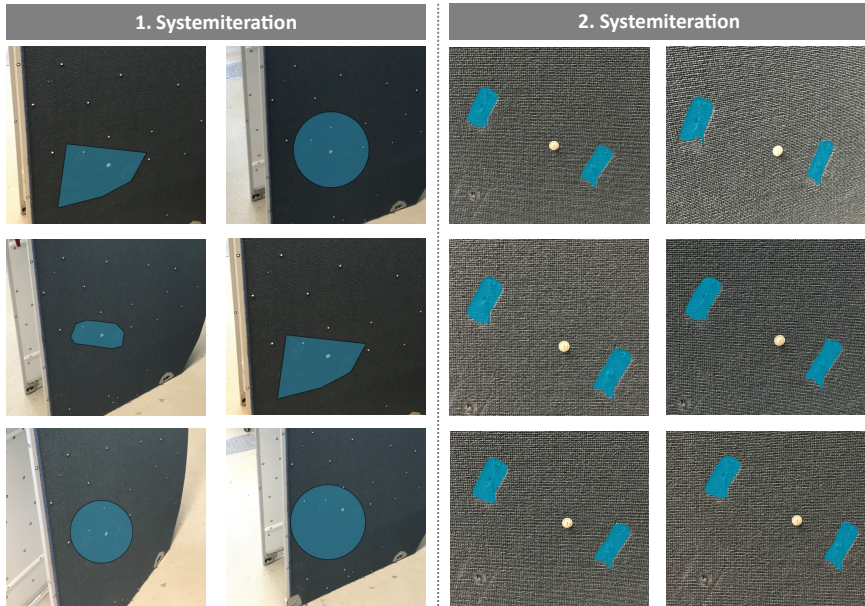


Abbildung 4.22: Exemplarische Ergebnisse von jeweils sechs unterschiedlichen Teilnehmenden der Studien zur 1. und 2. Systemiteration der Tabletapplikation für einen Defektbereich.

(Defektbereich 1) als auch für Konturen von „Oberflächenschäden“ (Defektbereich 5). Die Qualität der Segmentierung scheint außerdem unabhängig von der Größe des zu segmentierenden Objekts zu sein. Besonders kleine Defektbereiche (2, 4) werden offenbar mit der gleichen Genauigkeit maskiert wie größere Bereiche (1, 3).

Weiterhin bietet sich eine komparative Betrachtung der Segmentierungsmasken aus der ersten Studie der Tabletapplikation mit denen der zweiten Studie an. Zur genaueren Analyse dient stellvertretend der Defektbereich 5, in welchem es zwei Oberflächenschäden von den Teilnehmenden zu markieren galt. In Abbildung 4.22 sind die Segmentierungsmasken von jeweils sechs Teilnehmenden beider Studien in diesem Defektbereich gezeigt. Auffällig ist zunächst, dass die Segmentierung in der ersten Systemiteration jeweils nur für den Bereich, in welchem beide Einzelfehler verortet sind, getätigt wurde. Dadurch geht die Segmentierungsmaske weit über den eigentlichen Defekt hinaus. Masken in der zweiten Studie hingegen wurden

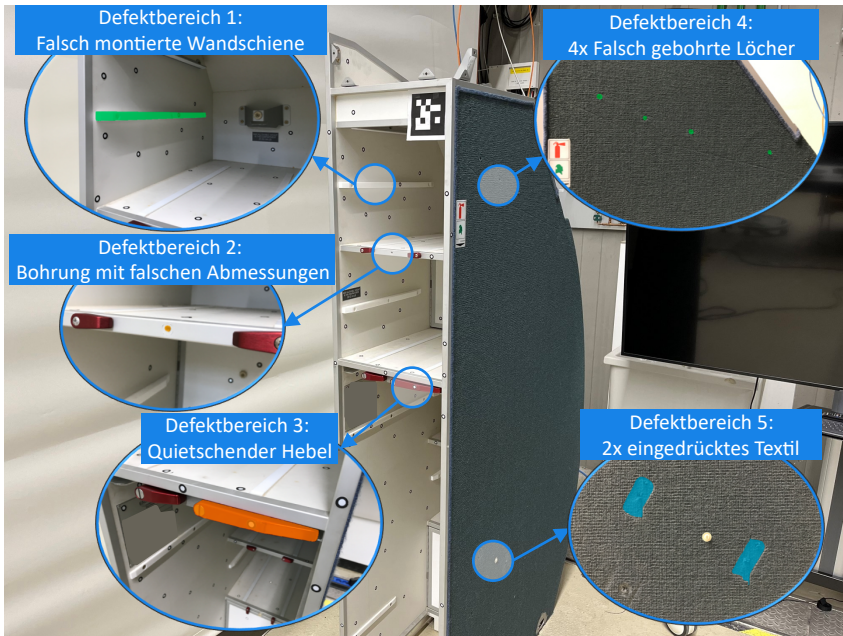


Abbildung 4.23: Exemplarische Ergebnisse eines Teilnehmenden der Studie mit den überlagerten Segmentierungsmasken an den fünf definierten Defektbereichen.

für die Einzelfehler angelegt und treffen die Defektkontur wesentlich besser.

Neben der verbesserten Segmentierungsqualität lässt sich in diesem Defektbereich eine weitere zentrale Verbesserung erkennen. Die **Reproduzierbarkeit** in der Erstellung der Segmentierungsmasken ist deutlich gestiegen. Aufgrund der unterschiedlichen Segmentierungswerkzeuge (Rechteck, Kreis, Polygon) der 1. Systemerweiterung kommt es allein dadurch zu Abweichungen in den erzeugten Masken. Im Gegensatz zu den Werkzeugen der 1. Systemiteration verhält sich die SAM-basierte Segmentierung robuster gegenüber schwankender Sorgfalt der Bedienenden. Dies ist insbesondere auf die starke Vereinfachung und Reduzierung der notwendigen Eingaben durch den Benutzenden zurückzuführen. Zur exakten Erfassung einer anspruchsvollen Defektkontur war in der 1. Systemiteration nur das Polygonwerkzeug geeignet, das eine Vielzahl von einzelnen Punkteingaben zur Bildung eines entsprechend präzisen Vektorzuges benötigte. Die Anzahl dieser Punkteingaben variierte in der Studie stark zwischen den Teilnehmenden. Darüber hinaus ist an-

zumerken, dass sich das SAM bei gleichbleibender Kameraperspektive und identischem Promptinput deterministisch verhält und somit als Output die gleichen Segmentierungsmasken generiert. Mit diesen Ergebnissen wird die Evaluierung der 2. Systemiteration abgeschlossen und im Folgenden werden die Ergebnisse des gesamten Entwicklungszyklus dieses Kapitels vor dem Hintergrund der eingangs formulierten Anforderungen abschließend diskutiert.

4.6 Zusammenfassung, Diskussion und Einordnung der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitels wurde ein Informationseingabemodul für die Sichtprüfung auf Basis einer menschenzentrierten, iterativen Vorgehensweise entwickelt. Dafür wurde zunächst grundsätzliche Defektklassen sowie ein Referenzprozess definiert, um darauf aufbauend entsprechende Anforderungen aufzustellen. Ausgehend davon wurde durch eine komparative Evaluierung das Tablet als geeignete Basistechnologie für die Applikation in einer Sichtprüfung ausgewählt. Eine darauf aufbauende Weiterentwicklung und erneute Evaluation untersuchte den neuartigen Einsatz eines VFM in Kombination mit einer markerbasierten 3D-Defektlokalisierung und demonstrierte dessen signifikanten Mehrwert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der 1. Systemiteration (Abschnitt 4.3) lieferten erste empirische Evidenz dafür, dass Tablets im spezifischen Kontext der Informationseingabe für Sichtprüfungen eine höhere Gebrauchstauglichkeit aufweisen als AR-Brillen. Dazu wurden jeweils zwei Softwareprototypen mit den für die Sichtprüfung essenziellen Werkzeugen zur textuellen, bildlichen Annotation sowie zur Defektsegmentierung entwickelt und durch unabhängige Versuchsgruppen unter Zuhilfenahme des SUS-Fragebogens evaluiert. Die Ergebnisse erweitern die bisherigen Erkenntnisse im Forschungsfeld der Assistenzsysteme, die sich primär auf das Informationsausgabemodul konzentrierten (Abschnitt 2.2.3.5). Es wird deutlich, dass bewährte Technologien, die aus dem Alltag bekannt sind, auch hier überlegen sind. Die nah beieinanderliegenden SUS-Werte deuten jedoch darauf hin, dass die AR-Brille durchaus konkurrenzfähige Ergebnisse erzielen kann (Abbildung 4.6). Da AR-Brillen zunehmend für den Verbrauchermarkt entwickelt werden und damit potenziell eine größere Präsenz im Alltag erreichen können, ist mit einer steigenden Gebrauchstauglichkeit zu rechnen. Daher sollte diese Technologie nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Gleichzeitig dürfen gesundheitliche Aspekte, wie die im Abschnitt 2.2.3.5 beschriebene Cybersickness, nicht außer Acht gelassen werden.

Dieses bislang ungelöste Problem beschränkt den Einsatz auf zeitlich begrenzte und vereinzelte Montagetätigkeiten. Die hier diskutierten Ergebnisse entsprechen der Erfüllung des **ersten Teilsziels** des Informationserfassungsmoduls in Abbildung 2.16, indem eine studienbasierte Technologieuntersuchung und -auswahl für die Sichtprüfung durchgeführt wurde.

Darüber hinaus zeigten die Antworten auf die Zusatzfragen, dass insbesondere die Segmentierungswerkzeuge der Tabletapplikation Optimierungspotenzial aufweisen und eine integrierte Defektlokalisierung aus Sicht der Versuchsgruppe wünschenswert ist. Da diese Elemente zentrale Bestandteile der Dokumentation der in der Literatur nicht adressierten Oberflächendefekte ist, wurde ein zweiter Entwicklungszyklus durchlaufen.

Die wissenschaftliche Untersuchung der Funktion zur **3D-Defektlokalisierung** adressierte die spezifischen Anforderungen der Oberflächenprüfung, bei der Nahaufnahmen bisherige Lokalisierungsverfahren, wie der in Abschnitt 2.2.3.2 gezeigten Kantendetektion, unbrauchbar machen. Die hier konzipierte und untersuchte prozedurale Entkopplung der Lokalisierung von der Detailaufnahme (Abbildung 4.7) stellt einen neuen methodischen Ansatz dar. Dieser kombiniert bestehende markerbasierte Verfahren mit einer Schnittstellenberechnung und ermöglicht so deren Einsatz im Anwendungsfall. Dieser Ansatz ermöglicht es, bestehende Lokalisierungsverfahren, wie die hier verwendete markerbasierte Lokalisierung in Kombination mit einer Schnittstellenberechnung, zu verwenden. Obwohl die Nutzung von Markern und der zweistufige Prozess einen gewissen Mehraufwand in der Prüfdurchführung bedeuten, ist die präzise Ortsinformation eines Defekts ein fundamentaler Bestandteil einer aussagekräftigen Dokumentation in der Sichtprüfung. Der hier vorgestellte Ansatz ermöglicht diese essenzielle Lokalisierung auch unter den schwierigen Aufnahmebedingungen bei Oberflächendefekten und erhöht somit entscheidend den Informationsgehalt und die Verwertbarkeit der gewonnenen Qualitätsdaten.

Zur wissenschaftlichen Fundierung und Quantifizierung der Leistungsfähigkeit dieses neuartigen Lokalisierungsansatzes wurde eine Genauigkeitsuntersuchung durchgeführt. Hierfür wurde ein Versuchsaufbau mit einem Roboter realisiert, der das Tablet an seinem TCP in vordefinierte Positionen brachte und somit verschiedene Posen des Tablets während der Sichtprüfung simulierte. Auf dieser Grundlage wurden entsprechend der ISO-Norm die Kennzahlen für die Absolut- und Wiederholgenauigkeit ermittelt, die im einstelligen Zentimeterbereich (Absolutgenauigkeit) bzw. im einstelligen Millimeterbereich (Wiederholgenauigkeit) liegen. Diese Werte sind kritisch im Hinblick auf die in Tabelle 4.5 formulierte Forderung

nach verwechslungsfreier Defektlokalisierung zu reflektieren. Da prinzipiell alle verbauten Elemente eines Prüflings von einem Defekt betroffen sein können, einschließlich kleiner sichtbarer Verbindungselemente (z. B. Schrauben oder Niete), ist die Erfüllung dieser Anforderung allein durch einen Lokalisierungsalgorithmus nicht zweckdienlich. Aus diesem Grund wurde die Defektlokalisierung mit einer Rückkopplungsschleife zum Menschen verknüpft. Die Ergebnisse der Schnittstellenberechnung erlauben in diesem Fall die Ausgabe einer nach Abständen vorsortierten Liste möglicher betroffener Bauteile. Aus dieser Liste entscheidet letztlich der Prüfende, welches Bauteil tatsächlich betroffen ist. Auch diese Vorgehensweise erfordert eine zusätzliche Eingabe durch den Menschen, geht also mit einem Mehraufwand einher, der aber die Korrektheit der Qualitätsdaten (AF 5.2 in Tabelle 4.5) sicherstellt.

Die Weiterentwicklung der **Segmentierungswerkzeuge** adressierte insbesondere die Anforderungen an Effizienz, Segmentierungsqualität und Reproduzierbarkeit (AF 3.2-3.4 in Tabelle 4.1). Konkret sollte eine personenunabhängige, präzisere Segmentierungsmaske bei gleichem oder geringerem Eingabeaufwand für den Nutzenden ermöglicht werden. Der erstmalige Einsatz eines Zero-Shot-VFM für die interaktive Defektsegmentierung in einem Assistenzsystem stellt einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag dar. Dieser Ansatz umgeht die in der Luftfahrtproduktion typische Limitierung fehlender, domänenspezifischer Trainingsdaten für herkömmliche DL-Modelle. Dadurch entfällt der Aufwand für die Gewinnung realer oder die Generierung synthetischer Trainingsdaten vollständig. Dies ist besonders vorteilhaft in Umgebungen, in denen Defekte nicht einem Standardtyp oder einer Standardform entsprechen. Aus den in der Literatur verfügbaren Modellen wurde das SAM aufgrund seiner Überlegenheit – insbesondere bei der Segmentierung mit wenigen Eingaben – ausgewählt. Um dieses Modell für die Anwendung nutzbar zu machen, wurden auf Basis des Anwendungsfalles der Sichtprüfung geeignete Prompting-Methoden des SAM eingegrenzt und diese als Service in einer Server-Client-Architektur in die Anwendung implementiert. Zur näheren Untersuchung der Nutzbarkeit der zuvor beschriebenen Defektlokalisierung und -segmentierung wurden diese anhand des Studiendesigns aus der 1. Systemiteration getestet. Die Ergebnisse der Studie (Abschnitt 4.5.2) belegen, dass diese Funktionen im direkten Vergleich zur 1. Systemiteration zu einer signifikanten Steigerung der SUS-Werte und damit der Gebrauchstauglichkeit führen. Da VFMs bisher nicht im Kontext von Assistenzsystemen betrachtet wurden, stellen die Studienergebnisse eine wertvolle wissenschaftliche Erkenntnis für den Forschungsbereich der Mensch-Maschine-

bzw. Mensch-KI-Interaktion dar. Hervorzuheben ist insbesondere die Segmentierung mittels Einzelpunktprompting, die eine aus Sicht der Teilnehmenden sehr intuitive Maskenerstellung durch Anwählen des Defekts auf dem Bild ermöglicht. Darüber hinaus konnte im Rahmen der Studie eine mittlere Arbeitsbelastung bei der Nutzung der Applikation nachgewiesen werden, die in einem ähnlichen Bereich wie bei vergleichbaren Publikationen liegt. Insgesamt zeigt die nutzungsorientierte Evaluation vielversprechende Ergebnisse für den kombinierten Einsatz von Defektlokalisierung und VFM-basierter Segmentierung in der visuellen Inspektion von Flugzeugkomponenten.

Die Aussagekraft dieser Ergebnisse wird durch die ausgewählten Versuchspersonen eingeschränkt. Zwar weist die Versuchsgruppe einen ingenieurwissenschaftlichen Hintergrund auf, jedoch ist keine der Versuchspersonen aktiv im adressierten Berufsfeld der Flugzeugproduktion tätig. Für eine praxisorientierte Weiterentwicklung bzw. Industrialisierung dieses Moduls ist das Feedback von realen Anwendenden unerlässlich, um eine hohe Technologieakzeptanz zu gewährleisten.

Neben nutzungsorientierter Kennzahlen wurden weitere nicht-funktionale Anforderungen aus Tabelle 4.1 qualitativ diskutiert. Dazu dienten die in der Studie erzeugten Defektmasken, welche in Bezug auf Effizienz, Segmentierungsqualität und Reproduzierbarkeit miteinander verglichen wurden. Dabei zeigte sich bei allen diesen Anforderungen eine erhebliche Verbesserung durch die Ersetzung der geometrischen Werkzeuge durch das VFM-basierte Segmentieren. Die Vorteile des SAM treten hier insbesondere bei der Defektklasse „Oberflächenschäden“ zutage, die eine komplexe Kontur (z. B. durch viele Verzweigungen) aufweisen. Diese konnten mit der 1. Systemiteration nur mit dem Polygonwerkzeug unter Verwendung einer Vielzahl von Stützpunkten exakt maskiert werden. Bei der 2. Systemiteration reichten für die alle definierten Defektklassen einzelne Punkteingaben aus (Abbildung 4.23). Ein weiterer Vorteil von VFMs zeigt sich auch in der weitestgehenden Unabhängigkeit von spezifischen Bedingungen, unter denen die Fotos von Defekten aufgenommen werden. Dabei verhalten sich VFMs eher robust gegenüber der Variation von Parametern wie der Beleuchtung, dem Aufnahmewinkel oder dem physischen Zustand der Komponentenoberflächen. Dieser Umstand begünstigt bzw. befähigt die Nutzung von VFMs in Anwendungen, bei denen Kameras in kostengünstigen, handgeführten Endgeräten zum Einsatz kommen.

Die Hauptlimitation des gewählten Segmentierungsansatzes äußert sich in der Fähigkeit, die Defektklasse „Vollständigkeit & Korrektheit“ abzudecken. So können falsch montierte Bauteile ohne Probleme erkannt werden, jedoch können bei fehlenden Bauteilen nur die Konturen der physisch darunterliegenden Komponente

erfasst werden. Da das Segmentierungsmodell nach angelernten logischen Strukturen sucht, ist das nicht überraschend. Im direkten Vergleich mit den Arbeiten, die einen Abgleich von CAD-Modell und realer Komponente vornehmen (Abschnitt 2.2.3.2), ist der VFM-Ansatz speziell für die Vollständigkeitsprüfung als unterlegen einzustufen. Da dieses Kapitel insbesondere die Defektklasse „Oberflächenschäden“ adressierte, sind das hier vorgestellte Modul sowie die Forschungsarbeiten zur Vollständigkeitsprüfung als komplementär und perspektivisch kombinierbar zu verstehen. Ein weiteres Defizit besteht darin, dass die in Abbildung 4.7 dargestellte Annotation des Defekts vollständig manuell durchgeführt wird. Das SAM ist grundsätzlich in der Lage, neben der Aufgabe der Segmentierung auch die Aufgabe der Klassifizierung zu übernehmen. In Bezug auf diese Aufgabe sind VFMs sehr stark von initialen Trainingsdaten abhängig, welche in der Regel nur ausgesprochen wenige industrielle Daten beinhalten. Forschungsarbeiten, welche sich bemühen, VFMs für industrielle Umgebungen durch Fine-Tuning anzupassen (z. B. in [444]), sind vielversprechend. Bislang liefern sie allerdings weder ausreichende Genauigkeit noch die notwendige Generalisierungsfähigkeit für die hier betrachteten domänenspezifischen Defekte. Zudem ist davon auszugehen, dass bei der Prüfung von sicherheitskritischen Bauteilen die Ergebnisse einer automatisierten Klassifizierung ohnehin von einem Menschen überprüft und freigegeben werden müssen, wodurch potenzielle Effizienzgewinne wiederum reduziert werden.

Gemeinsam bilden die bildliche und textuelle Annotation, die Defektlokalisierung sowie die Defektsegmentierung das Dokumentationswerkzeug, welches mit dem Fokus auf Oberflächenfehler entwickelt und evaluiert wurde. Damit ist das **zweite Teilziel** des Informationseingabemoduls in Abbildung 2.16 erfüllt.

Im Rückblick auf die in Abbildung 3.3 dargestellten **Praxisdefizite** kann die hier vorgestellte Anwendung durch ihren durchgängig digitalen Ansatz vor allem die Probleme lösen, die aus der bisherigen papierbasierten Dokumentation resultieren. Zum einen können durch die Anbindung der Anwendung an Systeme wie CAQ oder MES Medienbrüche vollständig vermieden werden. Zum anderen werden Reaktionszeiten verkürzt, da Prüfergebnisse unmittelbar nach der Erfassung allen Mitarbeitenden zur Verfügung gestellt werden können. Das Praxisdefizit der unstrukturierten und personenabhängigen Dokumentation (Abschnitt 3.3.1) steht dabei in direktem Zusammenhang mit dem aufgezeigten Theoriedefizit der fehlenden Dokumentationswerkzeuge für Oberflächendefekte (Abschnitt 2.2.3.2). Dafür bietet die Anwendung weiter die Möglichkeit, über Auswahlfelder und Schlagworte (Tags) die Vielfalt möglicher Defektbeschreibungen deutlich zu reduzieren und

damit die Dokumentation zumindest teilweise zu vereinheitlichen. Gleichzeitig ermöglichen Freitextfelder komplexere Problembeschreibungen, sodass die Expertise des Personals weiterhin aktiver Bestandteil der Dokumentation bleibt.

5 Entwicklung des Umwelterfassungsmoduls für das modulare, multi-modale Prüfmitteltracking

Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines Tool Tracking-Moduls für Prüfmittel in der geometrischen Prüfung. Das Modul repräsentiert innerhalb des Assistenzsystems nach dem HAAT-Modell (Abschnitt 2.2.2) die Komponente der Umwelterfassung. Das Modul dient primär der sensorischen Assistenzfunktion der Kontexterfassung (Abbildung 2.7) und befähigt so zu weiteren Assistenzfunktionen. Da es keine direkte Interaktion mit Nutzenden für iterative Feedbackschleifen erfordert, wird der in Abbildung 2.17 dargestellte Entwicklungszyklus – anders als in Kapitel 4 – nur einmal durchlaufen. Die Kapitelgliederung folgt den Phasen dieses einmaligen Durchlaufs:

- Im Abschnitt 5.1 werden die Nutzungsanforderungen spezifiziert. Dies umfasst sowohl die Definition eines Referenzprozesses für die geometrische Prüfung als auch die darauf aufbauende Ableitung von Funktionsbausteinen und entsprechenden Methoden zu deren Evaluierung.
- Die Entwicklung der definierten Funktionen ist das Ziel des Abschnitts 5.2. Hier wird ein übergreifender Entwicklungsprozess vorgestellt und durchlaufen, indem sowohl die Sensoren, Lokalisierungsverfahren und Marker ausgewählt als auch für ihre Nutzung in der Tool Tracking-Applikation vorbereitet werden. Dieser Arbeitsschritt hat zum Ziel, eine Applikation zur Messmittellokalisierung zu entwickeln.
- Im Abschnitt 5.3 wird die Applikation in einem industrienahen Versuchsfeld eingesetzt, wissenschaftlich untersucht und evaluiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den erreichbaren Genauigkeiten in Szenarien mit teilweiser Sensorokklusion.
- Zum Abschluss des Kapitels werden im Abschnitt 5.4 zunächst die Ergebnisse zusammengefasst, deren Grenzen diskutiert und erläutert, inwieweit die theoretischen und praktischen Defizite mit diesem Modul behoben werden können.

5.1 Festlegen der Nutzungsanforderungen

In diesem Abschnitt werden die konzeptionellen Grundlagen für den weiteren Entwicklungsprozess gelegt. Dabei wird zunächst ein Referenzprozess für die geometrische Prüfung definiert, anhand dessen sich sowohl die Ableitung von Anforderungen als auch von geeigneten Evaluierungsmethoden anschließt.

5.1.1 Definition eines Referenzprozesses

Im Gegensatz zu den Erläuterungen zur Sichtprüfung im Abschnitt 4.1.1 gestaltet sich die Festlegung von generellen Tätigkeiten im Zusammenhang mit geometrischen Prüfungen als sehr umfangreich. Im Abschnitt 2.1.1.2 wurden bereits die Kerncharakteristika der geometrischen Prüfung beschrieben; für eine tiefergehende Betrachtung sei auf Standardliteratur aus dem Bereich der Fertigungsmesstechnik verwiesen [148].

Der generelle Ablauf einer geometrischen Prüfung lässt sich aber ebenfalls unabhängig von der konkreten Tätigkeit beschreiben (Abbildung 5.1). Er fächert den entsprechenden Unterprozess aus Abbildung 3.4 auf.

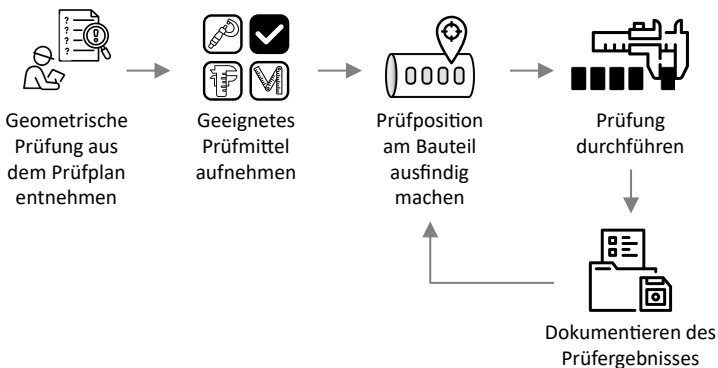


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Referenzprozesses zur Durchführung einer Sichtprüfung.

Die geometrische Prüfung beginnt mit der Auswahl eines geeigneten Prüfmittels aus den im Prüfplan definierten Optionen. Die Verfügbarkeit und der Einsatz der Prüfmittel hängen auch mit den Gegebenheiten am Prüfplatz und der Mitbenutzung durch andere Personen zusammen (Abschnitt 3.1.2). Nach der Aufnahme

des Prüfmittels identifiziert der Prüfende die vorgesehene Prüfposition am Bauteil, welche durch technische Zeichnungen spezifiziert ist. An dieser Position führt der Prüfende die Messung gemäß der festgelegten Prüfanweisung (Bezugsdokument) durch. Die Ergebnisse der Prüfung werden systematisch im Prüfprotokoll dokumentiert. Dieser Prozess wiederholt sich für jede Prüfposition, die einem Prüfschritt zugeordnet ist, um eine vollständige Evaluation der geometrischen Merkmale des Bauteils zu gewährleisten.

5.1.2 Ableitung von Anforderungen und Festlegung von Evaluierungsmethoden

Aus dem oben beschriebenen Referenzprozess ergeben sich Anforderungen an das Modul zur Umwelterfassung (Tabelle 5.1). Da dieses Modul nur Kontextinformationen erfasst, hat es keinen direkten Einfluss auf den Prozess. Es kann jedoch als Basisinformation für eine Vielzahl weiterer Assistenzfunktionen dienen, die einen direkten Einfluss auf den Prozess haben. Diese Anwendungen stellen keinen wissenschaftlichen Beitrag dar, haben aber dennoch eine praktische Relevanz. Sie werden daher im Rahmen der Diskussion im Abschnitt 5.4 aufgegriffen.

Ziel des Tool Trackings ist es, das Messmittel nach der Aufnahme durch den Prüfenden (Abbildung 5.1) im Prüffeld räumlich zu verfolgen. Entscheidend ist letztlich, dass das Messmittel an jeder vorgesehenen Prüfposition im Rahmen der vorgegebenen Genauigkeiten lokalisiert werden kann.

Nach den Ergebnissen der Forschungsanalyse zeigte sich ein Defizit aktueller Tool Tracking-Lösungen in Bezug auf die dynamischen Rahmenbedingungen der Flugzeugproduktion. Voraussetzung, um diese Dynamik adressieren zu können, ist die **Einbindung mehrerer Sensoren für das Tracking** (AF 1), welche entsprechend den Anforderungen einer individuellen Prüfsituation modular integriert, kalibriert und referenziert werden müssen. Darauf baut der zentrale Forschungsgegenstand dieses Kapitels auf, der durch die Funktion zur **Posenschätzung eines Messmittel-TCP auf Basis multi-modaler Sensoren** (AF 2) beschrieben wird.

Das aus der Zusammenführung der sensorbasierten Lokalisierungsverfahren resultierende Tool Tracking muss zur Schließung der Forschungslücke erprobt werden. Die erreichbare **Genauigkeit** (AF 2.3) der Applikation stellt die wesentliche nicht-funktionale Anforderung dar. Die Besonderheit in dieser Arbeit ist, dass bei der Evaluierung nicht nur Kennzahlen zur Genauigkeit unter Idealbedingungen erhoben werden, sondern auch Okklusionsszenarien berücksichtigt werden. Okklu-

sion ist die Hauptherausforderung bei großflächigen Prüfstationen in der Flugzeugproduktion, weshalb die Applikation in der Lage sein muss, auch bei Abschattung einer Teilmenge der verfügbaren Sensoren zuverlässige Ergebnisse zu liefern. Zur genaueren Untersuchung dieser Szenarien findet eine Evaluierung der Leistungsfähigkeit der Tool Tracking-Applikation unter Verwendung von Boxplots statt.

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Typ
1 Einbindung verschiedener Sensormodalitäten für das Tracking			
1.1	Modulare Integration	Die Applikation ermöglicht die modulare Einbindung verschiedener Sensormodalitäten und darauf aufbauenden Lokalisierungsverfahren als Informationsquelle für das Tracking.	Funktional
1.2	Kalibrierung und Referenzierung	Die Applikation kann sowohl die Kalibrierung als auch räumliche Beziehungen der Sensoren hinterlegen.	Funktional
2 Posenschätzung eines Messmittel-TCP auf Basis multi-modaler Sensoren			
2.1	Modellierung von Unsicherheiten	Die Applikation bietet Werkzeuge, welche die Abbildung von sensorspezifischen Unsicherheiten erlauben.	Funktional
2.2	Zusammenführung vers. Lokalisierungsverfahren	Die Applikation kann unter Berücksichtigung der Unsicherheiten eine Pose aus allen verfügbaren Lokalisierungsverfahren berechnen.	Funktional
2.3	Genauigkeit	Die Applikation ermöglicht eine für den Anwendungsfall ausreichende Genauigkeit zur Bestimmung des Messmittel-TCP.	Nicht funktional

Tabelle 5.1: Übersicht der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an die Applikation zur Umwelterfassung in geometrischen Prüfungen.

Neben der Tool Tracking-Applikation und deren Erprobung stellt in diesem Kapitel auch der vorgestellte **Entwicklungsprozess** einen wesentlichen Beitrag dieser Arbeit dar. Ziel des Prozesses ist es, das bestehende Forschungsdefizit in Bezug auf die begrenzte Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Arbeitsplätze zu adressieren (Abbildung 2.16). Der Prozess wird exemplarisch anhand eines An-

wendungsfalls aus der Flugzeugproduktion durchgeführt. Er ist grundsätzlich darauf ausgelegt, auch in anderen Szenarien mit vergleichbaren Herausforderungen – wie großen Arbeitsvolumina, potenziellen Okklusionen und der Integration unterschiedlicher Sensortechnologien – eine strukturierte Herangehensweise zu bieten. Er fokussiert dabei insbesondere auf die methodische Auswahl, Kalibrierung, Referenzierung und Fusion verschiedener Sensormodalitäten sowie auf die systematische Charakterisierung von Unsicherheiten. Eng damit verknüpft sind die im Prozess verankerten Anforderungen an eine flexible Softwarearchitektur zur modularen Sensoreinbindung, die eine aufwandsarme Entwicklung und Adaption der Tool Tracking-Applikation ermöglichen. Die Anwendbarkeit des nachfolgend vorgestellten Entwicklungsprozesses ist gegeben, sofern die Umgebungsbedingungen eine valide experimentelle Sensorcharakterisierung zulassen. Während der Prozess die Auswahl und Integration von Sensorfusionsalgorithmen methodisch vorbereitet, bleibt deren detaillierte, anwendungsspezifische Optimierung ein nachgelagerter Schritt.

5.2 Entwicklung eines modularen, multi-modalen Tool Trackings

Für die Entwicklung der modularen, multi-modalen Applikation zum Tool Tracking wird ein mehrstufiger, sukzessiver Entwicklungsprozess vorgestellt. Dieser ist in Abbildung 5.2 dargestellt und gliedert sich in: Anwendungsfall- und sensorspezifische Prozesse sowie das Tool Tracking selbst. Diese drei Hauptprozesse dienen auch als Gliederung für diesen Abschnitt, daher werden sie im Folgenden näher erläutert.

Da im Gegensatz zur bisherigen Literatur die entstehende Tool Tracking-Applikation auch auf andere Anwendungsfälle adaptierbar sein soll, werden die initialen **anwendungsspezifischen Prozesse** ① (Abbildung 5.2) miteinbezogen. Diese umfassen die Auswahl geeigneter Sensoren, der damit verbundenen Lokalisierungsverfahren sowie ggf. die Auswahl und Integration von Markern (Tags), die zur Implementierung der ausgewählten Sensorsysteme notwendig sind. Das Ergebnis sind die ausgewählten Sensorsysteme sowie eine modifizierte Arbeitsumgebung (z. B. mit Markern) und Prüfmittel (z. B. mit Retroreflektoren).

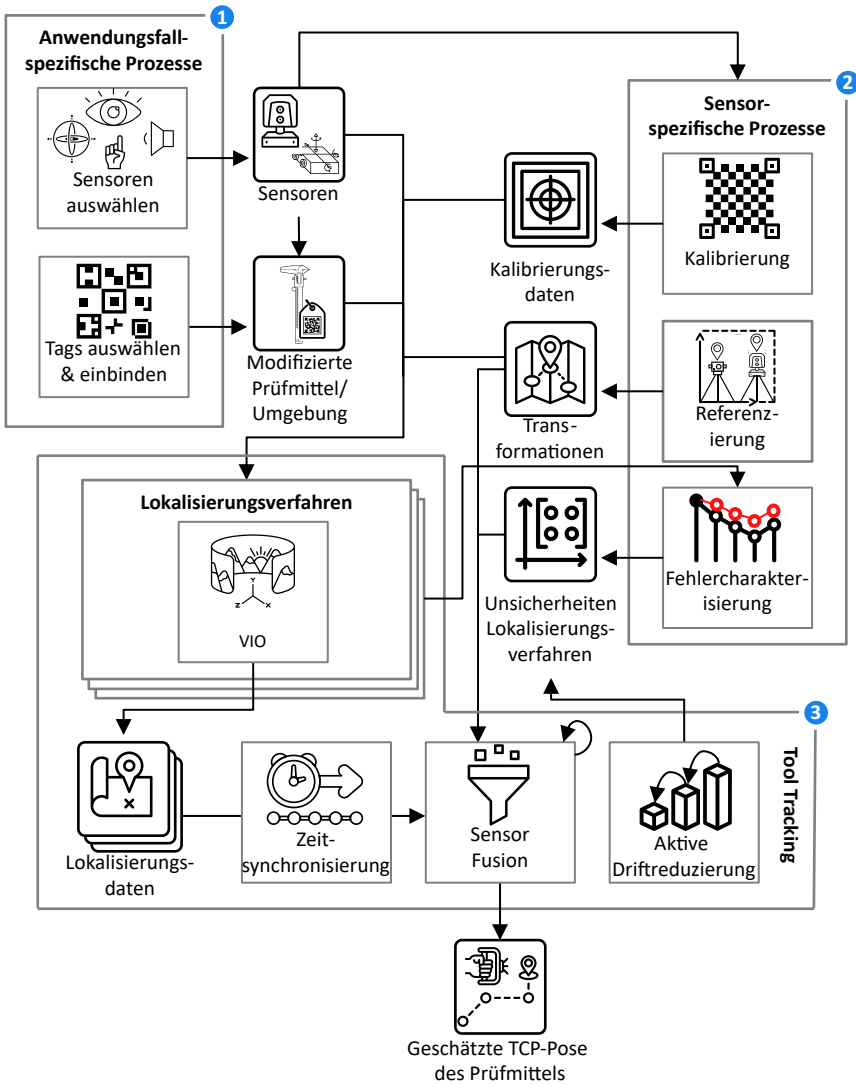


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung des Prozesses für die Entwicklung einer modularen, multi-modalen Tool Tracking-Applikation.

In Abhängigkeit des vorangehenden Schritts folgen die **sensorspezifischen Prozesse** ② (Abbildung 5.2). Hierbei sind die entsprechenden Sensoren gemäß ihrem

Funktionsprinzip zu kalibrieren, in der Arbeitsumgebung zu referenzieren sowie deren Rauschen und Messunsicherheiten zu bestimmen. Hierbei ist zu beachten, dass die Referenzierung prinzipbedingt von Outside-In- bis Inside-Lokalisierungsverfahren jeweils zu statischen oder dynamischen Ortsbezügen der jeweiligen Systeme innerhalb eines Weltkoordinatensystems führt. Ebenso individuell ist die Fehlercharakterisierung der Sensoren. Für ein multi-modales System ist die Bestimmung der zeitlich-räumlichen Unsicherheiten über Sensorcharakterisierungen von besonderer Bedeutung, da die so ermittelten Kovarianzen eine zentrale Eingangsgröße für Sensorfusionsmethoden darstellen.

Die beiden zuvor beschriebenen Prozesse bilden die Grundlage für das eigentliche Tool Tracking, das sich wiederum in eine interne Prozesskette gliedert. Während die anwendungsfall- und sensorspezifischen Prozesse zur Vorbereitung dienen und somit vom Prüfprozess entkoppelt sind, finden die Prozesse des **Tool Trackings** ⑤ (Abbildung 5.2) während der Prüfausführung statt.

Dabei werden die zur Verfügung stehenden Sensorsysteme und Modalitäten als Basis für die Implementierung verschiedener Lokalisierungsverfahren genutzt (z. B. VIO). Anzustreben ist eine Kombination von Lokalisierungsverfahren, deren Stärken die jeweiligen Schwächen ausgleichen und eine kontinuierliche Lokalisierung des Prüfmittels in allen Situationen ermöglichen.

Die einzeln erhobenen Lokalisierungsdaten der jeweiligen Verfahren müssen dann in einen zeitlichen Kontext zueinander gesetzt werden, was durch eine Zeitsynchronisation realisiert werden kann. Die zeitsynchronisierten Messwerte werden anschließend innerhalb der Sensorfusion meist mit probabilistischen Verfahren (z. B. Bayes-Filter) zu einer Schätzung der Prüfmittelposition bzw. des TCPs des Prüfmittels weiterverarbeitet.

Eine Besonderheit der hier vorgestellten Applikation und eine Innovation gegenüber dem bisherigen Stand der Forschung im Bereich des Tool Trackings stellt die *aktive Driftreduzierung* dar. Wie im Abschnitt 2.2.3.4 gezeigt, erscheint die Inside-Out-Lokalisierung mit IMUs und visuellen Methoden bzw. deren Kombination VIO als bisher einzige Alternative für eine lückenlose Lokalisierung bei Okklusion. Diese Verfahren unterliegen einem natürlichen Driftverhalten, welches in der Literatur bisher nicht gezielt adressiert wurde. Daher wird hier eine Möglichkeit zur Reduzierung des akkumulierten Fehlers durch eine regelmäßige dynamische Neureferenzierung vorgeschlagen. Da der akkumulierte Fehler modellhaft in der Kovarianz hinterlegt ist, muss diese, wie in Abbildung 5.2 gezeigt, im Anschluss an die Driftreduzierung angepasst werden, um die Sensorfusion nicht zu verfälschen.

5.2.1 Anwendungsfallsspezifische Prozesse

5.2.1.1 Beschreibung des für die Entwicklung genutzten Anwendungsfalls

Zur Veranschaulichung des Entwicklungsprozesses wird ein exemplarischer Anwendungsfall aus der Flugzeugproduktion herangezogen. Dabei handelt es sich um geometrische Prüfungen an einer Flugzeughecksektion, die bereits Gegenstand der Analyse im Abschnitt 3.1 war.

Die Struktur des Prüflings besteht aus mehreren Schalenbauteilen als Außenhaut, die durch eine Kombination von Stringern, Spanten und Nieten als Verbindungselemente zusammengehalten werden. In die Struktur ist eine Wartungsklappe für MRO-Arbeiten an der Auxiliary Power Unit (APU) integriert. Der Prüfling hat einen maximalen Durchmesser von ca. 2 m, einen minimalen Durchmesser von ca. 0,75 m und eine Länge von ca. 3,5 m. Zur Messung der Prüfmerkmale wird ein Laserlinienscanner in verschiedenen Konfigurationen eingesetzt (Abbildung A.6), der die Messwerte aus den aufgenommenen Punktwolken extrahiert.

Die betrachtete Prüfaufgabe an diesem Bauteil ist die Spalt- und Stufenmessung entlang verschiedener Fugen zwischen den Schalenbauteilen. Hierbei sind die Prüfpositionen mit einem minimalen Abstand von 10 cm zueinander im Prüfplan definiert. Der manuelle Prozess ist dabei besonders anfällig für die in Abschnitt 3.3.1 dargelegten prozessualen Schwachstellen. Speziell bei dieser Aufgabe, bei der kein visuelles Merkmal die nächste Soll-Position markiert, entsteht das hohe Risiko von Zuordnungsfehlern: Der Prüfende schätzt die nächste Messposition typischerweise relativ zur vorhergehenden, wodurch sich Schätzfehler über die lange Distanz der einzelnen Fugen aufsummieren. Diese anspruchsvolle Schätzung wird zusätzlich erschwert, da der Prüfablauf für die manuelle, papierbasierte Dokumentation nach jeder einzelnen Messung unterbrochen werden muss. Die aus diesen ständigen Unterbrechungen resultierende hohe kognitive Last und der intransparente Messfortschritt begünstigen zudem redundante Messungen am selben Prüfpunkt.

Die primäre Anforderung an ein Assistenzsystem ist es daher, diese Fehlerquellen zu eliminieren. Die technologische Grundlage hierfür schafft ein Tool Tracking, das eine absolute Positionsbestimmung des Prüfmittels vornimmt. Auf Basis dieser Positionsdaten können dann übergeordnete Assistenzfunktionen die Einhaltung des Messrasters sichern, eine automatische Zuordnung der Messwerte zur korrekten Messposition gewährleisten und redundante Messungen durch eine digitale Statusverfolgung eliminieren.

Aus diesem Anwendungsfall lässt sich die notwendige Systemgenauigkeit direkt ableiten: Der maximal zulässige Lokalisierungsfehler muss kleiner als die Hälfte des minimalen Abstandes zwischen zwei Prüfpunkten sein. Für den hier beschriebenen Anwendungsfall wird daher eine Genauigkeitsanforderung von 5 cm als maximal zulässiger Fehler definiert.

5.2.1.2 Auswahl und Einbindung der Sensoren, der Lokalisierungsverfahren und der Marker

Basierend auf dem vorgestellten Anwendungsfall werden in diesem Abschnitt geeignete Sensoren, Lokalisierungsverfahren und Marker zur Realisierung eines Tool Trackings ermittelt. Die im vorherigen Abschnitt hergeleitete Genauigkeitsanforderung von 5 cm dient dabei als zentrales Auswahlkriterium. Die Genauigkeitsanforderung ist entscheidend, da sie direkt die notwendige Leistungsfähigkeit – und damit die Kosten – der einzusetzenden Hardware bestimmt. Höhere Genauigkeitsanforderungen erfordern beispielsweise Kameras mit höherer Auflösung oder andere Lokalisierungsverfahren, was in der Regel direkt mit höheren Kosten korreliert. Die Technologieauswahl zielt daher darauf ab, die geforderte Genauigkeit wirtschaftlich und technisch adäquat zu realisieren.

Aus den Analysen im Abschnitt 2.2.3.4 ergibt sich ein Spektrum von Lösungsansätzen. Da in diesem Kapitel das multi-modale Tracking und damit die Kombination verschiedener Ansätze im Vordergrund steht, werden sowohl Outside-In- als auch Inside-Out-Verfahren betrachtet.

Beim **Outside-In-Tracking** erreichen Systeme, die auf Infrarotmarkern am Bauteil basieren, bisher die höchsten Genauigkeiten. Allerdings sind diese auch deutlich kostenintensiver, insbesondere wenn mehrere Kameras zur Adressierung der Abschattungen eingesetzt werden. In [287] zeigen markerbasierte Lokalisierungsverfahren mit handelsüblichen, kostengünstigen Kameras Genauigkeiten im gewünschten Bereich. Als Outside-In-Lösungsansatz werden deshalb Kamerasysteme gewählt, die Marker auf dem Prüfmittel verfolgen. Für den Anwendungsfall werden die Kameras *D435i* [445] sowie *D455* [446] von *Intel* eingesetzt.

Für das **Inside-Out-Tracking** im Kontext der Werkzeugverfolgung werden in der Literatur bisher ausschließlich IMUs verwendet. Allerdings sind IMUs allein sehr anfällig für Drift und Beschleunigungsspitzen, wodurch die gewonnenen Informationen bei kleinen Genauigkeitsbereichen schnell unzuverlässig werden. Da unter der Annahme auftretender Abschattung der Outside-In-Systeme die Informa-

tion des Inside-Out-Systems an Bedeutung gewinnt, wird im Rahmen dieser Arbeit erstmalig die Verwendung eines VIO-Ansatzes vorgeschlagen. Durch die zusätzliche visuelle Modalität neben der IMU können die Signale des Inside-Out-Systems stabilisiert und damit robuster gehalten werden. Dieser Ansatz ist inspiriert von Lösungsansätzen aus der mobilen Robotik mit vergleichbaren Problemstellungen.

Neben der potenziellen Verbesserung des Trackings ermöglicht die Kamera am Werkzeug die Erfassung von Markern im Arbeitsraum als zusätzliches Lokalisierungsverfahren. Für diesen Zweck sind weitere Marker an der Werkstückaufnahme vorgesehen. Darauf aufbauend wird eine Methode zur aktiven, markerbasierten Driftreduzierung des VIO-Verfahrens eingeführt, welche in Abschnitt 5.2.3.2 näher erläutert wird. Für das Basis-Lokalisierungsverfahren des VIO wird auf die etablierte Off-the-Shelf-Lösung *Intel T265* [447] zurückgegriffen. Im Vergleich zu anderen auf dem Markt erhältlichen Systemen liefert diese laut einer Studie [448] die besten Ergebnisse. Die oben beschriebenen Sensoren, ihre Eigenschaften sowie die ausgewählten Lokalisierungsverfahren sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Eigenschaft	D435i	D455	T265
Tracking-Methode	Outside-In-Tracking		Inside-Out-Tracking
Sensormodalitäten	RGB-D	RGB-D	Monochrome Stereokameras, IMU
Lokalisierungsverfahren	Marker-Tracking	Marker-Tracking	VIO, Marker-Lokalisierung (Driftreduzierung)
Kameraauflösungen	RGB: 1920×1080	RGB: 1280×800	848×800
Frequenzen [Hz]	RGB: 30	RGB: 30	Kameras: 30, IMU: 200

Tabelle 5.2: Darstellung der gewählten Kamerasysteme, deren Eigenschaften sowie der Lokalisierungsmethoden und -verfahren basierend auf [445], [446], [447].

Die Verwendung von **Markern** im Zusammenhang mit der Lokalisierung wurde in 4.4.1.1 ausführlich behandelt. Im Gegensatz zur Anwendung im Rahmen der Sichtprüfung ergibt sich für den Einsatz innerhalb des Tool Trackings jedoch ein anderer Markertyp als favorisiert. Da durch die freie Bewegung des Werkzeugs im Raum mit entsprechender Bewegungsunschärfe, teilweise verdeckten Markern so-

wie erhöhten Winkeln zwischen Kamera und Marker zu rechnen ist, sind nach derzeitigem Stand der Forschung AprilTags gegenüber ArUco-Markern zu bevorzugen [411], [449], [450]. Da hier eine isolierte Betrachtung der Umwelterfassungskomponente ohne Berücksichtigung der Ergebnisse der Informationseingabekomponente erfolgt, wird der Aspekt der Harmonisierung auf einen Markertyp nicht weiter diskutiert. Es ist jedoch sinnvoll, dies im Rahmen einer Industrialisierung und Integration zu einem Gesamtsystem zu betrachten.

Um den zuvor vorgestellten Markertyp zur Lokalisierung nutzen zu können, muss eine **Einbindung der Marker in die Umgebung und das Prüfmittel** erfolgen. Auf Basis des im Anwendungsfall verwendeten Prüfmittels wird ein Versuchskörper entwickelt, dessen Abmessungen sich an denen des Grundkörpers des Prüfmittels orientieren. An diesem in Abbildung A.7 dargestellten Versuchskörper wird seitlich jeweils ein AprilTag angebracht, während an der Vorderseite die mobile Kamera integriert wird. Der TCP des Prüfmittels ergibt sich im Anwendungsfall aus dem geometrischen Mittelpunkt der Laserlinie auf dem Bauteil. Der Abstand zwischen Prüfling und Prüfmittel wird durch verschiedene Anbaumodule konstant gehalten. Diese Anbaumodule sind im Anhang dargestellt (Abbildung A.6a, Abbildung A.6b). Zur Vereinfachung der Evaluierung in Abschnitt 5.3, bei der dieser Versuchskörper verwendet wird, bildet eine „Messspitze“ (weißer Körper in Abbildung A.7) diesen TCP am Versuchskörper nach. Die Integration der beschriebenen Sensoren und Marker im Anwendungsfall ist in Abbildung 5.3 veranschaulicht.

5.2.2 Sensorspezifische Prozesse

5.2.2.1 Kalibrierung und Referenzierung

Für die ausgewählten Sensoren entfällt der erste Schritt der **Kalibrierung** zur Bestimmung der intrinsischen Kameraparameter sowie für die IMU, da diese ab Werk kalibriert sind und die entsprechenden Parameter dem Datenblatt entnommen werden können.

Für die **Referenzierung** der Sensoren wird zunächst zwischen mobilen (Inside-Out) und statischen (Outside-In) Systemen und Markern differenziert. Bei den statischen Komponenten empfiehlt es sich, die verschiedenen Systeme mit einem hochgenauen Messgerät zueinander zu vermessen. Dabei kann ein an bekannter Stelle auf der Vorrichtung angebrachter Marker dazu dienen, den Bezug zum Bau-

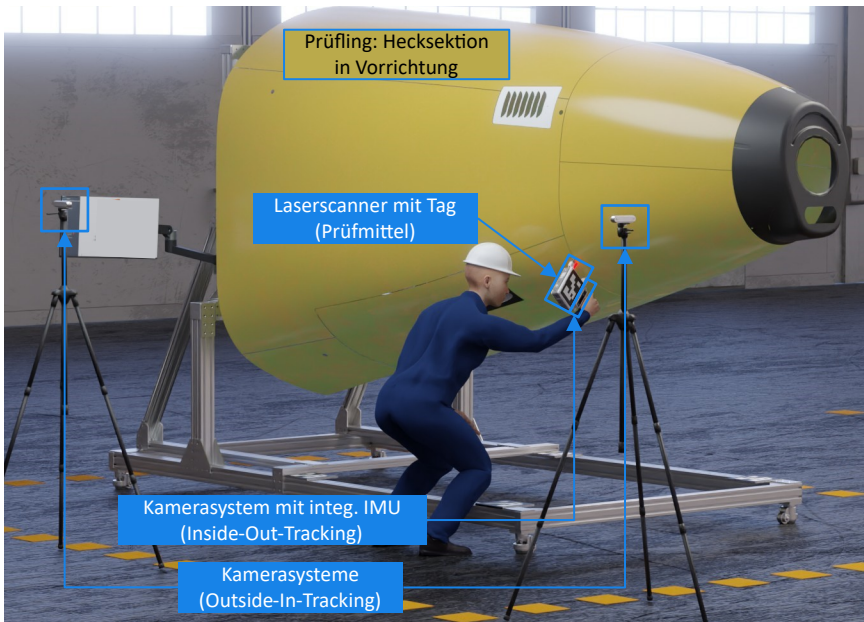
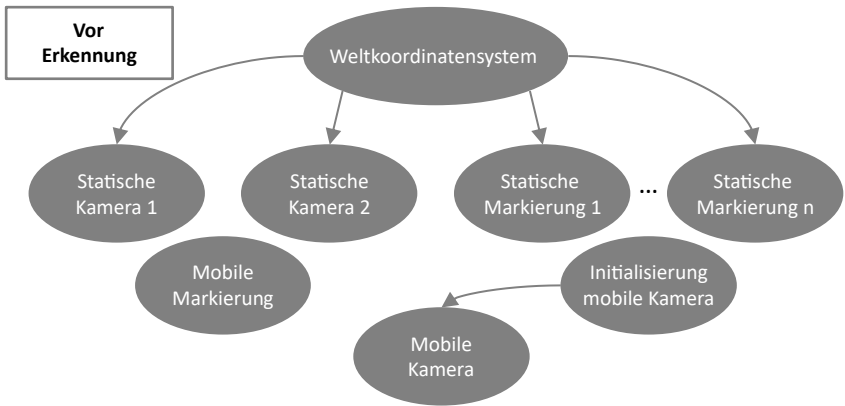


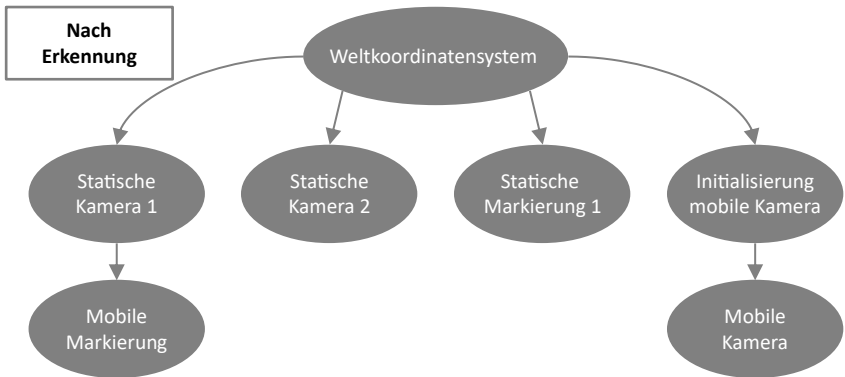
Abbildung 5.3: Rendering-basierte Darstellung der im Anwendungsfall verwendeten Sensoren und Marker sowie des Prüfmittels.

teilkoodinatsystem herzustellen. Sind alle Bezüge hergestellt, ist es vorteilhaft, das Weltkoordinatensystem entlang des Bauteilkoodinatsystems festzulegen, da in diesem in der Regel die Prüfmerkmale und damit die für das Tool Tracking relevanten Koordinaten definiert sind. Ist dieser Prozess erfolgreich, entsteht ein Transformationsbaum, der im Prinzip der Struktur von Abbildung 5.4a folgt.

Um auch die mobilen Elemente (Marker und Kamera) zu referenzieren, werden die eingemessenen statischen Kamerasysteme verwendet. Die mobile Kamera hat nach dem Start nur ihren Initialisierungspunkt als Referenz, wie in Abbildung 5.4a gezeigt, der das Weltkoordinatensystem der mobilen Kamera darstellt. Dieser fehlende Bezug zur globalen Referenz wird als „Wake-up-Robot-Problem“ bezeichnet (ähnlich zum „Kidnapped-Robot-Problem“). Im Falle des Tool Trackings kann dieses Problem gelöst werden, indem ein mobiler Marker am Werkzeug erfasst wird. Da sowohl die mobile Kamera als auch der Marker am Werkzeug befestigt sind, kann ihre Beziehung über eine statische Transformation beschrieben werden. Wird ein mobiler Marker erfasst, kann dieser über die statische Kamera im Weltkoordinatensystem referenziert werden und die Information kann zur Rückrechnung des



(a) Schematische Darstellung des Transformationsbaums nach Einmessung der statischen Kamera(s) und Marker.



(b) Schematische Darstellung des Transformationsbaums nach erfolgreicher Erfassung einer Werkzeugmarkierung.

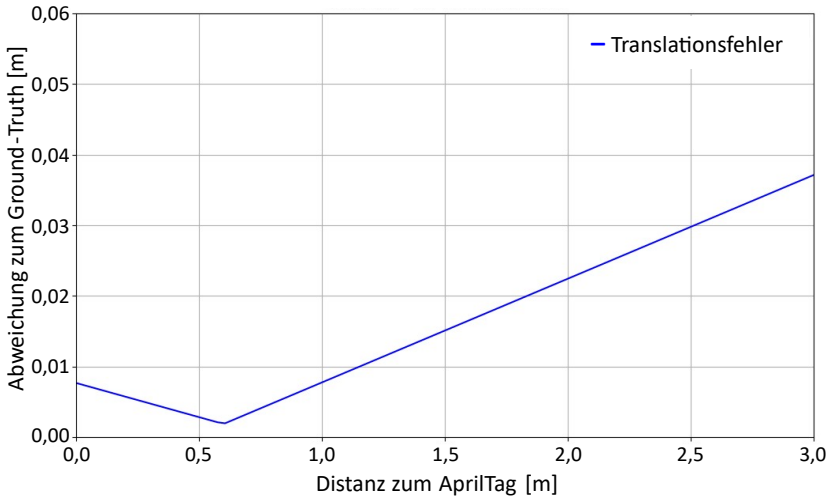
Abbildung 5.4: Transformationsbäume vor und nach der erstmaligen Erkennung eines Markers am Werkzeug.

Initialisierungspunktes der mobilen Kamera verwendet werden. Alternativ kann sich die mobile Kamera durch die Erfassung eines statischen Markers im Weltkoordinatensystem selbst initialisieren. Damit ist die Referenzierung der Systeme abgeschlossen und es entsteht ein vollständiger Transformationsbaum wie in Abbildung 5.4b.

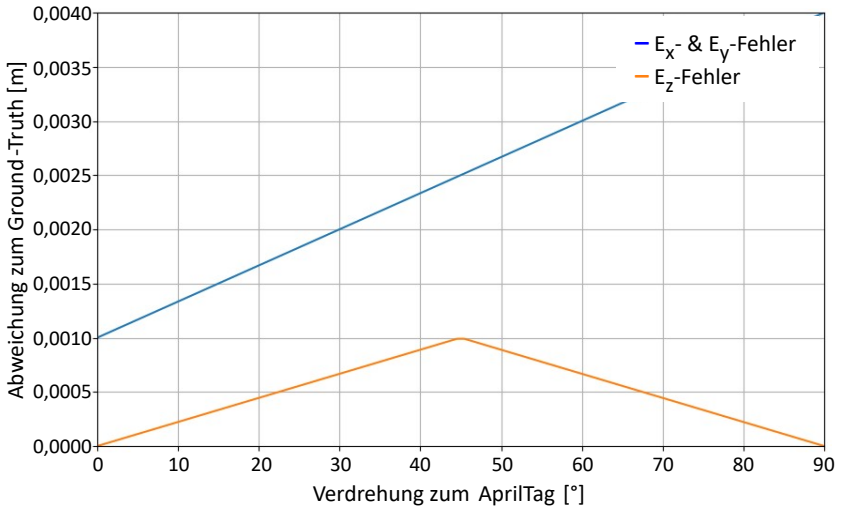
5.2.2.2 Fehlercharakterisierung der Lokalisierungsverfahren der Sensoren

Die Fehlercharakterisierung bildet die Grundlage für das Verständnis des Verhaltens der Sensoren bzw. ihrer Lokalisierungsverfahren innerhalb der Tool Tracking-Applikation. Die Gewinnung dieser Informationen ist entscheidend für die Anwendung des Sensorfusionsansatzes. Für die Charakterisierung wird ein experimenteller Ansatz gewählt, um die dynamischen Bedingungen während des Tool Trackings nachzubilden und darauf aufbauend die erfassten Abweichungen modellieren zu können. Dabei werden die Sensoren separat betrachtet und in Abhängigkeit der zugeordneten Lokalisierungsverfahren spezifische Experimente durchgeführt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Implementierung der in den Experimenten verwendeten Lokalisierungsverfahren sowie die Einbindung des Ground Truth-Systems erst im Abschnitt 5.2.4 näher erläutert wird.

Zunächst wird die AprilTag-Lokalisierung der statischen Kameras betrachtet. Die Genauigkeit dieses Lokalisierungsverfahrens hat zwei wesentliche Einflussgrößen, die experimentell leicht erfasst werden können: der Abstand des AprilTags zur Kamera und die Verdrehung des AprilTags zur Kamera. Es ist davon auszugehen, dass mit zunehmendem Abstand und zunehmender Verdrehung die Lokalisierungsgenauigkeit abnimmt. Um diesen Zusammenhang zu quantifizieren, wird folgendes Experiment durchgeführt: Eine Platte wird mit einem AprilTag sowie mit Infrarot-Tags des in Abschnitt 4.5.1 verwendeten OptiTrack-Systems versehen. Das OptiTrack-System dient auch in diesem Experiment als Ground Truth-System. Anschließend wird der Abstand der Platte von 20 cm bis 2 m in 20 cm Schritten vergrößert und die Abweichungen der AprilTag-Lokalisierung zum Ground Truth-System bestimmt. Analog dazu wird die Rotation der Platte zur Kamera bei einem festen Abstand von 60 cm ($15^\circ - 90^\circ$, in 15° -Schritten) manipuliert. Aus den so erhaltenen Ergebnissen können vereinfachte, lineare Beziehungen für den Translationsfehler t_{err} sowie für die Rotationsfehler E_x, E_y, E_z ermittelt werden. Da für die beiden statischen Kameras trotz unterschiedlicher Auflösungen nur vernachlässigbar kleine Unterschiede (Submillimeterbereich) in diesen Experimenten festgestellt werden konnten, erfolgt eine Ableitung der linearen Beziehungen aus den gemittelten Ergebnissen beider Kameras (Abbildung 5.5a, Abbildung 5.5b).



(a) Ergebnisse der Experimente zum Translationsfehler für die statischen Kameras.



(b) Ergebnisse der Experimente zum Rotationsfehler für die statischen Kameras.

Abbildung 5.5: Experimentell ermittelte Fehlercharakteristika der AprilTag-Lokalisierung der statischen Kameras.

Für die mobile Kamera wird eine identische Versuchsreihe zur Lokalisierung mittels AprilTags durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Anhang in Abbildung A.8 dargestellt. Für die Lokalisierung auf Basis von VIO wird im Datenblatt der Intel T265 für die Genauigkeit des Verfahrens ein kumulativer Fehler von weniger als 1% bezogen auf die zurückgelegte Strecke angegeben. Diese Angaben basieren laut Hersteller Intel auf Untersuchungen, die in Büro- und Wohnumgebungen durchgeführt wurden [451]. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese Werte nicht direkt auf industrielle Einsatzgebiete übertragbar sind. In Büro- und Wohnumgebungen gibt es eine Vielzahl von visuellen Merkmalen, die für den VIO-Algorithmus entscheidend sind. Im Gegensatz dazu sind Fabrikumgebungen weitläufiger und die Merkmale liegen weiter auseinander.

Deshalb wird ein Experiment in einer Versuchshalle durchgeführt, die typische Objekte einer Fabrik (z. B. Industrieroboter, Werkzeugwagen) enthält und vergleichbare Beleuchtungssituationen aufweist. Dazu wird die Kamera in einer Halterung am TCP eines Industrieroboters (ABB IRB 6660) befestigt (Abbildung A.9a), der in diesen Experimenten als Ground Truth-System dient. Die Absolutgenauigkeit des Roboters liegt nach eigenen Messungen bei 0,5 mm und die Wiederholgenauigkeit bei 0,036 mm, was für den zu erwartenden Genauigkeitsbereich der Kamera als ausreichend angesehen werden kann. Der Versuch besteht aus dem Abfahren einer definierten Trajektorie, die sich aus 10 Punkten im Arbeitsraum des Roboters ergibt (Abbildung A.9b). Beim Abfahren der Trajektorie wird eine Strecke von 13,255 m zurückgelegt (Tabelle A.5). Die Stützpunkte der Trajektorie sind gleichzeitig auch die Messpunkte, an denen Daten erhoben werden.

Durch die so aufgenommenen Daten kann ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen abgefahrener Strecke ermittelt werden. Die Daten zeigen einen sich akkumulierenden Fehler von ca. 3% zur Strecke. Dieser ist in Abbildung A.8a als Graph dargestellt. Damit sind die Experimente zur Charakterisierung der Lokalisierungsverfahren abgeschlossen. Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass das statische Messrauschen der Sensoren im Vergleich zu den zuvor dargestellten Unsicherheiten als vernachlässigbar klein angenommen wurde und daher nicht in die Betrachtung eingeflossen ist.

5.2.3 Prozesse des Tool Trackings

Da sowohl bei der Zeitsynchronisation als auch bei den Lokalisierungsverfahren auf Ansätze aus dem Stand der Technik zurückgegriffen wird, werden diese im Rahmen der softwaretechnischen Umsetzung im Abschnitt 5.2.4 nur kurz beschrieben und hier nicht weiter vertieft. Der Fokus in diesem Abschnitt liegt folglich auf der Sensorfusion und der Driftreduzierung.

5.2.3.1 Sensorfusion

Die Sensorfusion ist das zentrale Element des Tool Trackings. Ziel der Sensorfusion ist es, die optimale Position des TCPs auf Basis der bereitgestellten Lokalisierungsdaten der einzelnen Verfahren und der berechneten Unsicherheiten zu schätzen. Zur Darstellung der einzelnen Bausteine der hier entwickelten Sensorfusion untergliedert sich dieser Abschnitt in die Bestimmung der Ausgabefrequenz sowie die Auswahl und Anpassung eines geeigneten Sensorfusionsalgorithmus an die Problemstellung des Tool Trackings.

Bestimmung der Ausgabefrequenz

Die Bestimmung der Ausgabefrequenz der Sensorfusion und damit der Tool Tracking-Applikation als solche ist notwendig, da die Quellen der Sensorfusion ihre Positionsinformationen mit unterschiedlichen Abtastraten (Frames Per Second (FPS)) liefern. Das Gesamtsystem kann auf den Sensor mit der niedrigsten FPS ausgerichtet werden. Beim Tool Tracking geht es nicht um die maximal verfügbare FPS der Sensormodalität, also z. B. des Bildes oder des Beschleunigungsvektors, sondern um die Frequenz, mit der ein Rechenknoten Daten zu einem Lokalisierungsverfahren liefern kann. Die effektive Ausgabefrequenz der Sensorfusion hängt daher von einem Zusammenspiel mehrerer Faktoren ab: Dazu zählen im Wesentlichen die Rechenintensität und Implementierungseffizienz der einzelnen Lokalisierungs- und Fusionsalgorithmen, die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Hardware (CPU, GPU) sowie die Effizienz der Datenübertragung und -synchronisation zwischen den Systemkomponenten. Aus diesem Grund ist die Bestimmung der Ausgabefrequenz erst im Rahmen der Implementierung in Abschnitt 5.2.4.4 möglich.

Auswahl eines Algorithmus für die Sensorfusion

Im nächsten Schritt wird ein geeigneter Algorithmus für das Tool Tracking ausgewählt. Ziel ist es hierbei nicht, durch umfangreiche Untersuchungen verschiedener Methoden eine optimale Lösung zu finden, sondern exemplarisch die Anpassung an das Tool Tracking aufzuzeigen. Die Auswahl des Algorithmus erhebt demnach keinen Anspruch auf Optimalität. Durch die softwaretechnische Umsetzung (Abschnitt 5.2.4) wird verdeutlicht, dass der Algorithmus letztlich nur ein austauschbares Element in der Tool Tracking-Applikation darstellt und somit bei Vorliegen eines besseren Alternativalgorithmus einfach ersetzt werden kann.

In diesem Anwendungsfall ist es entscheidend, dass die Sensorfusion zu jedem Zeitpunkt die aktuellen Unsicherheiten der einzelnen Lokalisierungsverfahren in die Schätzung einbezieht (AF 2.1), um einen optimalen Wert zu ermitteln (AF 2.2). Dabei ist zu beachten, dass auch der geschätzte Lokalisierungswert selbst mit einer Unsicherheit versehen wird. Dies gibt die Möglichkeit, die Information über den TCP des Prüfmittels als unbrauchbar einzustufen, wenn die Unsicherheit der Schätzung gewisse Mindestanforderungen verletzt.

Der Kalman-Filter erfüllt die genannten Anforderungen grundsätzlich. Durch seine Fähigkeit, Unsicherheiten in den Messdaten zu modellieren und zu verarbeiten, stellt er eine robuste Lösung zur Schätzung der Pose des Werkzeugs dar. Es handelt sich um einen rekursiven Schätzalgorithmus, der die Zustands- und Messunsicherheiten kontinuierlich aktualisiert und anpasst. Darüber hinaus ist er aufwandsarm in seiner Implementierung und liefert auch dann Schätzungen, wenn nicht alle Datenquellen zur Verfügung stehen. Zudem wird der Kalman-Filter in Arbeiten zum Tool Tracking (Abschnitt 2.2.3.4) sowie für verwandte Lokalisierungsprobleme eingesetzt [452], [453]. Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich der Kalman-Filter als Algorithmus der Sensorfusion und wird nachfolgend auf die vorliegende Problemstellung angepasst.

Anpassung des Kalman-Filters auf den Anwendungsfall des Tool Trackings

Für die Anpassung des Kalman-Filters auf den Anwendungsfall des Tool Trackings müssen zunächst die grundsätzlichen Modelle und Gleichungen entsprechend der zugrundeliegenden Rahmenbedingungen definiert werden.

Das **Zustandsmodell** für das Tool Tracking umfasst die Pose des TCP des Prüfmittels in einem dreidimensionalen Raum. Dies beinhaltet die Positionen X , Y ,

Z sowie die Rotationen ϕ , θ , ψ . Der Zustandsvektor \mathbf{x}_k zum Zeitpunkt k kann wie folgt beschrieben werden:

$$\mathbf{x}_k = \begin{pmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \\ \phi_k \\ \theta_k \\ \psi_k \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Es ist anzumerken, dass für den hier präsentierten Anwendungsfall nur die Position des TCP relevant ist und die Ausrichtung des Prüfmittels an der Prüfposition keine weitere Beachtung findet. Mögliche Anwendungsszenarien, bei denen diese Information genutzt werden könnte, werden in der Diskussion in Abschnitt 5.4 aufgegriffen.

Das **Bewegungsmodell** und die damit verbundene Zustandsgleichung beschreiben die Dynamik des Systems, also wie sich der Zustand des Systems von einem Zeitpunkt zum nächsten verändert. Da in diesem Anwendungsfall die Pose des Prüfmittels an den Prüfpositionen als angenähert konstant angenommen werden kann, wird das Bewegungsmodell vereinfacht wie folgt beschrieben:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k \quad (5.2)$$

Das **Messungsmodell** beschreibt, wie die zur Verfügung stehenden Messungen mit dem Zustand des Systems in Beziehung stehen. Dabei werden die Daten aus Lokalisierungsverfahren in Bezug zur Schätzung gestellt.

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (5.3)$$

Hierbei ist:

- \mathbf{z}_k der Messvektor zum Zeitpunkt k , der die Messungen der Sensoren enthält (z. B. Positionen $z_{X,k}$, $z_{Y,k}$, $z_{Z,k}$ und Rotationen $z_{\phi,k}$, $z_{\theta,k}$, $z_{\psi,k}$).
- \mathbf{H} die Messmatrix, die die Beziehung zwischen dem Zustand des Systems und den Messungen darstellt.
- \mathbf{v}_k der Messrauschvektor, der die Unsicherheit in den Messungen der jeweiligen Lokalisierungsverfahren mit einer Kovarianzmatrix \mathbf{R}_k beschreibt.

Neben der grundsätzlichen Definition der Modelle ist es wichtig festzulegen, wie die **Zustandsaktualisierung** des Kalman-Filters erfolgt. Um die Skalierbarkeit auf eine große Anzahl von Sensoren zu gewährleisten, wird für diesen Anwendungsfall bei der Aktualisierung auf die Berechnung einer Zustandsvorhersage verzichtet. Dieser Ansatz kann zur Einsparung von Rechenressourcen gewählt werden, jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Häufigkeit der einzelnen Messvorgänge eine kontinuierliche Aktualisierung des Zustands zulässt. Daraus folgt, dass der Kalman-Filter lediglich aus den aktuellen Messwerten propagiert wird, wodurch auch das Mitführen der im normalen Kalman-Filter enthaltenen Prozessrauschmatrix \mathbf{Q} entfällt. Die sich daraus ergebenden Elemente für die Zustandsaktualisierung werden im Folgenden erläutert.

Der Kalman-Gain \mathbf{K}_k wird berechnet, um die Gewichtung der Messungen bei der Aktualisierung des Zustands zu bestimmen:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (5.4)$$

Der aktualisierte Zustand \mathbf{x}_k wird durch Hinzufügen des gewichteten Unterschieds zwischen der tatsächlichen Messung \mathbf{z}_k und der vorhergesagten Messung $\mathbf{H}\mathbf{x}_k$ berechnet:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\mathbf{x}_k) \quad (5.5)$$

Die Unsicherheit des aktualisierten Zustands wird durch die Aktualisierung der Kovarianzmatrix \mathbf{P}_k unter Zuhilfenahme der Einheitsmatrix \mathbf{I} berechnet:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k \quad (5.6)$$

Auf diese Weise verwendet der Kalman-Filter die zur Verfügung stehenden Lokalisierungsdaten direkt zur Aktualisierung des Zustands und der Unsicherheiten ohne eine Vorhersagephase. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Modelle und Gleichungen für die Zustandsaktualisierung bilden die Grundlage für die Implementierung des Kalman-Filters innerhalb des Tool Trackings in Abschnitt 5.2.4.

5.2.3.2 Zyklische, aktive Reduzierung der Sensordrifts

In diesem Abschnitt wird eine Methode zur zyklischen, aktiven Reduzierung der Sensordrift des Inside-Out-Systems, d. h. des VIO-Verfahrens, vorgestellt. Dies steht in direktem Zusammenhang mit den angenommenen Okklusionsszenarien und ist deshalb notwendig, da in schwer zugänglichen Bereichen des Bauteils

nicht davon ausgegangen werden kann, dass die genaueren Outside-In-Systeme die Werkzeug-Tags jederzeit im Sichtfeld haben. Deswegen ist es für den Anwendungsfall wichtig, die Informationen des Inside-Out-Systems in einem nutzbaren Bereich zu halten, um eine kurzfristige Überbrückung des Ausfalls der Outside-In-Lokalisierung zu ermöglichen.

Um die Sensordrift im Rahmen eines VIO-Verfahrens für das Inside-Out-Tracking mit einer Kamera aktiv zu reduzieren, wird eine zyklische Korrektur durch die Verwendung von AprilTags implementiert. Voraussetzung hierfür ist die bereits erwähnte Anbringung eines oder mehrerer AprilTags an bekannten Positionen der Vorrichtung, wodurch der Bezug zum Bauteilkoordinatensystem hergestellt wird. Der Korrekturzyklus sieht vor, dass der Prüfende vor der Durchführung jeder Prüfung diesen AprilTag mit der am Prüfmittel angebrachten Kamera erfasst. Dies ermöglicht die Berechnung der Abweichung zwischen der aktuellen Position der VIO-Lokalisierung und der Position der AprilTag-Lokalisierung. Es wird davon ausgegangen, dass die AprilTag-Lokalisierung in allen Fällen die bessere Schätzung darstellt. Die Realisierung der Driftreduzierung erfolgt durch Manipulation des Initialisierungspunktes der Kamera, der auf Basis der berechneten Abweichung angepasst wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Drift bieten die Outside-In-Lokalisierungssysteme. Erfassen diese den Tag am Werkzeug, kann über die bekannten Transformationen ebenfalls eine Driftreduzierung erzielt werden. Für diesen Anwendungsfall mit Outside-In-Kamerasystemen ist dies jedoch weniger sinnvoll, da die Lokalisierung der Werkzeugmarker in der Regel mit einem erhöhten Abstand erfolgt und demzufolge auch einer größeren Unsicherheit unterliegt. So ist der Abstand der mobilen Kamera zu den am Bauteil befestigten AprilTags als deutlich geringer anzunehmen und die resultierende Unsicherheit der zur Korrektur verwendeten Messung kleiner. Es ist zu beachten, dass dies für andere Sensormodalitäten und Lokalisierungsverfahren nicht notwendigerweise das optimale Vorgehen verkörpert und folglich eine individuelle Bewertung erfordert.

Dieser von der mobilen Robotik inspirierte Ansatz stellt eine Neuerung im Bereich des Tool Tracking dar. Bisherige Ansätze verwenden ausschließlich IMUs, die ohne zusätzliche (visuelle) Modalität keine Driftreduzierung ermöglichen. Außerdem wird im Abschnitt 5.3 die Annahme überprüft, ob diese Methode die Unsicherheiten des VIO-Verfahrens reduzieren kann und ob die Anpassung der Kovarianzmatrix einen positiven Einfluss auf die Ergebnisse der Sensorfusion hat. Da diese Methode den letzten Baustein des Tool Trackings darstellt, wird im Folgenden die softwaretechnische Umsetzung der bisher erläuterten Konzepte erläutert.

5.2.4 Umsetzung der Tool Tracking-Applikation

5.2.4.1 Auswahl eines geeigneten Softwareframeworks

Für das Tool Tracking gibt es kein dediziertes Framework, jedoch wird in der mobilen Robotik häufig das Robot Operating System (ROS) [454] eingesetzt, das ähnliche Herausforderungen adressiert [455], [456], [457]. Mobile Roboter verwenden – ähnlich zu Tool Tracking-Applikationen – verschiedene Sensoren, Sensorfusion, Kartierungs- und Lokalisierungsalgorithmen, Marker, um die räumliche Position eines mobilen Roboters zu schätzen [458], [459], [460]. Aufgrund dieser hohen Überschneidung der Technologien und Methoden sowie der gemeinsamen Problemstellung der Lokalisierung liegt der Einsatz von ROS nahe.

Neben der erläuterten Eignung für die Lösung von Lokalisierungsproblemen basiert ROS darüber hinaus auf einer Node-Architektur, die einen modularen und verteilten Aufbau vereinfacht. Aus den zuvor genannten Gründen wird im Folgenden ROS als zentrales Softwareframework für die Umsetzung verwendet.

5.2.4.2 Hardwarearchitektur

Für die Implementierung des Sensornetzwerks werden zwei ROS-Instanzen, aufgeteilt in eine Client- und eine Master-Instanz, auf zwei unabhängigen Rechenknoten ausgeführt. Beide Knoten sind mit 8 GB Arbeitsspeicher und einem 8-Kern-Prozessor mit 4 GHz identisch ausgestattet. Physikalisch sind die statischen Kameras mit dem Client-Rechenknoten und die mobilen Kameras mit dem Master-Rechenknoten verbunden. In den folgenden Abschnitten werden alle Rechenoperationen im Zusammenhang mit den statischen Kameras auf dem Client ausgeführt, alle anderen auf dem Master. Dies umfasst neben den Berechnungen zur Verarbeitung der Informationen der mobilen Kamera auch die Driftreduzierung und den Kalman-Filter.

5.2.4.3 Umsetzung der Referenzierung und Zeitsynchronisierung

Zur Implementierung der statischen und dynamischen Referenzierung wird die ROS „tf“-Bibliothek [461] verwendet. Mithilfe dieser Bibliothek ist es möglich, Transformationsbäume vollständig abzubilden, d. h. sowohl statische Beziehungen wie die Lage von AprilTags im Raum zu hinterlegen als auch zeitlich veränderliche Transformationen zu berechnen. Hierdurch kann die notwendige Abbildung der Umgebung in einem gemeinsamen Weltkoordinatensystem realisiert und die Lage

von mobilen Objekten im Raum relativ zu diesem berechnet werden. Dabei werden alle Repräsentationen in Quaternionen angegeben, da diese im Vergleich zu Euler-Winkeln eine singularitätenfreie Beschreibung von Rotationen ermöglichen und numerisch stabil sowie effizient für die kontinuierliche Berechnung von Orientierungen im dreidimensionalen Raum sind.

Die Implementierung der Zeitsynchronisierung und des Network Time Protocol (NTP) erfolgt mithilfe von *Chrony* [462]. Dabei wird die Uhr des Rechnerknotens gewählt, auf welchem der ROS-Master ausgeführt wird. Dadurch orientieren sich alle sonstigen beteiligten Systeme an diesem, wodurch die eingehenden Daten zeitlich synchronisiert werden können.

5.2.4.4 Umsetzung der Lokalisierungsverfahren und Driftreduzierung

Die in diesem Anwendungsfall verwendeten Lokalisierungsverfahren sind die Lokalisierung mittels AprilTags und die Lokalisierung mittels VIO. Da das VIO-Verfahren und die daraus resultierende Posenschätzung von der Kamera selbst durchgeführt werden, entfällt eine nähere Erläuterung dieses Verfahrens. Für eine genauere Ausführung sei auf [463] verwiesen. Diese Informationsquelle wird demnach als Black-box betrachtet. Für die Implementierung wird lediglich der ROS-Wrapper der Kamera benötigt, um diese in das System zu integrieren und auf die Poseninformation zugreifen zu können.

Zur Implementierung der AprilTag-Lokalisierung werden die für das ROS-System verfügbaren Bibliotheken und Wrapper verwendet. Die grundlegende Pipeline hierfür ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Darstellung unterscheidet zwischen Nodes (Ellipsen) und Topics (Rechtecke). Zur Extraktion der Bilddaten wird der Wrapper (*/Cam/Manager*) der jeweiligen Kamera verwendet. Zusätzlich werden hier die intrinsischen Kameraparameter gespeichert. Beide Informationen werden über ein Topic an den Node zur Bildbegradigung übergeben, wo sie von der ROS-Bibliothek „*image_proc*“ zu einem begradigten Bild verarbeitet werden. Die Erkennung der AprilTags im entzerrten Bild erfolgt mithilfe der ROS-Bibliothek „*apriltag_ros*“. Um diese Informationen zu einer Pose des Prüfmittel-TCPs weiterverarbeiten zu können, benötigt die */Cam_AT_Pose*-Node noch die Informationen über die Umgebungsreferenzierung sowie die Prüfmittelreferenzierung (statische Transformation von AprilTag zu TCP). Diese werden durch das Topic */tf* zur Verfügung gestellt. Da die Driftreduzierung ebenfalls auf der AprilTag-Lokalisierung aufsetzt, erfolgt der Ablauf gleichartig.

Die sich daraus ergebenden Ausgabefrequenzen der Lokalisierungsverfahren sind: 10 Hz für die AprilTag-Lokalisierung mit den statischen Kameras, 13 Hz für die AprilTag-Lokalisierung mit der mobilen Kamera und 200 Hz für die VIO-Lokalisierung.

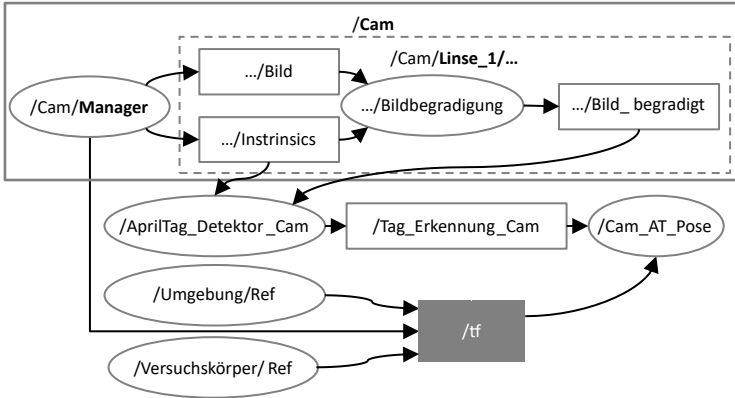


Abbildung 5.6: ROS-Pipeline für die Umsetzung der AprilTag-Lokalisierung.

5.2.4.5 Umsetzung des Kalman-Filters

Für die Umsetzung des Kalman-Filters müssen zunächst alle notwendigen Informationen vorliegen. Eine zentrale Information stellt dabei die Kovarianzmatrix \mathbf{R}_k des jeweiligen Lokalisierungsverfahrens dar. Die zugrundeliegende Idee ist es, diese auf Basis der durchgeführten Fehlercharakterisierungen dynamisch zu berechnen. Für die AprilTag-Lokalisierung ist die Genauigkeit abhängig vom Abstand der Kamera und der Verdrehung des AprilTags zur Kamera. Die entsprechende Kovarianzmatrix \mathbf{R}_k , die diese Unsicherheiten beschreibt, ist wie folgt definiert:

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} t_{err,k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_{err,k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_{err,k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{x_{err,k}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{y_{err,k}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{z_{err,k}} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

An dieser Stelle fließen die Ergebnisse der Charakterisierung der Lokalisierungsverfahren aus Abschnitt 5.2.2.2 ein. Hier werden für die Abstände des AprilTags zu den

Kameras t_{err} und für die Rotation des AprilTags zu den Kameras $E_{x_{err}}, E_{y_{err}}, E_{z_{err}}$ verwendet. Die Kovarianzmatrix für das VIO-Verfahren der mobilen Kamera enthält nur einen translatorischen Fehler, der von der zurückgelegten Wegstrecke abhängt. Durch die Funktion der Driftreduzierung werden die Werte der Kovarianzmatrix des VIO-Verfahrens überschrieben, sobald der Prüfende sich an einem entsprechenden AprilTag referenziert.

Die Implementierung des Kalman-Filters in ROS erfolgt durch die Einführung einer eigenständigen Node, in der die zu einer TCP-Pose vorliegenden Informationen verarbeitet werden. Die Node gliedert sich in einen Messwertsammler und den Sensorfusionsalgorithmus. Der Messwertsammler teilt die eingehenden Informationen anhand des Zeitstempels in Pakete der Größe 1 s ein, wodurch die Kombination zeitlich nahe beieinander liegender Informationen vereinfacht wird.

Der Kalman-Filter selbst wird in der Software gemäß den Definitionen in Abschnitt 5.2.3.1 nachgebildet. Um den Zustandsvektor \mathbf{x}_0 zu initialisieren und damit die Sensorfusion zu starten, muss das Tool einmalig, wie in Abschnitt 5.2.2.1 beschrieben, referenziert werden. Dies hat den Hintergrund, dass der Zustandsvektor des Kalman-Filters mit der dann verfügbaren Pose des VIO-Verfahrens initialisiert wird. Für die Initialisierung der Kovarianz \mathbf{P}_0 empfiehlt es sich, kleine Werte zu setzen, da die Unsicherheiten unmittelbar nach der Referenzierung des Werkzeugs als klein angenommen werden können. Da die Ergebnisse der Lokalisierungsverfahren direkt den Zustandsvektor beschreiben, kann die zugehörige Messmatrix \mathbf{H} mit einer 6×6 -Einheitsmatrix gewählt werden.

Nach der Initialisierung des Zustandsvektors starten die Berechnungen für die Zustandsaktualisierung. Alle eingehenden Messungen werden zunächst von Quaternionen in Euler-Repräsentationen umgerechnet, da sowohl der Zustandsvektor als auch die Kovarianzmatrizen mit Euler-Winkeln arbeiten. Eine entsprechende Rückrechnung der vom Kalman-Filter berechneten TCP-Pose und die dazugehörige Kovarianz des Kalman-Filters \mathbf{P}_k erfolgt nach dem Durchlauf des Algorithmus und das Ergebnis wird mit einem Zeitstempel an das ROS-System weitergegeben. Die Ausgabefrequenz der Zustandsaktualisierung passt sich dynamisch an das Lokalisierungsverfahren an, welches mit der niedrigsten Rate Messungen liefert (Abschnitt 5.2.4.4).

5.2.4.6 Softwarearchitektur der Gesamtapplikation

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Implementierung der einzelnen Bausteine der Tool Tracking-Applikation erläutert wurde, wird im Folgenden die daraus resultierende Softwarearchitektur dargestellt.

Abbildung 5.7 zeigt die Node-Topic-Struktur von ROS. Die dargestellten Kanten stellen Publish- bzw. Subscribe-Beziehungen dar. Die jeweiligen Kamerasysteme sind in eigenen Baumstrukturen für die Bereitstellung der Basisinformationen angeordnet. Daraus ergeben sich drei Unterstrukturen für T265, D455 und D435i, die jeweils an eine Pipeline für die AprilTag-Lokalisierung anschließen, wie sie in Abschnitt 5.2.4.4 beschrieben ist. Zusätzlich sind in dieser Abbildung auch die Topics für die Posen der einzelnen Lokalisierungsverfahren mit den entsprechenden Kovarianzen dargestellt, wie z. B. */D455_AT_Kovarianz* sowie deren Funktion als Eingangsgröße für den Kalman-Filter über Kanten veranschaulicht.

Die Driftreduzierung kann, wie beschrieben, sowohl durch die Erfassung von AprilTags über die statischen als auch über die mobile Kamera erfolgen, wobei letztere zu bevorzugen ist. Die Node der */Driftreduzierung* beinhaltet zudem die Werkzeuge zur initialen Referenzierung der mobilen Kamera. Da die Driftreduzierung den Initialisierungspunkt der mobilen Kamera manipuliert, wird das Ergebnis dieser Node an den */tf*-Topic weitergegeben. In diese Architektur ist auch das OptiTrack-System eingebunden, das streng genommen kein Teil der Applikation ist, sondern zur Referenzierung, Sensorcharakterisierung und als Ground Truth-System für die Evaluierung im Abschnitt 5.3 genutzt wird. Mit der vollständigen Abbildung aller Lösungsbausteine in einer zusammenhängenden ROS-Applikation ist der Entwicklungsprozess abgeschlossen. Im folgenden Abschnitt wird die entwickelte Software als Grundlage für eine Genauigkeitsevaluierung anhand praxisnaher Experimente verwendet.

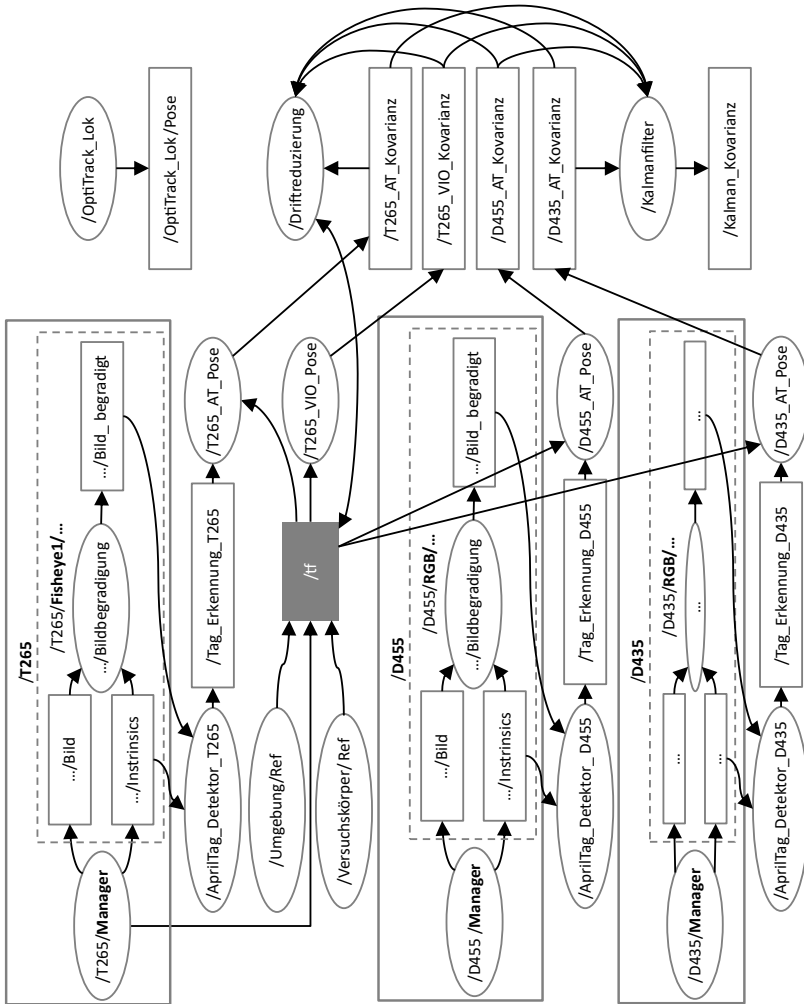


Abbildung 5.7: Vereinfachte Darstellung der Nodes (Ellipsen) und Topics (Rechtecke) in der Gesamtsystemarchitektur in ROS.

5.3 Evaluierung der Genauigkeiten

In diesem Abschnitt erfolgt eine Evaluierung der Tool Tracking-Applikation hinsichtlich erreichbarer Genauigkeiten in einem praxisnahen Szenario. Dazu wird zunächst im Abschnitt 5.3.1 ein Versuchsaufbau vorgestellt, mit dessen Hilfe eine Prüfsituation an einem Großbauteil nachgestellt wird und der die Durchführung verschiedener Versuche ermöglicht (Abschnitt 5.3.2.1). Die Ergebnisse gliedern sich in eine übergreifende Bewertung der Genauigkeiten im Abschnitt 5.3.2.2 sowie die Betrachtung einzelner Prüfpositionen in nicht okkludierten und okkludierten Szenarien in den Abschnitten 5.3.2.3 und 5.3.2.4.

5.3.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der zuvor entwickelten Tool Tracking-Applikation wird ein Versuchsaufbau (Abbildung 5.8) eingeführt, dessen Ziel es ist, die Prüfsituation des Anwendungsfalls aus Abschnitt 5.2.1.1 nachzubilden. Dafür werden in einer Laborumgebung die statischen Kameras in einem Abstand von 2,8 m platziert, um damit einen Messbereich zu definieren. Danach werden 11 AprilTags in einem Rastermuster zwischen den beiden statischen Kameras auf dem Boden platziert. Es ist zu beachten, dass während der Versuchsdurchführung nur einer dieser AprilTags zur Driftreduzierung verwendet wird. Die anderen dienen lediglich zur Überprüfung der Ergebnisse der Referenzierung. Als Ground Truth-System wird das OT-System aus Abschnitt 4.5.1 verwendet. Neben den für das Tool Tracking und deren Evaluierung notwendigen Komponenten wird zusätzlich ein „Prüfobjekt“ in der Versuchsumgebung benötigt, welches zur Festlegung der Prüfpositionen dient. Eine nähere Beschreibung hierzu folgt im nachfolgenden Abschnitt.

Mithilfe des OT-Systems kann das Weltkoordinatensystem auf Bodenhöhe definiert und die Transformationen aller Systeme zu diesem Koordinatensystem bestimmt werden. Das geschieht für die AprilTags durch die Anbringung von Retroreflektoren an vordefinierten Positionen. Das Weltkoordinatensystem wird dabei so ausgelegt, dass es entlang der XY -Ebene mit den AprilTags übereinstimmt. Für die statischen Kameras wird ein AprilTag im Bereich der geringsten Unsicherheit vor der Kamera aufgestellt, dessen Mittelpunkt und Ausrichtung ebenfalls durch die Platzierung von Retroreflektoren um den Tag bestimmt werden können. Durch die Kombination der AprilTag-Lokalisierung sowie der Informationen des OT-Systems kann die entsprechende Transformationsmatrix erstellt werden. An dieser Stelle wird auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet und anstelle dessen auf die

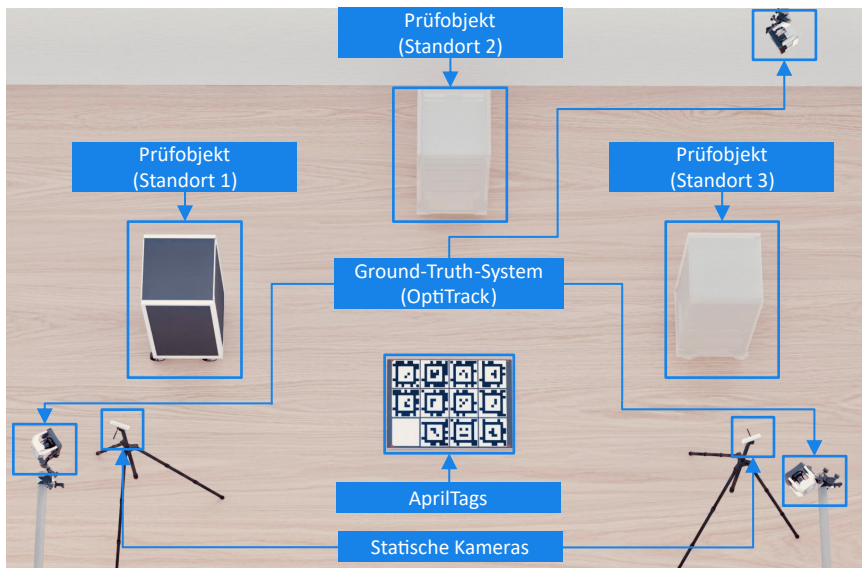


Abbildung 5.8: Renderingbasierte Darstellung des Versuchsaufbaus.

Dokumentation des OT-Systems verwiesen [464]. Als Prüfmittel im Rahmen der Versuchsreihen wird der in Abbildung A.7 gezeigte Versuchskörper verwendet, an welchem die mobile Kamera und zwei AprilTags angebracht sind. Hier sind über statische Transformationen die Übergänge der mobilen Kamera und der AprilTags in den TCP des Versuchskörpers bekannt. Zur einfacheren Differenzierung zwischen mobilen und statischen AprilTags werden für diese unterschiedliche „Tag-Familien“ genutzt.

Nach Abschluss der Referenzierung können die Informationen in der Tool Tracking-Applikation hinterlegt werden, wodurch das System einsatzbereit ist und die Pose des Versuchskörpers im Raum ermittelt werden kann. Zur Visualisierung können die Umgebungsdaten sowie die ermittelten Posenwerte des Tool Trackings mithilfe der RViz-Bibliothek [465] von ROS im Weltkoordinatensystem dargestellt werden (Abbildung 5.9). Die aktuell vorliegenden Kovarianzen werden in RViz als Kugeln um die einzeln ermittelten Posenwerte visualisiert.

Zur weiteren Veranschaulichung und grundsätzlichen Verifikation der erfolgreichen Referenzierung und Funktion der Tool Tracking-Applikation wird der Versuchskörper im Messbereich bewegt und die Ergebnisse der einzelnen Lokalisierung

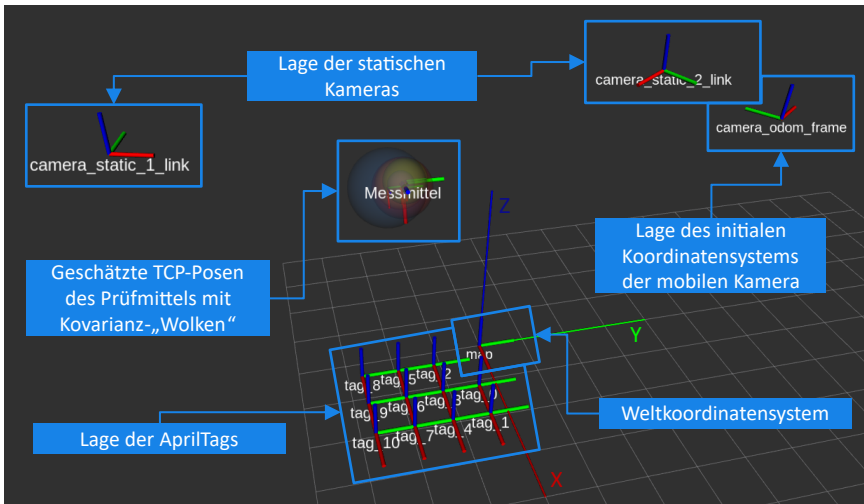


Abbildung 5.9: Darstellung der Koordinatensysteme in RViz.

ungsverfahren, des Kalman-Filters sowie des Ground Truth-Systems aufgezeichnet und die daraus resultierenden Trajektorien in Abbildung 5.10 dargestellt.

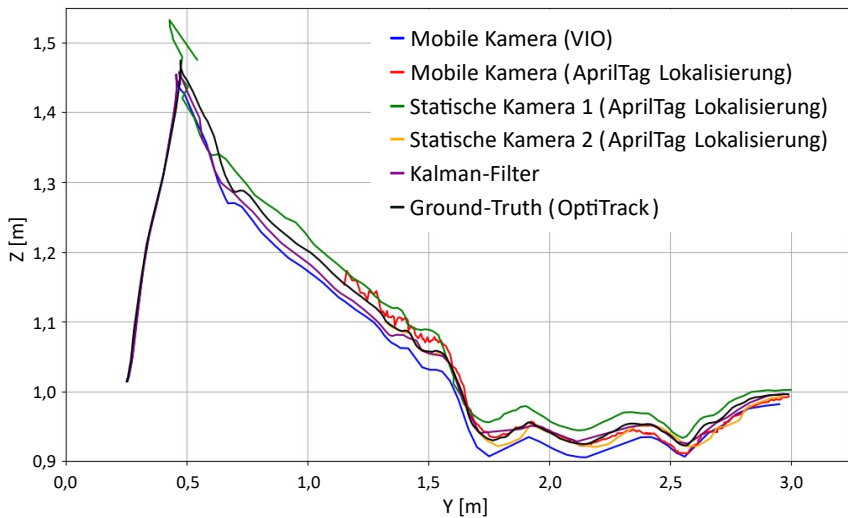


Abbildung 5.10: Exemplarische Trajektorien aller Lokalisierungsverfahren auf der Z-Y-Ebene.

5.3.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

5.3.2.1 Durchführung

Zur Erhebung der für die Evaluierung notwendigen Daten werden für die Versuchsdurchführung zwei unabhängige Versuchsreihen definiert (Abbildung 5.11). Eine Versuchsreihe hat zum Ziel, die in Abschnitt 5.2.3.2 vorgestellte Methode zur Reduzierung der Sensordrift näher zu untersuchen. Die andere Versuchsreihe dient der Ermittlung von Daten ohne diese Methode. Letztere Versuchsreihe teilt sich nochmals auf Basis der statischen Kamera, mit welcher die initiale Referenzierung des Versuchskörpers (Abschnitt 5.2.2.1) durchgeführt wird.

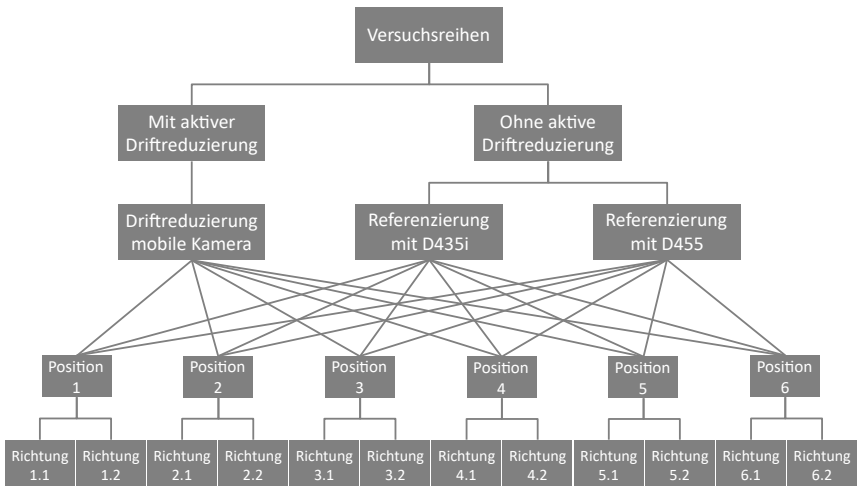


Abbildung 5.11: Aufschlüsselung der durchgeführten Versuchsreihen bestehend aus Versuchen mit und ohne aktiver Driftreduzierung.

Insgesamt werden somit drei Versuche durchgeführt, die alle einen Prüfvorgang mit dem handgeführten Versuchskörper an dem Prüfobjekt simulieren. Das Prüfobjekt hat zwei fest definierte Prüfpositionen. Durch die Verschiebung des Prüfobjekts zu drei unterschiedlichen Standorten auf der Versuchsfläche entstehen insgesamt sechs Prüfpositionen. Um die natürliche Variation der Prüfmittelhandhabung nachzuempfinden, wird der Versuchskörper von zwei Richtungen an jede Prüfposition herangeführt. Nach Erreichen der Prüfposition mit dem TCP des Versuchskörpers wird dieser für ca. 5 s an dieser Position gehalten und die Daten der Lokalisierungsverfahren sowie des Ground Truth-Systems gesammelt. Der beschriebene Vorgang

wird in jedem Versuch für jede Position dreimal aus allen Richtungen wiederholt. Es ist zu beachten, dass der Vergleich der Lokalisierungsdaten im folgenden Abschnitt mit den Werten des Ground Truth-Systems erfolgt und nicht mit einem fest definierten Punkt im Raum. Auf diese Weise wird vermieden, dass die Genauigkeitsbewertung durch die Fähigkeit des Menschen, die festgelegte Prüfposition genau zu treffen, beeinflusst wird. Die Prüfpositionen dienen daher in erster Linie der Sicherstellung eines reproduzierbaren Ablaufs über alle Versuchsreihen.

Zwischen den Versuchsreihen mit und ohne Driftreduzierung bestehen bei der Versuchsdurchführung jedoch auch prinzipbedingte, prozessuale Unterschiede. Bei der Versuchsreihe mit Driftreduzierung wird vor der ersten Erfassung sowie zwischen jeder weiteren Position die Drift mithilfe der mobilen Kamera über einen fest definierten AprilTag reduziert. Ebenso wird die initiale Referenzierung des Versuchskörpers an diesem Tag mittels der mobilen Kamera durchgeführt. Im Gegensatz dazu entfällt dieser Vorgang gänzlich bei den Versuchen ohne Driftreduzierung und die initiale Referenzierung erfolgt mit den statischen Kameras. Die mit den erläuterten Versuchen gewonnenen Daten werden im folgenden Abschnitt basierend auf den definierten Evaluierungsmethoden ausgewertet und näher untersucht.

5.3.2.2 Untersuchung der erreichbaren Genauigkeiten in den Versuchsreihen

Das Ziel dieser Evaluierung besteht darin, die gesammelten Daten zu nutzen, um die Genauigkeit der verschiedenen Versuchsreihen zu bewerten. Die hierfür verwendeten Kennzahlen sind die Richtigkeit und Präzision (mittlerer absoluter Fehler, Standardabweichung) sowie die minimalen und maximalen Fehler. Zunächst werden die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen aufgegriffen und anhand dieser Metriken näher beleuchtet. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Versuchsreihen untereinander. In der folgenden Auswertung wird die AprilTag-Lokalisierung mit der mobilen Kamera aufgrund ihrer schlechten Leistungskennzahlen nicht genauer betrachtet, ist aber aus Gründen der Vollständigkeit dennoch aufgeführt.

Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der **Versuchsreihe mit aktiver Driftreduzierung** der einzelnen verwendeten Lokalisierungsverfahren und deren Kombination über den Kalman-Filter. In der Tabelle entspricht die Benennung „statische Kamera 1“ der D455 und „statische Kamera 2“ der D435i. Darüber hinaus sind die markerbasierten Lokalisierungsverfahren als AprilTag-Lokalisierung (ATL) gekennzeichnet. Zunächst werden die besten erzielten Werte für die jeweiligen Me-

triken betrachtet: Der Kalman-Filter erzielt den höchsten Wert von 0,02 m für die Richtigkeit sowie den geringsten minimalen Fehler von 0,003 m. Der maximale Fehler beträgt 0,046 m, was ebenfalls der niedrigste Wert aller getesteten Verfahren ist. Dies zeigt, dass die Funktionalität des Kalman-Filters in dieser Versuchsreihe als grundsätzlich verifiziert angesehen werden kann und eine hohe Genauigkeit in der Lokalisierung bewirkt. Allerdings ist die Präzision bei den statischen Kameras (jeweils 0,002 m) höher als bei den mobilen Kameras und dem Kalman-Filter. Dies bedeutet, dass die Positionsbestimmung bei den statischen Kameras konsistenter ist, da die Messwerte weniger variieren.

Lokalisierungsverfahren	Richtigkeit [m]	Präzision [m]	Min. Fehler [m]	Max. Fehler [m]
Mobile Kamera (VIO)	0,032	0,009	0,008	0,065
Mobile Kamera (ATL)	0,028	0,005	0,019	0,047
Statische Kamera 1	0,029	0,002	0,008	0,065
Statische Kamera 2	0,023	0,002	0,006	0,049
Kalman-Filter	0,020	0,005	0,003	0,046

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen für die jeweiligen Lokalisierungsverfahren sowie für die Sensorfusion mit den Kenngrößen der Richtigkeit und Präzision gemäß [436] sowie des minimalen und maximalen Fehlers über alle Messpositionen für die Versuchsreihe mit Driftreduzierung.

Mit Hinblick auf die **Versuchsreihe ohne Driftreduzierung** ergeben sich in den Lokalisierungsverfahren andere Tendenzen. Aufgrund der geringen Unterschiede in den Ergebnissen werden die Einzelversuche (Referenzierung mit D455 und D435i) nachfolgend zusammengefasst. Die einzelnen Ergebnisse sind im Anhang in den Tabellen A.6 und A.7 aufgeführt. Tabelle 5.4 stellt somit die mittlere Richtigkeit und Präzision sowie die geringsten bzw. höchsten Werte für den minimalen und maximalen Fehler beider Versuche dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass die statische Kamera 2 (D435i) in dieser Versuchsreihe mit einer Richtigkeit von 0,02 m, einer Präzision von 0,002 m sowie einem maximalen Fehler von 0,053 m den anderen Lokalisierungsverfahren überlegen ist. Lediglich beim minimalen Fehler schneidet die VIO-Lokalisierung der mobilen Kamera von 0,003 m besser ab. Allerdings ist dieser Wert aufgrund der sonst hohen

Werte in den übrigen Kennzahlen für die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Verfahrens nicht ausschlaggebend.

Lokalisierungsverfahren	Richtigkeit [m]	Präzision [m]	Min. Fehler [m]	Max. Fehler [m]
Mobile Kamera (VIO)	0,062	0,016	0,003	0,191
Mobile Kamera (ATL)	0,692	0,964	0,022	2,103
Statische Kamera 1	0,030	0,002	0,006	0,065
Statische Kamera 2	0,020	0,002	0,005	0,053
Kalman-Filter	0,026	0,008	0,006	0,277

Tabelle 5.4: Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen für die jeweiligen Lokalisierungsverfahren sowie für die Sensorfusion mit den Kenngrößen der Richtigkeit und Präzision gemäß [436] sowie des minimalen und maximalen Fehlers über alle Messpositionen für die Versuchsreihe ohne Driftreduzierung.

Zum **Vergleich beider Versuche** miteinander und der einfacheren Einschätzung der Auswirkung der Driftreduzierung auf die Leistungsfähigkeit des Systems werden die Veränderungen in den Kennzahlen in Tabelle 5.5 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die fehlende Driftreduzierung negative Auswirkungen auf die Richtigkeit und Präzision der VIO- sowie der Kalman-Filter-Lokalisierung hat. Für das VIO-Verfahren belegt dies, dass die Driftreduzierung seine Funktion erfüllt und so genauere Lokalisierungsergebnisse ermöglicht. Der Leistungsabfall des Kalman-Filters auf der anderen Seite ist nicht ohne weiteres erklärbar und ist daher Gegenstand der Diskussion in Abschnitt 5.4.

Eine alleinige Beschränkung der Evaluierung auf die Genauigkeit und die dargestellten Kennzahlen wird dem Anwendungsfall jedoch nicht gerecht. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt Einzelfallbetrachtungen durchgeführt. Aus den Versuchsreihen werden exemplarisch Prüfpositionen ohne Okklusion und Prüfpositionen mit Okklusion ausgewählt und die dazu vorliegenden Daten ausgewertet.

Lokalisierungs- verfahren	Δ Richtig- keit [m]	Δ Präzi- sion [m]	Δ Min. Fehler [m]	Δ Max. Fehler [m]
Mobile Kamera (VIO)	0,030	0,007	-0,005	0,126
Mobile Kamera (ATL)	0,664	0,959	0,003	2,056
Statische Kamera 1	0,001	0	-0,002	0
Statische Kamera 2	-0,003	0	-0,001	0,004
Kalman-Filter	0,006	0,003	0,003	0,231

Tabelle 5.5: Differenzen der Kennwerte der Genauigkeitsuntersuchungen zwischen den Versuchsreihen mit und ohne Driftreduzierung.

5.3.2.3 Einzelfallbetrachtungen ohne Okklusion

Für die Einzelfallbetrachtung der Prüfsituationen ohne Okklusion werden im Folgenden Boxplots als Analysewerkzeug für einzelne Prüfpositionen verwendet.

Als repräsentative Prüfposition wird für die **Versuchsreihe mit Driftreduzierung** Prüfposition 2 ausgewählt. Der dazugehörige Boxplot ist in Abbildung 5.12 gezeigt und jeweils nach Technologien und definierten Richtungen aufgeschlüsselt. Dabei sind die Boxplots immer paarweise nach Richtungszuordnung zu lesen, d. h. der Boxplot „T265 VIO 2.1“ korrespondiert mit „D455 ATL 2.1“ und allen anderen Boxplots mit der Bezeichnung 2.1.

Der gezeigte Boxplot verdeutlicht im Wesentlichen nochmals die Ergebnisse aus Abschnitt 5.3.2.2, in welchem der Kalman-Filter grundsätzlich in der Lage ist, die beste Schätzung der Pose durchzuführen, was sich hier im Median zeigt. Diese Schätzung weist jedoch eine stärkere Streuung auf als jene der beiden statischen Kameras, was sich in einem erhöhten Interquartilsabstand widerspiegelt. Entsprechendes lässt sich auch für das VIO-Verfahren feststellen, dessen Charakteristik sich vor allem durch ausgeprägte Interquartilsabstände und breite Spannweiten auszeichnet.

Die Einzelfallbetrachtung ohne Okklusion und **ohne Driftreduzierung**, dargestellt in Abbildung 5.13, gewährt ebenfalls eine detaillierte Betrachtung der Ergebnisse. Der Kalman-Filter ist in diesen Versuchen trotz aller verfügbaren Daten nicht in der Lage, die Genauigkeit des leistungsfähigsten Einzelverfahrens zu übertreffen. Die Mediane des Kalman-Filters liegen dabei zwar unter denen des VIO-Verfahrens

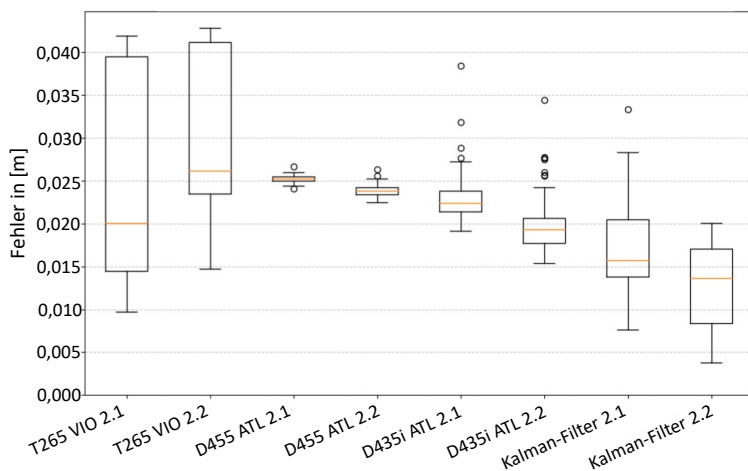


Abbildung 5.12: Boxplots der Ergebnisse der Lokalisierungsverfahren für die Versuchsreihe mit Driftreduzierung an Prüfposition 2 (ohne Okklusion).

und der D455, jedoch über dem der D435i. Auch die deutliche Verschlechterung der Richtigkeit des VIO-Verfahrens ohne die aktive Reduzierung der Drift lässt sich an erhöhten Werten des Medians feststellen.

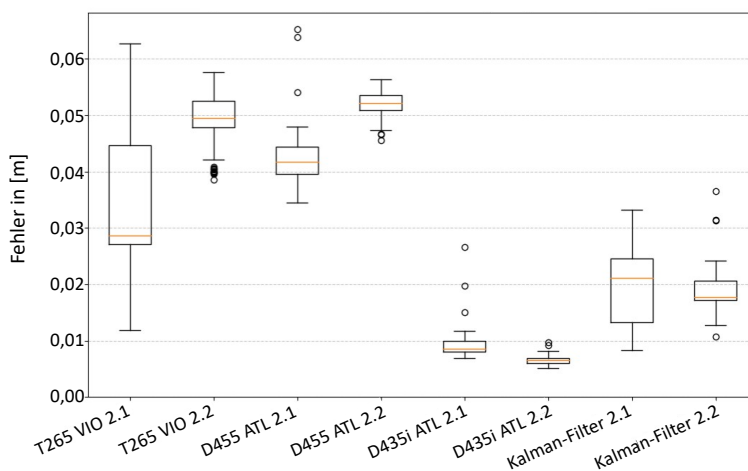


Abbildung 5.13: Boxplots der Ergebnisse der Lokalisierungsverfahren für die Versuchsreihe ohne Driftreduzierung an Prüfposition 3 (ohne Okklusion).

5.3.2.4 Einzelfallbetrachtungen in Okklusionsszenarien

Abbildung 5.14 zeigt Prüfposition 4 aus der Versuchsreihe **mit Driftreduzierung**, bei der zwei Okklusionen vorhanden sind. Zum einen ist beim Heranführen des Versuchskörpers aus Richtung 1 die D435i abgeschattet, zum anderen ist aus Richtung 2 die D455 abgeschattet. Im ersten Okklusionsszenario ist der Median des Kalman-Filters deutlich unter den verfügbaren Lokalisierungsverfahren, wodurch sich die aufgezeichneten Posen des Kalman-Filters in einem geringeren Fehlerbereich bewegen als die des VIO-Verfahrens und der D455. Im zweiten Okklusionsszenario ist das nicht der Fall. Hier liegt der Medianwert der D435i, wenn auch nur geringfügig, unter dem des Kalman-Filters. Dies verdeutlicht, dass der Kalman-Filter zwar über alle Prüfpositionen und Richtungen hinweg im Mittel die höchste Richtigkeit aufweist, jedoch nicht in jedem Einzelfall die besten Lokalisierungsergebnisse erzielt.

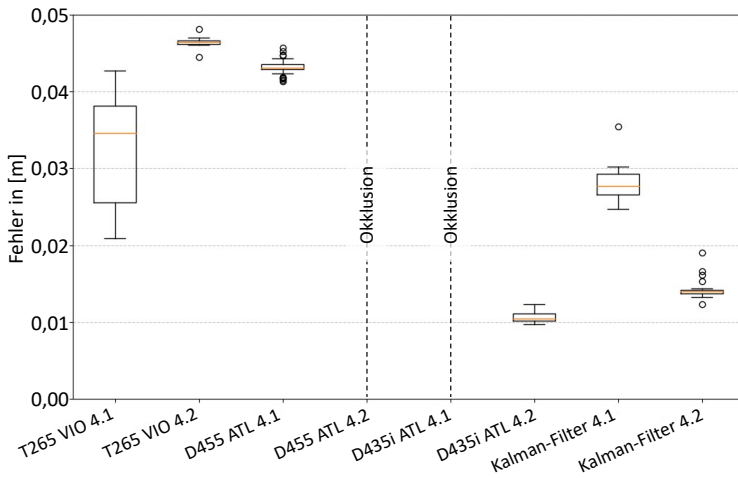


Abbildung 5.14: Boxplots der Ergebnisse der Lokalisierungsverfahren für die Versuchsreihe mit Driftreduzierung an Prüfposition 4 (mit Okklusion).

Die Ergebnisse der Prüfposition 4 (Abbildung 5.15) dienen der weiteren Analyse des Verhaltens bei Okklusion im Versuch **ohne Driftreduzierung**. Die Okklusionsszenarien entsprechen dabei denen der Versuchsreihe mit Driftreduzierung und auch das Verhalten der betrachteten Lokalisierungsverfahren zeigt ein vergleichbares Muster. Für Richtung 1, in der die D435i verdeckt ist, erzielt der

Kalman-Filter den besten Wert. In Richtung 2, in der die D455 keine Messwerte erzeugt, ist hingegen die D435i führend. In diesem Fall liegen ihre Ergebnisse und die des Kalman-Filters jedoch weiter auseinander, was auf einen positiven Effekt der Driftreduzierung schließen lässt.

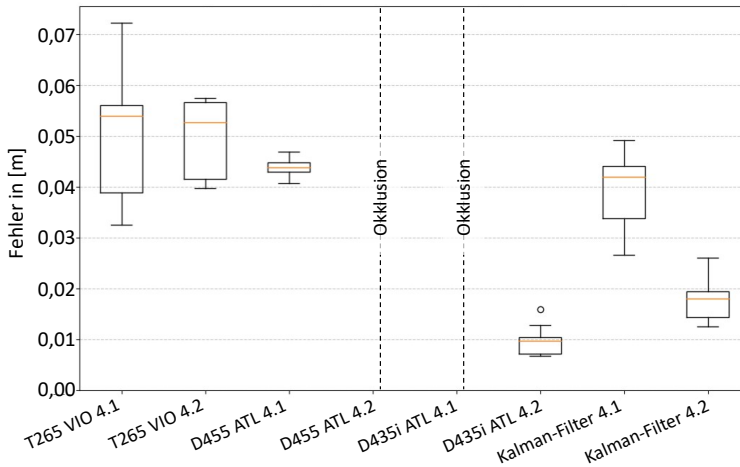


Abbildung 5.15: Boxplots der Ergebnisse der Lokalisierungsverfahren für die Versuchsreihe ohne Driftreduzierung an Prüfposition 4 (mit Okklusion).

5.4 Zusammenfassung, Diskussion und Einordnung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurde anhand einer systematischen Vorgehensweise ein Tool Tracking für den Einsatz in Prüfsituationen, die mit Okklusionen behaftet sind, entwickelt. Dazu wurde zuerst ein Referenzprozess für die geometrische Prüfung definiert und die entsprechenden Anforderungen an das Modul formuliert. Dem Entwicklungsprozess wurde ein repräsentativer Anwendungsfall aus dem Flugzeugbau zugrunde gelegt. Ausgehend von diesem Anwendungsfall wurden geeignete Hardwaresysteme ausgewählt, experimentell charakterisiert und in eine Tool Tracking-Anwendung eingebunden. Diese bot die technische Grundlage für die Evaluierung der Genauigkeit, wobei hier insbesondere Okklusionsszenarien von Interesse waren.

Das **erste Teilziel** dieses Moduls (Abbildung 2.16) – die Bereitstellung eines methodischen Vorgehens zur Entwicklung multi-modaler Tool Tracking-Systeme – wurde durch die Vorstellung eines von der finalen technischen Lösung entkoppelten Entwicklungsprozesses adressiert. Dies stellt einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag dar, da bisherige Forschungsarbeiten zwar spezifische Tool Tracking-Systeme präsentieren, jedoch ein generalisierbares methodisches Vorgehen zur Entwicklung und Adaption solcher Systeme für verschiedenartige, komplexe Arbeitsplätze fehlt. Der Entwicklungsprozess fokussiert sich somit darauf, multi-modale Tool Tracking-Anwendungen zu realisieren, die an die Anforderungen verschiedenartiger Arbeitsplätze angepasst sind. Um zu vermeiden, dass diese immer wieder von Grund auf neu entwickelt werden müssen, ist die Modularität des Softwaresystems eine wichtige Voraussetzung. So trägt auch die Wahl von ROS als Software-Framework zur flexiblen Anpassung bei, da hier einzelne Sensoren, Lokalisierungsverfahren oder Filteralgorithmen zur Sensorfusion innerhalb eigenständiger und damit austauschbarer Knoten realisiert werden. Auch die Skalierbarkeit auf große Arbeitsstationen kann durch die gegebenen Transformationswerkzeuge gewährleistet werden. Die im Rahmen der Entwicklung verwendeten Werkzeuge vereinfachen die Anpassung einer Basisanwendung an ähnliche Arbeitsstationen. Ein einfaches Beispiel wäre hier das Hinzufügen einer weiteren statischen Kamera des gleichen Typs, um den Arbeitsbereich zu vergrößern. Dazu müsste lediglich die Kamera im Raum referenziert, die Pipeline zur Lokalisierung kopiert, in die Gesamtapplikation eingebunden und die räumliche Lage entsprechend hinterlegt werden.

Die erfolgreiche exemplarische Anwendung des Entwicklungsprozesses zur Realisierung der in dieser Arbeit vorgestellten Tool Tracking-Applikation (Abschnitt 5.2) demonstriert dessen grundsätzliche Praxistauglichkeit und liefert einen ersten Beleg für seine Anwendbarkeit auf dynamische industrielle Szenarien. Der Prozess bietet somit eine Orientierung und eine strukturierte Herangehensweise für die zielgerichtete Konzeption und Implementierung von Tool Tracking-Applikationen in okklusionsbehafteten und großskaligen Arbeitsbereichen. Um jedoch die allgemeine Übertragbarkeit und Universalität des methodischen Vorgehens über den spezifischen Anwendungsfall hinaus wissenschaftlich umfassend zu belegen und dessen Grenzen präziser zu definieren, bedarf es weiterer systematischer Untersuchungen und Validierungen anhand industrieller Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Anforderungsprofilen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die hier vorgestellten methodischen Ansätze und Werkzeuge das Potenzial besitzen, geeignete Lösungen für herausfordernde Arbeits-

bereiche zu ermöglichen. Die vollständige Ausschöpfung und Verallgemeinerung dieses Potenzials bleibt Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten.

Zur Adressierung des **zweiten Teilziels** (Abbildung 2.16) – der Entwicklung und Erprobung einer funktionsfähigen, okklusionsrobusten Tool Tracking-Applikation – wurde der zuvor beschriebene Entwicklungsprozess anhand eines exemplarischen Anwendungsfalles durchlaufen. Zentrales Merkmal des Anwendungsfalles war das Auftreten von Okklusionen, wodurch bestimmte Datenquellen während des Trackings nicht zur Verfügung standen. Um dem entgegenzuwirken, wurde der in der Literatur gängige Ansatz der Verwendung multi-modaler Lokalisierungsverfahren angewandt. In diesem Zusammenhang waren die erstmalige Untersuchung des VIO-Verfahrens als Inside-Out-Komponente für das Tool Tracking sowie die neu konzipierte Methode zur aktiven, markerbasierten Driftreduzierung zentrale wissenschaftliche Aspekte. Diese Kombination wurde gewählt, um der Herausforderung des Sensordrifts der Inside-Out-Systeme bei gleichzeitiger Okklusion von Outside-In-Systemen zu begegnen.

Im Rahmen der Genauigkeitsuntersuchungen wurde die Applikation näher untersucht. Dazu wurden zunächst die Versuchsreihen hinsichtlich der Richtigkeit und Präzision übergreifend ausgewertet. Die grundsätzliche Funktionalität des Kalman-Filters konnte dabei nachgewiesen werden. Auch die Annahme, dass die eingeführte Driftreduzierung einen positiven Effekt auf die Gesamtgenauigkeit hat, konnte belegt werden. Die in Abschnitt 5.2.1.2 als Zielgröße für den exemplarischen Anwendungsfall festgelegte Genauigkeitsanforderung von 5 cm wird vom Kalman-Filter nur unter Einsatz der Driftreduzierung erreicht (max. Fehler: 4,6 cm). Obwohl der maximale Fehler des Systems die Anforderung nur knapp erfüllt, zeigt eine Reflexion auf den Anwendungsfall (Abschnitt 5.2.1.1) den Mehrwert im Vergleich zum manuellen Prozess. Dessen Schwachstelle ist die relative Schätzung der Messpositionen mit sich akkumulierendem Fehler. Das entwickelte System unterbindet diesen Fehler durch seine absolute Positionsbestimmung. Die hier nachgewiesene Systemleistung mit einer durchschnittlichen Richtigkeit von 2 cm und einer Präzision von 0,5 cm ist als deutlich besser als die menschliche Schätzung anzunehmen. Zudem ließ sich in diesen Versuchen bereits feststellen, dass die Werte der Sensorfusion ohne Driftreduzierung nicht nur deutlich unter denen des Vorversuchs liegen, sondern dass der Kalman-Filter teilweise ungünstigere Kennzahlen aufweist als die einzelnen Lokalisierungsverfahren. Da dieses Phänomen auch in den folgenden Versuchen auftrat, wird erst am Ende der Versuchsdiskussion darauf eingegangen.

Die Genauigkeitsuntersuchungen ohne Okklusion bestätigten die Ergebnisse aus der initialen Gesamtbetrachtung. Der Kalman-Filter war hier in der Lage, in den untersuchten Prüfpositionen die besten Werte aller Lokalisierungsverfahren zu liefern. Eine Abweichung von diesem Verhalten zeigte sich hingegen bei Okklusionen. Hier war der Kalman-Filter nur in der Hälfte der Fälle in der Lage, in der untersuchten Versuchsposition eine bessere Schätzung zu liefern als die einzelnen Lokalisierungsverfahren (statische Kameras).

In Bezug auf den Kalman-Filter zeigt sich dadurch ebenfalls ein Defizit. Die erhöhten Werte für die ermittelten Kennzahlen beim Kalman-Filter im Vergleich zu den statischen Kameras könnten darauf hinweisen, dass der Kalman-Filter nicht optimal parametrisiert ist. Als mögliche Ursachen kommen prinzipiell fehlerhafte Modellannahmen infrage, bei denen die Annahmen über die Systemdynamik auf ein zu vereinfachtes oder ungenaues Modell zurückzuführen sind [466]. Weiterhin können suboptimale Tuningparameter, insbesondere die Kovarianzmatrizen für die Unsicherheiten der einzelnen Lokalisierungsverfahren, nicht optimal abgestimmt sein [467]. Schließlich können auch Sensorfusionseffekte, bei denen die Gewichtung der Sensordaten nicht optimal ist, zu erhöhten Ungenauigkeiten beitragen [468].

Eine naheliegende Ursache für diese Applikation könnte eine Kombination von vereinfachten Modellannahmen des VIO-Verfahrens und einer ungünstigen Gewichtung dieser Informationen innerhalb des Kalman-Filters sein. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die Unsicherheit des VIO-Verfahrens in einem roboterbasierten Versuch ermittelt wurde, der mit annähernd konstanten Geschwindigkeiten zwischen den Versuchspositionen und einer konstanten Kameraausrichtung durchgeführt wurde. Im Gegensatz dazu wurde die Handhabung des Versuchskörpers in der Evaluierung durch einen Menschen durchgeführt, der das Messmittel auf beliebigen Trajektorien mit variierenden Kameraorientierungen und Geschwindigkeiten führen konnte. All diese Umstände erhöhen im Allgemeinen den Fehler des VIO-Verfahrens. Zur Vereinfachung wurde hierbei nur der Abstand zum Initialisierungspunkt als zentrale Größe zur Berechnung der Kovarianz verwendet. Diese Vermutung wird dadurch bestärkt, dass die Leistungsfähigkeit des VIO-Verfahrens und des Kalman-Filters durch die Nutzung der Driftreduzierung stark verbessert werden konnte. Durch die Korrektur der akkumulierten Fehler kann zwar nicht das Modell selbst korrigiert werden, jedoch können die Auswirkungen auf den Fehler der Posen-schätzung deutlich reduziert werden. Zur Verbesserung des Unsicherheitsmodells müsste die Handhabung durch den Menschen umfangreich in Experimenten abgebildet und die entsprechenden Parameter, die hier den Fehler beeinflussen, iden-

tifiziert und untersucht werden. Dies würde den Aufwand zur Charakterisierung dieses Lokalisierungsverfahrens erheblich erhöhen.

Eine Einschränkung der Aussagekraft der hier präsentierten Ergebnisse lässt sich in Bezug auf die vorgestellten Okklusionsszenarien erkennen. In den Versuchen wurde keine „künstliche Abschattung“ der beiden statischen Kameras erzeugt, um den natürlichen Prüfablauf nicht zu verfälschen. Dies spiegelt allerdings nicht die realen Bedingungen wider, bei denen die Anwesenheit mehrerer Personen im Prüffeld durchaus dazu führen kann, dass alle Outside-In-Systeme zeitweise keine Sicht auf das Messmittel haben. Um dennoch eine Einschätzung für die Leistungsfähigkeit in diesem Fall zu bekommen, eignet sich die Betrachtung der Ergebnisse des VIO-Verfahrens mit Driftreduzierung. Hier zeigt sich eine leichte Überschreitung des erlaubten maximalen Fehlers von 5 cm um 1,5 cm, jedoch eine akzeptable Genauigkeit (Richtigkeit, Präzision) (Tabelle 5.3). Es ist davon auszugehen, dass der Kalman-Filter an einer Prüfposition mit vollständiger Okklusion leicht unter den Kennzahlen des reinen VIO-Verfahrens liegt, da dies in allen untersuchten Prüfpositionen zu beobachten war. Damit läge die Genauigkeit in diesem hypothetischen Szenario in den überwiegenden Fällen innerhalb der geforderten Genauigkeit.

Übergreifend zeigt sich, dass in allen Untersuchungen das Inside-Out-Tracking die limitierende Komponente des Gesamtsystems bildet. In diesem Zusammenhang kann ein einfacher Stellhebel in der Sensorauswahl gefunden werden. Alle Sensoren wurden aufgrund ihrer bisherigen Ergebnisse in Publikationen ausgewählt. Diese Ergebnisse wurden überwiegend in kleineren Arbeitsbereichen erzielt, sodass davon auszugehen ist, dass noch größere Arbeitsbereiche als im Versuch gezeigt damit nicht mehr ausreichend abgedeckt werden können. Der Abdeckungsbereich und die Genauigkeit der Gesamtapplikation lassen sich durch den Austausch der Sensoren gegen leistungsfähigere Hardware verbessern. Für das Outside-In-Tracking kann z. B. auf hochauflösende Industriekameras zurückgegriffen werden. Durch die verstärkten Forschungsanstrengungen im Bereich der mobilen Robotik ist zu erwarten, dass für das Inside-Out-Tracking performante und gleichzeitig kompakte Systeme auf den Markt kommen. Denkbar ist auch, dass diese Systeme fortgeschrittene Lokalisierungsverfahren wie das auf VIO basierende Visual-Inertial Simultaneous Localization and Mapping (VI-SLAM) als native Funktion zur Verfügung stellen und dadurch die Lokalisierungsqualität steigern können. Für zukünftige Entwicklungen von Tool Tracking-Applikationen empfiehlt sich daher ein sorgfältiges Screening der am Markt verfügbaren Systeme.

Abschließend wird die Adressierung der in Abbildung 3.3 aufgezeigten **Praxisdefizite** näher diskutiert. Da die hier vorgestellte Komponente, wie eingangs erwähnt, ausschließlich zur Gewinnung von Kontextinformationen entwickelt wurde, hat sie keinen direkten Einfluss auf den Prozess. Im Folgenden werden daher zwei hypothetische, darauf aufbauende Assistenzfunktionen vorgestellt, anhand derer der Nutzen der Messmittellokalisierung verdeutlicht werden kann.

Die erste mögliche Assistenzfunktion könnte die Messmittelposition nutzen, um die Messwerte automatisch der richtigen Prüfposition zuzuordnen. Dies entspräche einer Assistenzfunktion vom Typ „Dokumentieren“ (Abbildung 2.7). Voraussetzung ist, dass das Messgerät digital und mit dem Assistenzsystem gekoppelt ist. Auf diese Weise könnten beide Informationen zusammengeführt werden, wodurch eine Überführung in ein papierbasiertes Prüfprotokoll überflüssig würde und Übertragungsfehler gänzlich vermieden werden könnten. Gleichzeitig würde diese Anwendung dazu beitragen, den Zeitversatz zwischen Datenaufnahme und Verfügbarkeit des Datensatzes zu eliminieren, was mit einer erhöhten Reaktionszeit und Transparenz der verfügbaren Informationen einhergeht.

Die zweite mögliche Assistenzfunktion könnte eine Rückmeldung an das Prüfpersonal realisieren, wenn dieses eine Prüfung an der falschen Prüfposition durchführt. Dies repräsentiert eine Assistenzfunktion des Typs „Prüfung & Rückmeldung“. Denkbar ist die Übermittlung dieser Information z. B. über die Vibration einer Smartwatch. Auf diese Weise könnten redundante Prüfungen vermieden und damit die Effizienz und Effektivität des Prozesses gesteigert werden. Diese beiden Beispiele zeigen den Nutzen der Information über die Messmittelposition und damit den Mehrwert dieses Moduls, der insbesondere für die weitere industrielle Verwertung von Bedeutung ist.

6 Entwicklung des Informationsausgabemoduls für die in-situ Projektion von Prüfinformationen

Teilergebnisse dieses Kapitels wurden bereits in vorangegangenen Veröffentlichungen [310], [318], [469] publiziert.

Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung einer Systemkomponente, welche die Benutzenden bei der Durchführung geometrischer Prüfungen assistiert, indem relevante Informationen direkt an den Prozessort (in-situ) projiziert werden. Dies entspricht der Informationsausgabe des HAAT-Modells (Abschnitt 2.2.2) und stellt die kognitive Assistenzfunktion „Führen und Anleiten“ nach Abbildung 2.7 dar. Der prinzipielle Aufbau entspricht dem Kapitel 5 und gliedert sich in folgende Abschnitte:

- Im Abschnitt 6.1 werden zunächst die relevanten Informationen identifiziert, die bei der geometrischen Prüfung ausgegeben werden müssen. Der Referenzprozess sowie die definierten Informationen führen zur Ableitung von Funktionsmodulen, die sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen umfassen. Ebenso werden geeignete Evaluierungsmethoden festgelegt.
- Basierend auf den Nutzungsanforderungen beginnt die Entwicklung im Abschnitt 6.2 mit einer Technologieauswahl zur Realisierung der Projektion. Für die ausgewählte Technologie, den Lichtprojektor, werden Steuerungs- und Kalibrierungsansätze entwickelt und implementiert.
- Die Evaluierung im Abschnitt 6.3 konzentriert sich auf die Genauigkeit der Projektionen und thematisiert spezifische Fehlerquellen, wie Kalibrierungsungenauigkeiten, sowie eine praktische Evaluierung unter Beachtung von Lichtpunktverzerrungen.
- Den Abschluss bildet der Abschnitt 6.4 mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse, einer Diskussion dieser sowie einer Reflexion, inwiefern die wissenschaftlichen und praktischen Defizite adressiert werden.

6.1 Festlegen der Nutzungsanforderungen

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen und Evaluierungsmethoden analog zu den beiden vorherigen Kapiteln definiert. Auf die Definition eines Referenzprozesses wird verzichtet, da sich dieses Modul, wie auch das Tool Tracking, auf den Teilprozess „Geometrische Prüfungen“ bezieht. Eine weitere Besonderheit dieses Abschnitts ist, dass die Ableitung der Anforderungen mit einer Eingrenzung der relevanten (Output-)Informationen beginnt.

6.1.1 Definition eines Referenzprozesses

Der Referenzprozess wurde bereits im Abschnitt 5.1.1 dargestellt.

6.1.2 Ableitung von Anforderungen und Festlegung von Evaluierungsmethoden

Um die Anforderungen an das in diesem Kapitel zu entwickelnde Modul abzuleiten, müssen zunächst die auszugebenden Informationen definiert werden. Dies geschieht aus zwei Gründen: Die im Abschnitt 3.3 vorgestellte Zielgruppe kann als Personen mit hohem Fachwissen beschrieben werden. Mit diesem Nutzungsprofil geht einher, dass eine effiziente Nutzung des Assistenzsystems nicht mit der Darstellung aller verfügbaren Informationen erzielt wird, sondern durch eine Reduktion auf die tatsächlich notwendigen Informationen (Abschnitt 3.3.2). Der zweite Grund findet sich in einem gegenwärtigen Forschungsdefizit. Dieses resultiert aus der unzureichenden Berücksichtigung von Prüfungen, was wiederum dazu führt, dass die entsprechenden Gestaltungsgrundlagen, wie die Definition der zu übertragenden Informationen (z. B. Prüfmittel, Prüfpläne), nicht existieren (Abschnitt 2.2.3.5).

In der geometrischen Prüfung sind gemäß Referenzprozess (Abschnitt 5.1.1) drei Hauptinformationen entscheidend: die geeigneten Prüfmittel, die Prüfpositionen eines Prüfschrittes und die Prüfanweisung zur Erfassung des Prüfmerkmals. Um aus diesen Informationen die relevanten Informationen herauszukristallisieren, wird die Schwachstellenanalyse aus Abschnitt 3.3.1 verwendet.

Diese zeigte, dass vor allem Zuordnungsfehler sowie das zeitaufwendige Suchen von Prüfpositionen gerade bei großen Flugzeugbauteilen, die Hauptursachen für Effizienzverluste sind (Abbildung 3.3). Die Analyse ergab weiterhin, dass keine si-

gnifikanten Fehlerquellen in der Auswahl der Prüfmittel oder in der fehlerhaften Anwendung der Prüfanweisungen festgestellt wurden. Diese Beobachtung bestätigt, dass die Zielgruppe in diesen Bereichen über eine hohe Kompetenz verfügt. Daher sollte das Assistenzsystem einen besonderen Schwerpunkt auf die Informationen zu den **Prüfpositionen** legen. Ein Übermaß an Informationen zu Prüfmitteln oder Prüfanweisungen könnte die Informationsausgabe überfrachten und von den kritischen, fehleranfälligen Aspekten, nämlich der Lokalisierung der Prüfpositionen, ablenken.

Zusätzlich zu den oben genannten Hauptinformationen ist das **Prüfergebnis** eine weitere kritische Information, die, obwohl sie nicht direkt Teil des Informationsflusses innerhalb des Prozesses ist, ein wesentliches Ergebnis des Prüfprozesses darstellt. Diese Annahme wird durch die Schwachstellenanalyse gestützt, die redundante Prüfungen als Problem identifiziert hat. Um diese zu vermeiden und den Prüfprozess effizienter zu gestalten, ist es unabdingbar, dass das Assistenzsystem Informationen darüber bereitstellt, welches Prüfergebnis für den aktuellen Prüfschritt bisher erzielt wurde (unbearbeitet, i.O. oder n.i.O.).

Aus den vorangegangenen Erläuterungen und dem Referenzprozess ergeben sich direkt die Funktionen mit ihren Anforderungen an das Informationsausgabemodul, die in Tabelle 6.1 aufgeschlüsselt sind. Dabei wird grundsätzlich der im Abschnitt 2.2.3.5 vorgestellte Ansatz der SAR verwendet, da dieser vielversprechende Ergebnisse für die Darstellung von Informationen mit räumlichem Kontext zeigt. Dabei werden die Informationen über Prüfpositionen und -ergebnisse direkt am Bauteil (in-situ) dargestellt. Dies erfordert sowohl eine **Steuerung** (AF 1.1) als auch eine **Kalibrierung** (AF 1.2), deren Entwicklung nach bisherigem Forschungsstand nicht speziell an den Rahmenbedingungen von Großbauteilen orientiert wurde.

Da in der bisherigen Literatur keine Untersuchungen zur **Projektionsgenauigkeit** vorliegen (Abschnitt 2.2.3.5), diese aber für den Einsatz im Bereich großer Bauteile zur verwechslungsfreien Darstellung der Prüfpositionen unerlässlich ist, wird sie als zentrale nicht-funktionale Anforderung (AF 1.3) definiert. Zur Evaluierung dieser werden sowohl Kennzahlen, wie Absolut- und Wiederholgenauigkeit, erhoben als auch Fehlerquellen untersucht, die durch den Steuerungs- bzw. Kalibriervorgang auftreten können. Darüber hinaus wird erstmals die Projektionsverzerrung durch gekrümmte Bauteiloberflächen in den Blickpunkt der Untersuchungen gerückt. Um diese Aspekte bewerten zu können, wird eine Technologie zur Realisierung der SAR benötigt. Allerdings unterliegen alle verfügbaren Technologien prinzipbedingt einer Okklusion. Um dieser entgegenzuwirken, müssen zusätzliche

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Typ
1	In-situ Projektion von Prüfpositionen und -ergebnissen des aktuellen Prüfschritts		
1.1	Steuerung	Die Applikation bietet Werkzeuge, um das Projektionssystem mithilfe der Koordinaten der Prüfposition und Information über das Prüfergebnis anzusteuern.	Funktional
1.2	Kalibrierung	Die Applikation bietet Werkzeuge zur Herstellung einer räumlichen Beziehung zwischen Ausgabesystem und Prüfling.	Funktional
1.3	Projektionsgenauigkeit	Die Applikation ermöglicht eine hinreichend genaue Anzeige von Prüfpositionen und -ergebnissen.	Nicht funktional
1.4	Kostengünstige Skalierung	Die Applikation ermöglicht es, mehrere Projektoren auf der Arbeitsfläche einzubringen, um Okklusionen entgegenzuwirken. Dies sollte kostengünstig möglich sein.	Nicht funktional
2	Nutzungserfahrung		
2.1	Gebrauchstauglichkeit (Usability)	Die Applikation führt dazu, dass Benutzer aus subjektiver Sicht ihre Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend erreichen.	Nicht funktional
2.2	Arbeitsbelastung (Workload)	Die Applikation führt bei Nutzung zu einer vertretbaren kognitiven und physischen Belastung.	Nicht funktional
3	Prozessauswirkungen		
3.1	Effizienz	Die Applikation führt dazu, dass Benutzer den Prozess im Vergleich zur Durchführung ohne Assistenzsystem schneller durchführen können.	Nicht funktional
3.2	Effektivität	Die Applikation führt dazu, dass Benutzer den Prozess im Vergleich zur Durchführung ohne Assistenzsystem mit weniger Fehlern durchführen können.	Nicht funktional

Tabelle 6.1: Übersicht der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an die Applikation zur Informationsausgabe in geometrischen Prüfungen.

Projektoren in den Arbeitsbereich eingebracht werden. Der **Kostenaufwand zur Skalierung** (AF 1.4) hierfür wird bei der Technologieauswahl berücksichtigt.

Analog zur Informationseingabe ergeben sich auch für dieses Modul Anforderungen an die **Gebrauchstauglichkeit** (AF 2.1) und die **Arbeitsbelastung** (AF 2.2). Im Gegensatz zur Informationseingabe ist aber die Studienlage zur Nutzungserfahrung für die SAR zur Informationsausgabe bereits aussagekräftig (Abschnitt 2.2.3.5), sodass von einer erneuten Untersuchung dieser Aspekte kein Erkenntnisgewinn zu erwarten ist. Diese Anforderungen werden daher nur der Vollständigkeit halber aufgeführt und nicht weiter vertieft. Gleiches gilt für die Auswirkungen auf den Prozess hinsichtlich **Effizienz** (AF 3.1) und **Effektivität** (AF 3.2), die ebenfalls bereits in zahlreichen Studien untersucht wurden und in denen ein positiver Effekt von SAR nachgewiesen werden konnte.

6.2 Entwicklung von Steuerungs- und Kalibrierungsfunktionen

Damit die zuvor definierten Anforderungen in ein Modul zur Informationsausgabe überführt werden können, wird nachfolgend zunächst eine **Technologieauswahl** getroffen. Die Auswahl der Technologie zur Umsetzung der SAR für das Assistenzsystem basiert auf der Anforderung nach kostengünstiger Skalierung (AF 1.4). Im Fokus stehen Videoprojektoren, Lichtprojektoren und Laserprojektoren, die als wesentliche Technologien für SAR im Abschnitt 2.2.3.5 bereits behandelt wurden.

Für den industriellen Einsatz werden spezifische Ausführungen der Systeme betrachtet: Lichtprojektoren beschränken sich auf kopfbewegte Systeme (Moving Head Spot (MHS)), da sie durch ihre winkelbasierte Ansteuerung flexibel einsetzbar sind. Videoprojektoren werden auf leistungsstarke Modelle mit beweglichem Spiegelkopf reduziert, da diese eine hohe Leuchtintensität für große Arbeitsbereiche bieten, wie u. a. in der Studie von [321] gezeigt wurde. Laserprojektoren werden auf industrielle Systeme eingegrenzt, die aufgrund ihrer Laserschutzklassen und Zertifizierungen sicher in der Nähe von Menschen eingesetzt werden können.

Lichtprojektoren sind aus rein kostenspezifischer Sicht am besten geeignet, wenn es um die einfache Projektion von Prüfpositionen und Ergebnissen geht. Um dies zu verdeutlichen, dienen die folgenden Preise von am Markt verfügbaren Systemen:

- **Lichtprojektor:** *Showtec Phantom 130 Spot*, ca. 815 € [470]
- **Videoprojektor:** *Dynamic Projection Mirror Head 11*, ca. 3.150 € [471]

- **Laserprojektor:** Z-Laser ZLP2, ca. 15.000 € [472]

Trotz ihres Potenzials finden Lichtprojektoren bisher kaum Anwendung in der Industrie und erfahren nur geringe Beachtung in der Forschung. Eine erneute Evaluation dieser Technologie zeigt, dass dies darauf zurückzuführen ist, dass in vielen Fällen eine Vielzahl an Informationen – etwa Texte, Videos oder Geometriekonturen – dargestellt werden muss. Dies erfordert häufig den Einsatz von Video- oder Laserprojektoren, da diese in der Lage sind, unterschiedlichste Inhalte wiederzugeben und damit besser auf die Bedürfnisse von Zielgruppen mit geringer technischer Expertise eingehen.

Für den skizzierten Anwendungsfall stellen Lichtprojektoren jedoch eine vielversprechende Lösung dar. Geeignete Steuerungs- und Kalibrierungsansätze, wie sie hier erforderlich sind, wurden bislang nicht untersucht. Der wissenschaftliche Beitrag der folgenden Abschnitte zielt darauf ab, diese Lücke zu schließen und Lichtprojektoren als Informationsausgabemodul in Assistenzsystemen zu qualifizieren.

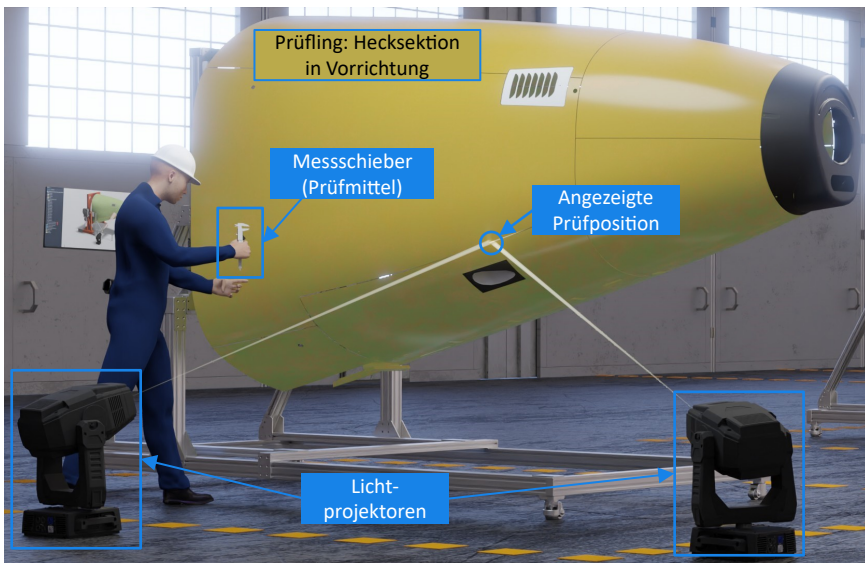


Abbildung 6.1: Veranschaulichung eines potenziellen Anwendungsszenarios von MHSs in der geometrischen Prüfung einer Flugzeughecksektion.

Grundlegende Charakteristika des Lichtprojektortyps MHS sowie die spezifischen Eigenschaften des für die Entwicklung verwendeten MHS sind ergänzend im An-

hang A.3.2 dargelegt. Bei dem für die Entwicklung und Evaluierung der Steuer- und Kalibrierverfahren verwendeten Bauteil handelt es sich um die Hecksektion, die bereits in Abschnitt 5.2.1.1 genutzt wurde. Abbildung 6.1 dient zur Veranschaulichung eines potenziellen Anwendungsszenarios von MHSs bei der geometrischen Prüfung des Versuchsbauteils. Des Weiteren wird im Folgenden eine schematische Darstellung der Hecksektion eingeführt (Abbildung 6.2).

6.2.1 Entwicklung der Steuerungsfunktionen

6.2.1.1 Steuerung mit kartesischen Koordinaten

Um die Interoperabilität des MHS mit anderen Systemen zu gewährleisten, ist es notwendig, ihn mit dreidimensionalen kartesischen Koordinaten der Prüfpositionen anzusteuern, anstatt die Winkel der einzelnen Bewegungsachsen zu manipulieren.

Der verfolgte Lösungsansatz basiert auf den Transformationsgleichungen von kartesischen Koordinaten zu sphärischen Koordinaten. Die Gleichungen für die Winkel pan° und $tilt^\circ$ sind in den Gleichungen 6.1 und 6.2 aufgeführt und werden für einen Punkt $P_n = [x_n, y_n, z_n]^T$ verallgemeinert (Abbildung 6.2).

$$pan_n^\circ = \operatorname{sgn}({}^{MH}y_n) \cdot \arccos \left(\begin{matrix} {}^{MH} \\ \left(\frac{x_n}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2}} \right) \end{matrix} \right) + 360^\circ \quad (6.1)$$

$$tilt_n^\circ = \arcsin \left(\begin{matrix} {}^{MH} \\ \left(\frac{z_n}{\|P_n\|} \right) \end{matrix} \right) \quad (6.2)$$

Es werden mehrere Änderungen und Vereinfachungen der Gleichungen zur Transformation der Kugelkoordinaten vorgenommen, um sie an den speziellen Anwendungsfall eines MHS anzupassen. Die Gleichung pan° in Gleichung 6.1 lässt Punkte mit $z_n < 0$ aus, da die $tilt$ -Bewegung auf den positiven Halbraum beschränkt ist. Außerdem wird nicht der volle $0-540^\circ$ -Bewegungsbereich der pan -Achse genutzt. Um eine vollständige Umdrehung des MHS zwischen bestimmten Ausrichtungen zu vermeiden, wird die pan -Achse stattdessen um 360° auf einen Bereich von $180-540^\circ$ versetzt. Die $tilt^\circ$ Gleichung 6.2 ist so definiert, dass 0° und 180° auf der xy -Ebene liegen und 90° parallel zur z -Achse, was von den typischen Definitionen sphärischer Koordinaten abweicht.

Nachdem die kartesische Steuerung des MHS festgelegt wurde, müssen die räumlichen Beziehungen und Definitionen zwischen den relevanten Koordinatensystemen präzisiert werden.

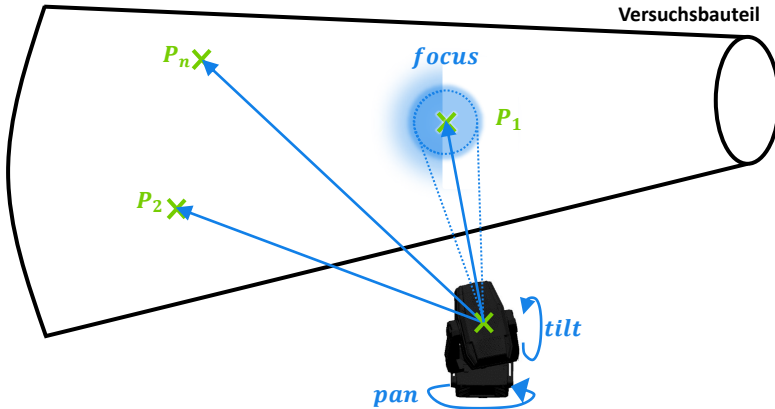


Abbildung 6.2: Schwenk-, Kippachse und Fokus des MHS in Bezug auf das Versuchsbauteil mit Verbindungsvektoren zu den Referenzpunkten P_1 , P_2 und P_n .

6.2.1.2 Koordinatensysteme und Transformationen

Damit ein Prüfpunkt, der in der Regel im Koordinatensystem des Prüflings definiert ist, mit dem MHS angestrahlt werden kann, müssen entsprechende Transformationsmatrizen bestimmt werden. Zunächst muss dafür eine Beziehung zwischen dem Koordinatensystem des MHS (MH) und dem Referenzkoordinatensystem (Ref) des beleuchteten Objekts (Prüfling) definiert werden. Diese Beziehung, die in Abbildung 6.3 durch einen roten Pfeil veranschaulicht ist, wird durch die homogene 4×4 -Koordinatentransformationsmatrix ${}_{Ref}^{MH} \mathbf{T}$ in Gleichung 6.3 ausgedrückt. Diese Matrix besteht im Allgemeinen aus einer Skalierung, null bis drei Rotationen um die Koordinatenachse und einem Translationsvektor. Die Skalierung ist in diesem Fall 1, kann aber für Koordinatensysteme mit anderen Längeneinheiten angepasst werden. Der Rotationsteil wird durch die 3×3 -Rotationsmatrix ${}_{Ref}^{MH} \mathbf{R}_{zx}$ ausgedrückt, wobei der Index auf der rechten Seite die Reihenfolge der Rotationen um die bezeichnete Achse angibt. Die Translation wird durch den Translationsvektor $[t_x, t_y, t_z]^T$ beschrieben.

$${}^{MH}_{Ref}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{MH}_{Ref}\mathbf{R}_{zx} & t_x \\ t_y \\ t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Die tiefgestellten und hochgestellten Symbole der Matrix in Gleichung 6.3 folgen der Tensornotation, wobei der tiefgestellte Index das Ausgangs- und der hochgestellte Index das Zielkoordinatensystem bezeichnet.

Die Berechnung der Transformation zwischen dem Referenz- und dem MHS-Koordinatensystem ist die Kernaufgabe des in Abschnitt 6.2.2 erläuterten Kalibrierprozesses. Sie bildet die Grundvoraussetzung für die Verwendung des MHS innerhalb einer Assistenzanwendung, da sie die Transformation einer beliebigen Eingangskoordinate im Referenzkoordinatensystem in einen Steuerbefehl des MHS ermöglicht.

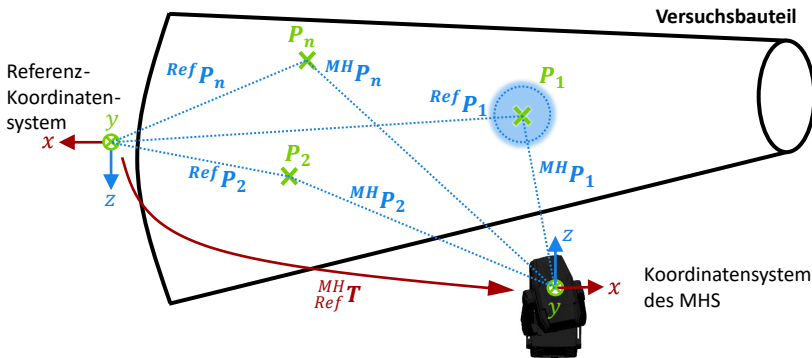


Abbildung 6.3: Definition des Referenz- und des MHS-Koordinatensystems und der Transformation zwischen ihnen.

6.2.1.3 Distanzbasierte Anpassung des Fokusparameters

Neben der Steuerung der Parameter für die Bewegungsachsen wird auch die dynamische Fokuseinstellung des MHS betrachtet. Die richtige Einstellung des Fokus hängt vom Abstand zwischen dem MHS und der zu beleuchtenden Oberfläche ab. Unterscheiden sich die Abstände zwischen MHS und den zu beleuchtenden Positionen auf einem Objekt stark, führt die Verwendung eines fest gewählten Fokusparameters zu unscharfen Lichtpunkten. Im Kontext einer Assistenzanwendung reduziert ein korrekt fokussierter Lichtpunkt die Unsicherheit darüber, welcher Punkt

oder Bereich durch das Assistenzsystem hervorgehoben werden soll und welcher nicht. Da die Angabe geeigneter Fokuswerte in Abhängigkeit vom Abstand zum beleuchteten Objekt nicht durch Informationen aus den Herstellerangaben abgedeckt ist, werden diese für den verwendeten MHS experimentell ermittelt. Der Versuchsaufbau ist dabei unabhängig von der konkret verwendeten Hardware und kann daher in dieser Form auch für MHS anderer Hersteller verwendet werden.

Für das Experiment wird ein beweglicher Schirm in verschiedenen Abständen in den Strahlengang des MHS gebracht (Abbildung 6.4). Während des Experiments wird die kleinste Blendengröße des in Abbildung A.11b gezeigten Goborades verwendet. Der Abstand wird von 0,5 m in 0,5 m-Schritten bis auf 8 m vergrößert, wobei dieser von der Mitte der *pan*- und *tilt*-Achse gemessen wird. Für jeden Abstand wird der DMX-Wertebereich (Minimum und Maximum) des Fokuskanals bestimmt, der einen visuell fokussierten Lichtpunkt erzeugt. Die Entscheidung, wann der Lichtpunkt (noch) fokussiert ist, basiert auf einer qualitativen Beurteilung mit dem Auge. Durch die Bildung des Mittelwerts der jeweiligen Minima- und Maximawerte wird ein „optimaler“ Wert bestimmt. Eine vollständige Übersicht über die während des Experiments gewonnenen Daten findet sich in Tabelle A.8.

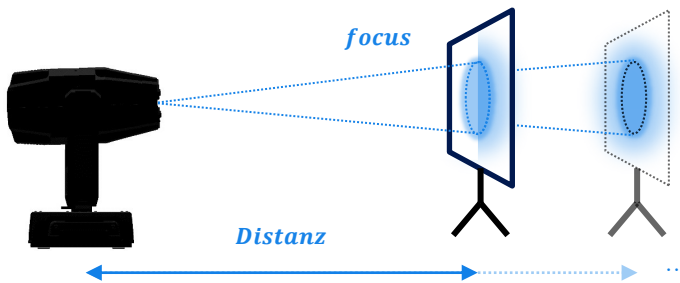


Abbildung 6.4: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Verhältnisses zwischen Fokuswert und Abstand zwischen dem stationären MHS und einer mobilen Projektionsfläche.

Aufgrund der im Experiment gewonnenen Daten kann für den Entfernungsbereich 1,5 m bis 6,0 m eine Polynombeziehung (Gleichung 6.4) aufgestellt werden. Die Bestimmung der Funktion basiert auf den Optimawerten. Außerhalb dieses Bereiches wird der Fokuswert statisch mit seinem Minimal- bzw. Maximalwert definiert. Bei Verwendung des statischen Goborads schränkt der verwendete MHS den Bereich der Fokuswerte ein, wodurch sich ein DMX-Wertebereich von [80 – 255] ergibt. Abbildung 6.5 zeigt den polynomischen Fit auf Basis der Optima sowie die

linearen Verbindungslinien der Minima und Maxima der Fokuswerte in Abhängigkeit vom Abstand des MHS zur Projektionsfläche. Mithilfe dieser ermittelten Funktionen lassen sich distanzabhängig die Parameter des Fokus anpassen, um einen scharfen Lichtpunkt auf der Projektionsoberfläche sicherzustellen.

$$focus^{DMX} = \begin{cases} 255 & \text{für } d \leq 1,5 \text{ m} \\ 80 & \text{für } d > 6,0 \text{ m} \\ -1.271173 \cdot d^3 + 20.391608 \cdot d^2 + 132.271950 \cdot d + 413.084848 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.4)$$

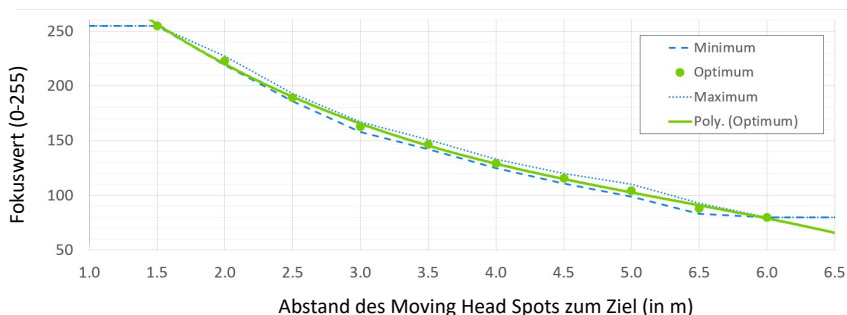


Abbildung 6.5: Lineare Verbindung der Minima und Maxima sowie polynomischer Fit des manuell ermittelten Fokuswertes in Abhängigkeit von der Entfernung des MHS zur Projektionsfläche.

6.2.1.4 Darstellung des Prüfergebnisses

Die Darstellung des Prüfergebnisses erfolgt durch Manipulation des DMX-Kanals des Farbrades. Die Prüfergebnisse werden dabei wie folgt dargestellt und sind beispielhaft in Abbildung 6.6 veranschaulicht:

- Weiß: Die Prüfposition wurde noch nicht gemessen (Abbildung 6.6a).
- Grün: Die Prüfposition wurde mit „in Ordnung“ bewertet (Abbildung 6.6b).
- Rot: Die Prüfposition wurde mit „nicht in Ordnung“ bewertet (Abbildung 6.6c).

Damit sind die Funktionalitäten der Steuerung grundsätzlich ausgestaltet. Da die Funktionen der Steuerung und Kalibrierung miteinander verknüpft sind, ist eine ge-

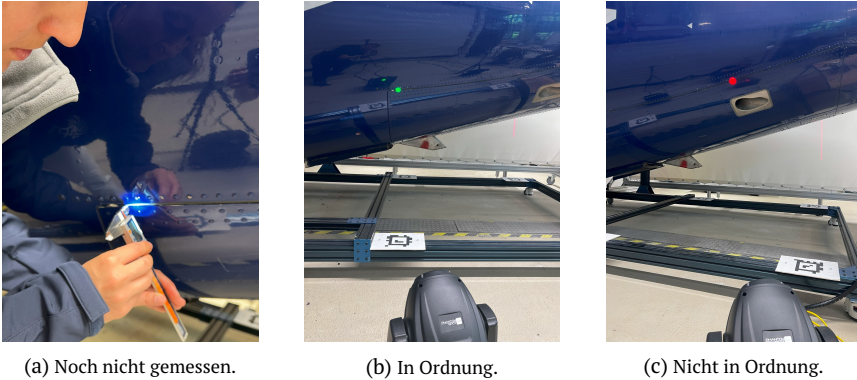


Abbildung 6.6: Exemplarische Veranschaulichung von verschiedenartig codierten Lichtpunkten an Prüfpositionen einer Flugzeughecksektion.

sonderte Betrachtung der Umsetzung der jeweiligen Funktion nicht sinnvoll. Eine Erläuterung der softwaretechnischen Umsetzung der beiden Funktionen als Gesamtlösung erfolgt daher nach der konzeptionellen Entwicklung der Kalibrierung im Abschnitt 6.2.2.3.

6.2.2 Entwicklung der Kalibrierungsfunktion

6.2.2.1 Auswahl und Beschreibung eines geeigneten Lösungsalgorithmus

Die nachfolgend vorgestellte Kalibrierungsfunktion basiert auf den zuvor in den Abschnitten 6.2.1.1 und 6.2.1.2 hergeleiteten Gleichungen 6.1, 6.2 und 6.3. Diese Gleichungen sind sich insofern ähnlich, als dass sie Sinus- und Cosinus-Terme enthalten, womit es sich um nichtlineare Gleichungen handelt. Die Gleichungen, die im Kalibrierprozess aus diesen Gleichungen abgeleitet werden, sind ebenfalls nichtlinear, was die Verwendung üblicher linearer Lösungsalgorithmen ausschließt. Zwar ließe sich eine manuelle Linearisierung der Gleichungen um ein erwartetes Ergebnis herum durchführen, dies erfordert jedoch eine vorherige Kenntnis des zu erwartenden Ergebnisbereichs – eine Annahme, die in der Praxis oft nicht erfüllt ist. Außerdem muss der Lösungsalgorithmus eine gewisse Ungenauigkeit der Eingabewerte aus der manuellen Erfassung der Referenzpunkte tolerieren, worauf im Abschnitt 6.3.1 näher eingegangen wird.

Ein vielversprechender Lösungsalgorithmus, der für die oben genannten Bedingungen geeignet ist, ist das iterative Newtonverfahren, das bei jedem Iterations-

schritt eine automatische Linearisierung vornimmt. Darüber hinaus kann es an mehrdimensionale Funktionen angepasst werden und weist nur eine begrenzte Komplexität auf. Aus diesen Gründen wird dieser Ansatz als Lösungsalgorithmus für die Kalibrierfunktion gewählt.

Die allgemeine Idee des Newtonverfahrens besteht darin, Nullstellen einer Funktion $f(x)$ (wie in Gleichung 6.5) zu finden, bei denen der herkömmliche analytische Ansatz entweder nicht möglich oder nicht durchführbar ist [473].

$$f(x) \stackrel{!}{=} 0 \quad (6.5)$$

Der erste Schritt des Iterationsprozesses ist die Linearisierung von $f(x)$ mit einem Anfangswert von $x^{(0)}$. Dieser Wert kann willkürlich oder als Schätzwert nahe dem erwarteten Ergebnis gewählt werden, wodurch die Konvergenz beschleunigt wird. Im zweiten Schritt, der in Gleichung 6.6 dargestellt ist, wird der Nullpunkt dieser Linearisierung berechnet, der zum nächsten Wert $x^{(1)}$ führt. Der Abstand zwischen den beiden Werten wird als Iterationsschrittweite $\Delta x^{(0)}$ bezeichnet.

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})} \stackrel{!}{=} x^{(0)} - \Delta x^{(0)} \quad (6.6)$$

Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis eines der drei Abbruchkriterien erfüllt ist:

1. Die Nullstelle ist mit ausreichender Genauigkeit gefunden worden:

$$f(x^{(k)}) \leq \epsilon_f \quad \text{mit} \quad \epsilon_f \approx 0$$

Diese Bedingung garantiert keine Konvergenz, kann aber verwendet werden, wenn Konvergenz keine Voraussetzung ist.

2. Die Differenz zwischen zwei x -Werten ist unter einen bestimmten Schwellenwert gefallen:

$$\Delta x^{(k)} \leq \epsilon_x \quad \text{mit} \quad \epsilon_x \approx 0$$

Diese Bedingung bedeutet Konvergenz, garantiert aber nicht, dass die Nullstelle genau gefunden wurde.

3. Die maximale Iterationsschrittzahl K wurde erreicht, ohne dass eines der anderen Kriterien erfüllt ist. Dies bedeutet in der Regel, dass die Iteration nicht konvergiert hat oder um die Nullstelle oszilliert.

Der eindimensionale Ansatz kann auf mehrere Variablen und Funktionen ausgeweitet werden, indem eine Vektorschreibweise verwendet wird [474]. Da der Algorithmus alle Variablen gleichzeitig löst, ergibt sich in der Regel eine hinreichend genaue

und konsistente Lösung, die ohne weitere manuelle Nachbearbeitung verwendet werden kann. Der x -Wert wird zu einem \vec{x} -Vektor erweitert, der alle Iterationsvariablen enthält. Wie in Gleichung 6.7 dargestellt, wird die Funktionsgleichung 6.5 zu einem Funktionsvektor \vec{f} mit dem Vektor \vec{x} als Eingabe erweitert.

$$\vec{f}(\vec{x}) = 0 \quad (6.7)$$

Die Gleichung 6.6 zur Berechnung des nächsten x -Werts wird erweitert. Die Ableitungen von \vec{f} werden in einer Jacobimatrix \vec{J} zusammengefasst und ein Dämpfungsfaktor α wird eingeführt, was zu der Gleichung 6.8 führt. Abhängig von den Funktionsgleichungen können unerwünschte Schwingungen um das Ergebnis auftreten. Um diese Schwingungen zu dämpfen und die Konvergenz zu unterstützen, begrenzt α die Iterationsschrittweite. Die Dämpfung wird automatisch erhöht, sobald die Iterationsschrittweite keine signifikante Änderung mehr aufweist.

$$\vec{x}^{(k+1)} = \vec{x}^{(k)} - \alpha \cdot \Delta \vec{x}^{(k)} = \vec{x}^{(k)} - \alpha (\vec{J}(x^{(k)}))^{-1} \cdot \vec{f}(x^{(k)}) \quad (6.8)$$

Da die Bestimmung der Inversen von \vec{J} für jeden Iterationsschritt numerisch ungünstig ist, wird die lineare Gleichung 6.8 umgeformt und stattdessen für $\Delta \vec{x}^{(k)}$ gelöst, was zu Gleichung 6.9 führt.

$$\vec{J}(\vec{x}^{(k)}) \cdot \Delta \vec{x}^{(k+1)} = -\vec{f}(\vec{x}^{(k)}) \quad (6.9)$$

Wie in Gleichung 6.10 gezeigt, kann bei der Iteration mit mehreren Variablen das zweite Abbruchkriterium angepasst werden, indem die Norm der Iterationsschrittweite $\Delta \vec{x}$ überprüft wird.

$$\|\Delta \vec{x}^{(k+1)}\| < \epsilon_x \quad \text{mit} \quad \epsilon_x \approx 0 \quad (6.10)$$

Alle erforderlichen Berechnungen in den Iterationsschritten können automatisch durchgeführt werden und erfordern in der Regel keine manuelle Anpassung an unterschiedliche Eingabewerte. Bei auftretenden Oszillationen kann der Wert für α bei Bedarf geändert werden.

Bei der Anwendung dieses Verfahrens auf die Kalibrierung des Moving Heads sind jedoch spezifische mathematische und mechanische Randbedingungen zu beachten, die über die allgemeine Theorie hinausgehen:

1. **Überbestimmtheit und Singularität:** Das eigentliche Problem ist in diesem Anwendungsfall meist überbestimmt, da mehr Referenzpunkte (N) vorliegen als Unbekannte in \vec{x} gesucht werden. Die Gleichung $\vec{f}(\vec{x}) = 0$ ist aufgrund von Messrauschen oft nicht exakt lösbar. Mathematisch wird dies durch die Verwendung der Pseudoinversen (Methode der kleinsten Quadrate) gelöst (siehe Gleichung 6.9). Kritisch ist hierbei die Konditionierung der Jacobi-Matrix. Wird ihre Determinante nahe Null (singulär), ist keine eindeutige Lösung berechenbar.
2. **Euler-Winkel und Gimbal Lock:** Da der Vektor \vec{x} Rotationswinkel (Euler-Winkel) enthält, besteht die Gefahr mathematischer Singularitäten (Gimbal Lock). In solchen Konstellationen verlieren Rotationsachsen ihre lineare Unabhängigkeit, wodurch die Determinante der Jacobi-Matrix verschwindet und das Newton-Verfahren divergiert. Dies muss durch eine geeignete Wahl der Startwerte $\vec{x}^{(0)}$ oder Einschränkung des Wertebereichs verhindert werden.

Mit dem skizzierten Newtonverfahren ist es nun möglich, das Kalibrierverfahren herzuleiten und die Funktionsgleichungen $\vec{f}(\vec{x})$ aus den Kerngleichungen 6.1, 6.2 und 6.3 zu definieren. Diese Herleitung wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

6.2.2.2 Anwendung des nichtlinearen, mehrdimensionalen Newtonverfahrens für die Kalibrierung

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Anwendung des nichtlinearen, mehrdimensionalen Newtonverfahrens für die Kalibrierung. Ziel ist die Berechnung der Position und Orientierung des MHS in Bezug auf das Versuchsbauteilkoordinatensystem, das als Referenzkoordinatensystem bezeichnet wird. Die Abbildung 6.7 zeigt eine Gesamtübersicht der Kalibrierung mit den wichtigsten Schritten. Im Folgenden werden insbesondere die Prozesse ② und ③ näher beleuchtet, da diese den Kern der Kalibrierung darstellen. Die Bestimmung der notwendigen Eingabewerte ① erfolgt exemplarisch im Abschnitt 6.3.4 als Teil des Evaluierungsprozesses und wird aufgrund des fehlenden wissenschaftlichen Mehrwerts nur verkürzt dargestellt. Die im Schritt ④ aufgeführte Transformationsmatrix wurde bereits als Basis der Steuerungsfunktion im Abschnitt 6.2.1.2 vollständig definiert, wodurch eine weitere Betrachtung dieses Schrittes entfällt.

Im ersten Schritt des Kalibrierprozesses werden markante Punkte auf dem Prüfling bzw. Versuchsbauteil mit dem MHS angeleuchtet, deren genaue Koordinaten im Referenzkoordinatensystem aus den CAD-Konstruktionsdaten bekannt sind oder, wie später bei der Evaluierung im Abschnitt 6.3.1 gezeigt, mit externen Mess-

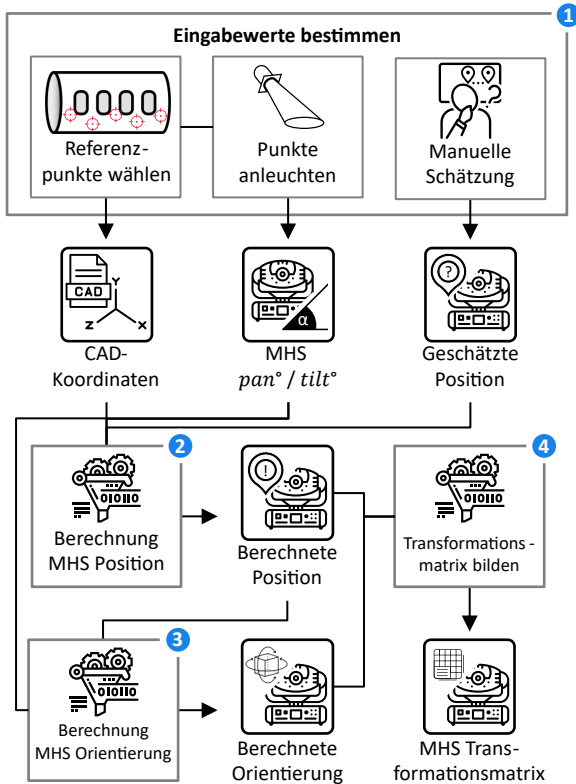


Abbildung 6.7: Flussdiagramm für den gesamten Kalibrierprozess.

geräten gemessen werden können. Es ist auch möglich, eine Teilmenge der Prüfpunkte auf dem Bauteil als Referenzpunkte zu verwenden, um zusätzlichen Aufwand für die Definition neuer Punkte nur zum Zweck der Kalibrierung zu vermeiden. Die Parameter der Bewegungsachsen des MHS werden gespeichert und dienen als Eingabewert zur Berechnung der Position und Orientierung des MHS relativ zum Referenzkoordinatensystem. Der Begriff „Kalibrierung“ wird nicht im Sinne einer Verbesserung der Systemgenauigkeit verwendet, wie dies bei Messsystemen der Fall ist, sondern in Analogie zur Kamerakalibrierung in der Computer Vision. Die abgeleitete Transformation ist vergleichbar mit den extrinsischen Parametern der Kamerakalibrierung.

Berechnung der Position des Moving Head Spots

Nachdem im ersten Schritt des Kalibrierprozesses die Referenzpunkte beleuchtet und ihre *pan*- und *tilt*-Werte gespeichert wurden, muss im zweiten Schritt die Position des Projektors berechnet werden. Dieser Schritt lässt sich wiederum in Teilschritte unterteilen (Abbildung 6.8).

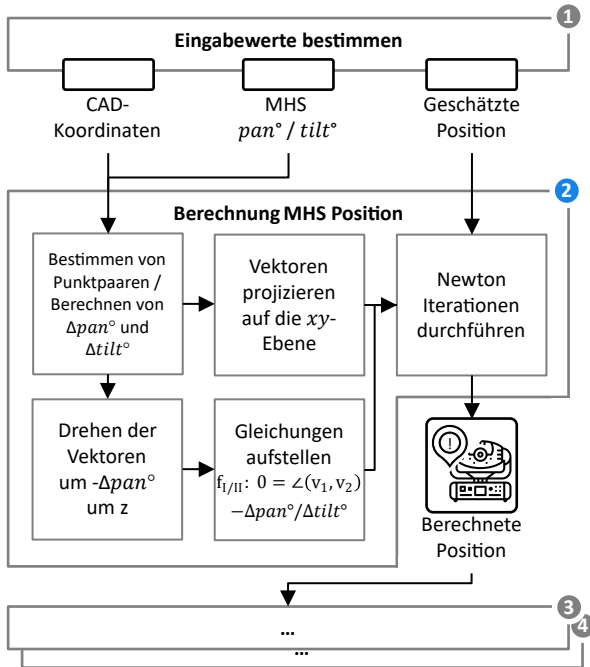


Abbildung 6.8: Flussdiagramm zur Bestimmung der Position des MHS aus den Referenzpunkten relativ zum Referenzkoordinatensystem.

Aus der Projektion, d. h. dem Lichtstrahl des MHS selbst, kann im Gegensatz zu anderen Projektionssystemen der Abstand zwischen Projektor und Prüfling nicht direkt bestimmt werden. Da die Drehung des MHS relativ zum Bezugskordinatensystem ebenfalls nicht bekannt ist, können die absoluten Drehwerte der Achsen *pan* und *tilt* nicht unmittelbar zur Berechnung der Position des MHS verwendet werden. Daher werden die Referenzpunkte in $\frac{N(N-1)}{2}$ duplikatfreie Punktepaare unterteilt, aus denen die Winkeldifferenzen Δpan und $\Delta tilt$ zwischen den beiden Punkten eines Paares berechnet werden können. Diese Winkeldifferenzen bestim-

men, wie weit sich jede Achse bewegen muss, um von einem Punkt zum anderen zu gelangen. Dadurch entfällt eine relative Betrachtung der Drehung in Bezug auf das Referenzkoordinatensystem. Darüber hinaus kann jeder Punkt über einen Verbindungsvektor im Referenzkoordinatensystem beschrieben werden, welcher zwischen dem MHS und dem Referenzpunkt definiert ist. Der Winkel zwischen den beiden Vektoren eines jeden Punktpaares kann in zwei Winkel zerlegt werden, die gleich den Winkeln Δ_{pan} und Δ_{tilt} der Steuerung des MHS sind. Da die Projektorposition zunächst nicht bekannt ist, können die zugehörigen Vektoren nicht direkt berechnet, sondern müssen iterativ ermittelt werden. Die unbekannte Projektorposition ${}^{Ref}\vec{P}_{MH}$ im Referenzkoordinatensystem wird als Iterationsvariable im \vec{x} -Vektor verwendet, wie in Gleichung 6.11 definiert. Die Iterationsvariablen können als symbolische Variablen betrachtet werden, sodass sie in der weiteren Berechnung genutzt werden können, ohne im Voraus bekannt zu sein.

$${}^{Ref}\vec{P}_{MH} = \begin{matrix} {}^{Ref} \\ \left(\begin{matrix} x_{MH} \\ y_{MH} \\ z_{MH} \end{matrix} \right) \end{matrix} \equiv \vec{x} \quad (6.11)$$

Die initial geschätzte Position des MHS $\vec{x}^{(0)}$ sollte nahe der tatsächlichen Projektorposition gewählt werden, da die Euler-Winkel mehr als eine Lösung zulassen, zu der der Iterationsalgorithmus konvergieren kann. Die Mindestanforderung für diese Schätzung ist, dass die Ausgangsposition auf der richtigen Seite des Prüflings liegen muss. Es gibt eine zweite, nicht optimale Lösung, die an einer durch die Referenzpunkte gebildeten Ebene gespiegelt ist. Jede Schätzung, die nur im Bereich von cm von der wahren Position abweicht, kann als ausreichend genauer Eingabewert angenommen werden. Bei einer festen oder wiederkehrenden Inbetriebnahme können auch zuvor berechnete Positionen verwendet werden. Eine Übersicht über die Punkte, Winkel und Vektoren für die folgenden Berechnungen ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

Die einzelnen Punkte in jedem Punktpaar aus der Gesamtanzahl N der Punkte werden durch n und m indiziert und unterliegen der Bedingung 6.12.

$$n, m \leq N \wedge n < m \quad (6.12)$$

Die Winkeldifferenzen in jedem Punktpaar werden gemäß den Gleichungen 6.13 und 6.14 berechnet.

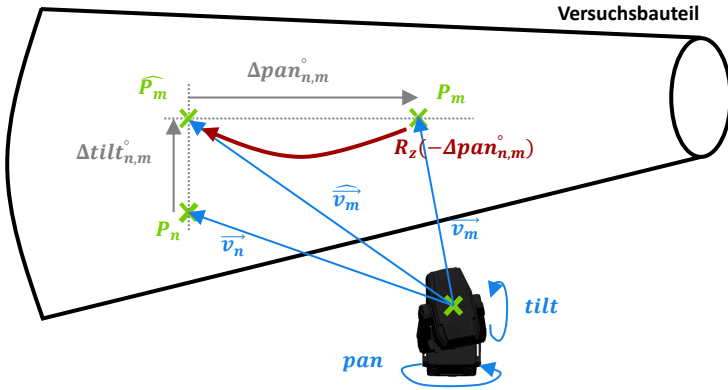


Abbildung 6.9: Visualisierung eines Punktpaares P_n, P_m , ihrer Verbindungsvektoren \vec{v}_n, \vec{v}_m und der Winkeldifferenzen $\Delta pan_{n,m}^\circ, \Delta tilt_{n,m}^\circ$. \hat{P}_m wurde um $R_z(-\Delta pan_{n,m}^\circ)$ in eine Ebene orthogonal zur xy -Ebene gedreht. Alle Punkte und Vektoren befinden sich im Ref Koordinatensystem.

$$\Delta pan_{n,m}^\circ = pan_m^\circ - pan_n^\circ \quad (6.13)$$

$$\Delta tilt_{n,m}^\circ = tilt_m^\circ - tilt_n^\circ \quad (6.14)$$

Die Verbindungsvektoren zwischen jedem Referenzpunkt und der Position des MHS sind in der Gleichung 6.15 mit $i = n, m$ definiert. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird der Index i verwendet, wenn eine Gleichung für n und m gilt und auf die Nutzung des tiefgestellten Index $_{MH}$ verzichtet.

$$^{Ref} \vec{v}_{MH,i} = ^{Ref} (\vec{P}_i - \vec{P}_{MH}) = \begin{pmatrix} x_i - x_{MH} \\ y_i - y_{MH} \\ z_i - z_{MH} \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} ^{Ref} \vec{v}_i \quad (6.15)$$

Wenn ein Teil des kombinierten Winkels wesentlich größer gewählt wird als der andere, hat der kleinere Teil bei der Berechnung des $arccos$ kaum Einfluss auf das Ergebnis. Daher ist die direkte Verwendung des Winkels zwischen $^{Ref} \vec{v}_n$ und $^{Ref} \vec{v}_m$ im dreidimensionalen Raum nicht vorteilhaft. Aus diesem Grund erfolgt eine Aufteilung in die Komponenten pan° und $tilt^\circ$.

Um die Komplexität dieser Zerlegung zu reduzieren, wird angenommen, dass die Ebenen $^{Ref} xy$ und $^{MH} xy$ parallel oder antiparallel sind. Grund hierfür ist, dass

Drehungen um drei Achsen unbestimmt sind, was bedeutet, dass verschiedene Lösungen für ein und dieselbe Orientierungsänderung existieren, wodurch ungünstige Ergebnisse bzw. Probleme bei der Iteration entstehen können. Da die Prüflinge in vielen Fällen in einer stationären Vorrichtung gehalten werden und der MHS leicht um diese Vorrichtung herum ausgerichtet werden kann, ist diese Annahme als gültig anzusehen.

Ausgehend davon können beide Punktpaarvektoren auf die Ebene ${}^{Ref}xy$ projiziert werden, um die Vektoren ${}^{Ref}\hat{v}_n$ und ${}^{Ref}\hat{v}_m$ in Gleichung 6.16 zu erhalten, die unabhängig von $tilt_i^\circ$ für $tilt_i^\circ \in [0^\circ, 90^\circ]$ sind.

$${}^{Ref}\hat{v}_i = {}^{Ref}(\mathbf{P} \cdot \vec{v}_i) = \begin{pmatrix} {}^{Ref} \\ \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \right) \\ {}^{Ref} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

Daher kann der Winkel zwischen ${}^{Ref}\hat{v}_n$ und ${}^{Ref}\hat{v}_m$ gleichgesetzt werden mit $\Delta pan_{n,m}^\circ$ aus Gleichung 6.13. Durch Umformung der Gleichung 6.17 in eine Nullgleichung wird der erste Satz von Funktionsgleichungen (6.18) für die Iteration definiert.

$$\Delta pan_{n,m}^\circ \equiv arccos \left({}^{Ref} \left(\frac{\hat{v}_n \cdot \hat{v}_m}{\|\hat{v}_n\| \cdot \|\hat{v}_m\|} \right) \right) \quad (6.17)$$

$$f_I : \quad 0 = arccos \left({}^{Ref} \left(\frac{\hat{v}_n \cdot \hat{v}_m}{\|\hat{v}_n\| \cdot \|\hat{v}_m\|} \right) \right) - \Delta pan_{n,m}^\circ \quad (6.18)$$

Für die Ableitung des $\Delta tilt_{n,m}^\circ$ -Winkels müssen beide Vektoren auf einer Ebene liegen, die orthogonal zur ${}^{Ref}xy$ -Ebene ist, wodurch sie unabhängig vom $\Delta pan_{n,m}^\circ$ -Winkel werden. Damit diese Bedingung erfüllt werden kann, wird der Vektor ${}^{Ref}\vec{v}_m$ um die Achse z um $-\Delta pan_{n,m}^\circ$ gedreht, wie in Abbildung 6.9 und Gleichung 6.19 gezeigt. In Verbindung mit dem resultierenden Vektor ${}^{Ref}\hat{v}_m$ wird ebenfalls der zugehörige Punkt ${}^{Ref}\vec{P}_m$ gedreht. Anders als in der vereinfachten Darstellung der Abbildung liegt der gedrehte Punkt ${}^{Ref}\hat{P}_m$ nicht mehr auf der Prüflingsoberfläche, da die Länge des Verbindungsvektors ($\|\hat{v}_m\| = \|v_m^\circ\|$) gleich bleibt. Dies hat keinen Einfluss auf die weiteren Berechnungen, da nur der Winkel zwischen den Vektoren relevant ist und die Vektoren in den Gleichungen 6.17 und 6.20 normalisiert werden.

$${}^{Ref} \hat{v}_m \stackrel{!}{=} \mathbf{R}_z(-\Delta pan_{n,m}^\circ)^T \cdot {}^{Ref} \vec{v}_m \quad (6.19)$$

Analog zur Gleichung 6.17 für $\Delta pan_{n,m}^\circ$ wird die Gleichung 6.20 für $\Delta tilt_{n,m}^\circ$ abgeleitet. Der zweite Satz von Funktionsgleichungen 6.21 für die Iteration ist dann äquivalent zu Gleichung 6.18, wobei der gedrehte zweite Vektor anstelle des projizierten Vektors verwendet wird.

$$\Delta tilt_{n,m}^\circ \equiv arccos \left({}^{Ref} \left(\frac{\vec{v}_n \cdot \hat{v}_m}{\|\vec{v}_n\| \cdot \|\hat{v}_m\|} \right) \right) \quad (6.20)$$

$$f_{II} : \quad 0 = arccos \left({}^{Ref} \left(\frac{\vec{v}_n \cdot \hat{v}_m}{\|\vec{v}_n\| \cdot \|\hat{v}_m\|} \right) \right) - \Delta tilt_{n,m}^\circ \quad (6.21)$$

Mit den beiden Funktionsgleichungen 6.18 und 6.21 kann die Position des MHS, die in Gleichung 6.11 definiert wurde, iterativ berechnet werden.

Berechnung der Orientierung des Moving Head Spots

Der dritte und letzte Schritt der Kalibrierung ist die Berechnung der Ausrichtung des MHS relativ zum Referenzkoordinatensystem. Die Teilschritte hiervon sind in Abbildung 6.10 gezeigt.

Zur Vervollständigung der endgültigen Transformationsmatrix zwischen dem Referenz- und dem MHS-Koordinatensystem, die in Abschnitt 6.2.1.2 (Gleichung 6.3) eingeführt wurde, muss die 3×3 -Drehmatrix ${}^{MH}_{Ref} \mathbf{R}$ berechnet werden. Da die Winkel der Drehungen noch nicht bestimmt sind, wird die Matrix mit den symbolischen Variablen α für die Drehung um die x -Achse und γ für die Drehung um die z -Achse aufgebaut. Die Drehung um die y -Achse entfällt in dieser Betrachtung, da auch hier die Annahme getroffen wird, dass die Ebenen ${}^{MH}xy$ und ${}^{Ref}xy$ parallel oder antiparallel sind. Dies führt zu der in Gleichung 6.22 dargestellten Transformationsmatrix. Dabei sind die Werte von α auf $\alpha = \{0^\circ, 180^\circ\}$ begrenzt und der Winkel γ kann jeden Wert im Bereich von $\gamma = [-180^\circ, 180^\circ[$ annehmen. Der \vec{x} -Vektor für die Iteration ist daher $\vec{x}^{(0)} = [\alpha, \gamma]^T$. Die Schätzung der Anfangswerte für $\vec{x}^{(0)}$ ist in diesem Fall für α aufgrund der diskreten Werte trivial. Für γ reicht eine grobe Schätzung aus.

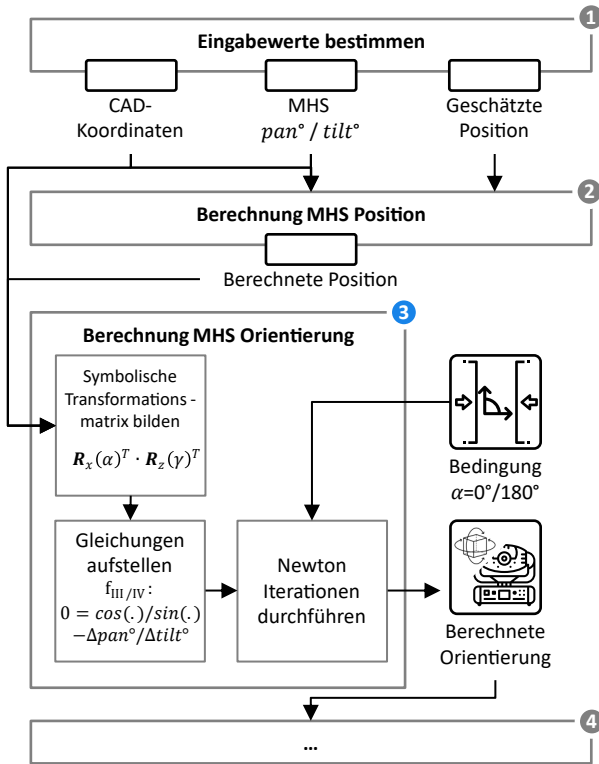


Abbildung 6.10: Flussdiagramm zur Bestimmung der Orientierung des MHS aus den Referenzpunkten und der berechneten Position relativ zur Ausrichtung des Referenzkoordinatensystems.

$${}_{Ref}^{MH} \mathbf{R}_{zx} = \mathbf{R}_z(\gamma)^T \cdot \mathbf{R}_x(\alpha)^T = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}^T \quad (6.22)$$

An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich die Bestimmung des Rotationswinkels γ unter der strikten Annahme paralleler oder antiparalleler Ebenen (${}^{MH}xy$ und ${}^{Ref}xy$) auch analytisch lösen ließe. Da die Position des MHS ${}^{Ref} \vec{P}_{MH}$ aus dem vorherigen Schritt bereits bekannt ist, könnten die Verbindungsvektoren zu den Referenzpunkten auf die xy -Ebene projiziert werden. Der Rotationswinkel γ ließe

sich anschließend mittels trigonometrischer Funktionen direkt berechnen. Dies könnte beispielsweise durch die Mittelung der Einzelergebnisse aller N Referenzpunkte erfolgen, wie in Gleichung 6.23 dargestellt:

$$\gamma_{analytisch} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\text{atan2}(\text{Ref } y_i - \text{Ref } y_{MH}, \text{Ref } x_i - \text{Ref } x_{MH}) - \text{pan}_i^\circ \right) \quad (6.23)$$

Trotz dieser rechnerisch effizienteren Alternative wird im Folgenden der iterative Lösungsansatz mittels Newton-Verfahren beibehalten. Dies gewährleistet zum einen die methodische Konsistenz zur vorangegangenen Positionsbestimmung. Zum anderen bietet das iterative Verfahren eine höhere Flexibilität gegenüber Abweichungen von der idealisierten Modellannahme. In der realen Anwendung ist eine exakte Parallelität der Ebenen, beispielsweise aufgrund von Montagetoleranzen an der Vorrichtung, nicht immer garantiert. Der iterative Ansatz minimiert den Gesamtfehler im 3D-Raum und lässt sich bei Bedarf methodisch konsistent auf komplexere Szenarien erweitern. Sollte die vereinfachende Annahme der Achsenparallelität nicht mehr zulässig sein, kann der Vektor der Iterationsvariablen \vec{x} einfach um den fehlenden Rotationswinkel (z. B. um die y -Achse) ergänzt werden, ohne dass ein gänzlich neuer Lösungsalgorithmus hergeleitet werden muss.

Unter Rückgriff auf die so definierte symbolische Rotationsmatrix lässt sich im nächsten Schritt die Gleichung 6.24 für den Translationsvektor $[t_x, t_y, t_z]^T$ der Transformationsmatrix aus der in Abschnitt 6.2.2.2 berechneten Position des MHS bestimmen.

$$\begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} - \mathbf{}_{Ref}^{MH} \mathbf{R}_{zx} \cdot \text{Ref } \vec{P}_{MH} \quad (6.24)$$

Mit der Rotationsmatrix und dem Translationsvektor ist die Transformationsmatrix $\mathbf{}_{Ref}^{MH} \mathbf{T}$ vollständig definiert. Sie kann verwendet werden, um die Referenzpunkte vom Referenzkoordinatensystem Ref in das Koordinatensystem des MHS MH zu transformieren (Abbildung 6.3). Der Transformationsschritt in Gleichung 6.25 ergibt die $[x_i, y_i, z_i]^T$ Koordinaten für den nächsten Berechnungsschritt.

$$\mathbf{}^{MH} \vec{P}_i = \mathbf{}_{Ref}^{MH} \mathbf{T} \cdot \text{Ref } \vec{P}_i \quad (6.25)$$

Die transformierten Referenzpunkte können nun zusammen mit den Werten pan° und tilt° aus den Referenzpunkten in Kombination mit den Gleichungen 6.1 und 6.2

verwendet werden, um den zweiten Satz von Funktionsgleichungen 6.26 und 6.27 für die nächste Iteration abzuleiten. Daraus ergeben sich $N(N - 1)$ Gleichungen für N Referenzpunkte.

$$f_{III} : \quad 0 = \operatorname{sgn}({}^{MH}y_i) \cdot \arccos \left(\left(\frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \right) \right) - \operatorname{pan}_i^\circ \quad (6.26)$$

$$f_{IV} : \quad 0 = \arcsin \left(\frac{{}^{MH}z_i}{\| \vec{P}_i \|} \right) - \operatorname{tilt}_i^\circ \quad (6.27)$$

Mit dem zweiten Satz von Gleichungen und der anfänglichen Schätzung der Orientierungswinkel $\vec{x}^{(0)}$ kann die Orientierung des MHS relativ zum Ursprung des Referenzkoordinatensystems berechnet werden, was zur endgültigen Transformation zwischen dem MHS und dem Referenzkoordinatensystem führt und damit den Kalibrierprozess abschließt. Im folgenden Abschnitt wird die softwaretechnische Umsetzung der Kalibrierungsansätze beschrieben. Ziel ist es dabei, die Funktionen der Kalibrierung für den Anwendenden mithilfe einer Benutzeroberfläche nutzbar zu machen und damit den praktischen Kalibrierprozess zu befähigen.

6.2.2.3 Softwaretechnische Umsetzung der Steuerung und Kalibrierung

Der Ansatz zur Umsetzung der Funktionen, die für die Steuerung und Kalibrierung notwendig sind, folgt analog zu Kapitel 4 einer Server-Client-Architektur. Ebenso werden für die Umsetzung entsprechende webbasierte Technologien eingesetzt.

Für die Entwicklung wird in diesem Fall Node-RED [475] eingesetzt, das als visuelle Entwicklungsplattform die Erstellung ereignisgesteuerter IoT-Anwendungen ermöglicht [476]. Dazu verwendet Node-RED eine browserbasierte Bedienoberfläche („Flow-Editor“), in der Knoten (Nodes) per Drag & Drop angeordnet und über Kanten (Edges) miteinander verbunden werden, um Applikationen (Flows) zu definieren und zu orchestrieren. Allerdings basieren die Funktionsblöcke von Node-RED auf JavaScript und diese sind für eine Implementierung mathematischer Algorithmen nur bedingt zielführend. Daher wird die Basisversion von Node-RED um eine Python-Shell-Node [477] erweitert. Diese erlaubt das Aufrufen von Python-Skripten, in denen die gezeigten Algorithmen für Steuerung und Kalibrierung einfach implementiert werden können.

Durch diese Umsetzung entsteht eine Weboberfläche, die plattformunabhängig genutzt werden kann. Dadurch kann der Kalibrierprozess auf einem beliebigen

gen Endgerät durchgeführt werden. Neben den Softwarekomponenten sind für die Umsetzung ein Mikrocontroller als MQTT-Schnittstelle für die Annahme der Steuerbefehle sowie eine DMX-Ethernet-Schnittstelle (Abschnitt A.3.2) mit direkter Verbindung zum MHS notwendig. Der Datenfluss zwischen der Node-RED-Oberfläche, den Python-Skripten und der externen Netzwerkkommunikation ist in Abbildung 6.11 dargestellt.



Abbildung 6.11: Übersicht über die Soft- und Hardwarekomponenten für die Steuerung und Kalibrierung.

Die resultierende Bedienoberfläche ist aus Gründen der Lesbarkeit in die Abbildungen 6.12 und 6.13 aufgeteilt. Das Ziel der Bedienoberfläche ist im Wesentlichen den Kalibrierprozess aus Abbildung 6.7 für den Prüfenden bzw. die Arbeitsvorbereitung zu ermöglichen. Dabei ermittelt der Benutzende die DMX-Werte für *pan* und *tilt* durch das Anleuchten der Referenzpunkte. Die Referenzpunkte werden in diesem Fall durch ein externes System (z. B. CAD) als gegeben angenommen. Aktuell können diese über den Knopf „Datei auslesen“ in Abbildung 6.13 importiert werden, wodurch die X-, Y- und Z-Koordinaten für jeden Referenzpunkt in der Tabelle „Kalibrierungspunkte“ befüllt werden. Für das Anleuchten der Referenzpunkte stehen die zwei Funktionsbereiche in Abbildung 6.12 zur Verfügung.

Der Funktionsbereich „Jogging“ beruht auf der Steuerung des MHS auf Basis der DMX-Kanalwerte. Die Elemente der Bedienoberfläche sind dabei direkt an das Python-Modul zur Übersetzung der Eingaben in Steuerbefehle („MHS-DMX Netzwerkschnittstelle“) gekoppelt, sodass jede Wertänderung an der Bedienoberfläche

Moving Head Steuerung

Jogging

An-/Ausschalten

Tilt 204

Finetilt 11

Pan 26

Finepan 255

Farbe White

Lichtintensität 116

Blende 1

Zoom 99

Fokus 43

ZURÜCKSETZEN

XY Jogging

Bewegung in X-Richtung

- 1	- 1	- 0,1	- 1MM	+ 1MM	+ 0,1	+ 1	+ 1
-----	-----	-------	-------	-------	-------	-----	-----

Bewegung in Y-Richtung

- 1	- 1	- 0,1	- 1MM	+ 1MM	+ 0,1	+ 1	+ 1
-----	-----	-------	-------	-------	-------	-----	-----

Bewegung in Z-Richtung

- 1	- 1	- 0,1	- 1MM	+ 1MM	+ 0,1	+ 1	+ 1
-----	-----	-------	-------	-------	-------	-----	-----

Aktuelle Position: **X: 0.000m Y: 0.000m Z: 0.000m**

Um die Grundausrüstung zu erleichtern, kann die generische Transformationsmatrix auf verschiedene Ursprünge eingestellt werden. Wenn Sie die Matrix ändern, zeigt der MHS auf den Ursprung des neuen Koordinatensystems, um beim XY-Jogging zu helfen.

WARNUNG: Die Winkel verhalten sich möglicherweise nicht so, wie Sie es erwarten würden! Es ist nur ein Hilfsmittel!

GENERISCHE MATRIX		BERECHNETE MATRIX			
-90°	-45°	0°	+45°	+90°	0° X
-90°	-45°	0°	+45°	+90°	90° Z

Abbildung 6.12: Bedienoberfläche zur Kalibrierung des MHS (1/2).

zu einer visuell wahrnehmbaren Reaktion am realen MHS führt. Im Python-Modul dient das ESP-Protokoll von ENTTEC [478] als Basis zur Übermittlung der Steuerbefehle an den MHS. Auf diese Weise können der Lichtpunkt bewegt sowie der Fokus entsprechend der Distanz und die Farbe entsprechend dem Prüfergebnis variiert werden.

Der Funktionsbereich „XY Jogging“ in Abbildung 6.12 ist für die lineare Bewegung des MHS vorgesehen. Die Ausrichtung des Lichtstrahls auf ein Ziel mit den grundlegenden Winkelsteuerungen durch *pan* und *tilt* ist in der Regel nicht intuitiv und daher nur mit erhöhtem Zeitaufwand erfolgreich zu bewerkstelligen.

Daher kann eine generische Transformation mit konfigurierbarer Basisrichtung für lineare Bewegungen herangezogen werden. Die Koordinaten aus der generischen Transformation stellen kein spezifisches Koordinatensystem dar, sondern können dazu dienen, die richtigen *pan* und *tilt* Werte für den Kalibrierprozess zu ermitteln. Nach Abschluss der Kalibrierung lässt sich zudem die berechnete Transformationsmatrix nutzen, um Bewegungen im Koordinatensystem des Prüflings auszuführen.

Kalibrierungspunkte

	Pan	Finepan	Tilt	Finetilt	Focus	X in m	Y in m	Z in m
P1	192	202	45	84	255	-1.7443	0.2477	-0.3072
P2	185	246	55	235	255	-1.6257	0.5788	-0.2365
P3	173	29	62	0	255	-1.5049	1.0239	-0.1801
P4	160	209	65	190	255	-1.3521	1.4272	-0.0178
P5	150	226	58	10	255	-1.2126	1.9556	0.1109
P6	153	73	50	73	255	-1.3299	1.9238	-0.0744
P7	160	36	52	166	255	-1.4477	1.5623	-0.181
P8	172	22	50	241	255	-1.6119	1.1009	-0.3073
P9	180	236	44	190	255	-1.7302	0.7689	-0.3858
P10	189	52	35	0	255	-1.8702	0.3832	-0.4739
P11	160	170	45	225	255	-1.5453	1.6221	-0.2528

Punktkoordinaten: X in m Y in m Z in m PUNKT HINZUFÜGEN

Punktsteuerung: Wähle Punkt... BEWEGEN AKTUALISIEREN LÖSCHEN

Geschätzte Projektorposition: X in m Y in m Z in m

BERECHE TRANSFORMATION DATEI AUSLESEN IN DATEI SPEICHERN

Abbildung 6.13: Bedienoberfläche für die Kalibrierung des MHS (2/2).

Der Funktionsbereich „Kalibrierungspunkte“ in Abbildung 6.13 zeigt, welche Referenzpunkte bereits bearbeitet wurden. Im dargestellten Beispiel sind alle 11 Punkte erfolgreich erfasst und die entsprechenden Werte für *pan* und *tilt* hinterlegt. Der darüber hinaus notwendige Eingabewert der geschätzten Projektorposition im Koordinatensystem des Prüflings kann über manuelle Eingabefelder für jede Achskoordinate getätigt werden. Wenn diese Angaben vollständig in der Bedienoberfläche erfasst sind, kann die Berechnung der Transformationsmatrix über die entsprechend gekennzeichnete Schaltfläche gestartet werden. Nach Abschluss wird der Benutzende über ein Pop-Up informiert. Diese Transformationsmatrix wird automatisch für den ausgewählten MHS hinterlegt und als Basis für die Ansteuerung verwendet. Sonstige dargestellte Schaltflächen dienen lediglich der Realisierung von Hilfsfunktionen zur Datenverwaltung oder zum Überschreiben bzw. Löschen bereits angefahrener Referenzpunkte.

Die vorgestellte Bedienoberfläche ermöglicht es, den Kalibrierprozess vollständig zu durchlaufen, wobei generische Steuerungsfunktionen zur Erfassung von *pan* und *tilt* genutzt werden. Angesichts der Vielzahl dargestellter Elemente ist die Verwendung eines Endgeräts mit einer Bildschirmdiagonale von mindestens 28 cm (z. B. ein handelsübliches Tablet) zu empfehlen.

Nachdem der Kalibrierprozess nun über eine Bedienoberfläche grundsätzlich durchführbar ist, gilt es nun, die Genauigkeit und damit die industrielle Anwendbarkeit der bisher gezeigten Kalibrierungsansätze und der daraus resultierenden Transformation zu überprüfen. Dafür erfolgt im folgenden Abschnitt eine Evaluierung.

6.3 Evaluierung von Fehlerquellen und Genauigkeiten bei der Projektion

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 die Steuerung und Kalibrierung des MHS entwickelt und umgesetzt wurden, ist Ziel dieses Abschnitts eine Evaluierung verschiedener Aspekte in Bezug auf die Qualifizierung des MHS als Informationsausgabekomponente. Da die erreichbare Projektionsgenauigkeit die Grundlage für die Positionierung im Forschungsfeld und für die industrielle Anwendbarkeit des MHS bildet, wird darauf ein besonderes Augenmerk gelegt. Mit Hilfe einer Flugzeughecksektion als Versuchsbauteil (Abbildung 6.14) wird der Kalibrierprozess aus Abbildung 6.7 durchlaufen. Dabei werden mögliche Fehlerquellen im Prozess näher beleuchtet. Hierfür werden sowohl die mechanischen Grenzwer-

te der verwendeten Hardware als auch die algorithmische Genauigkeit untersucht. Da jede dieser Fehlerquellen zum Gesamtfehler beiträgt, ist es notwendig, jeden möglichen Fehlerbeitrag zu bewerten und die Auswirkung auf die Projektion zu beurteilen. Den Abschluss bildet eine praktische Evaluierung zur Bestimmung der erreichbaren Projektionsgenauigkeiten auf dem verwendeten Versuchsbauteil unter Miteinbezug der Lichtpunktverzerrung. Dadurch können die theoretischen Grenzen in Bezug zu der realen Genauigkeit gesetzt werden.



Abbildung 6.14: Versuchsbauteil zur Evaluierung der Projektionsgenauigkeit. Es handelt sich um eine Flugzeughecksektion, die in einer Vorrichtung aus Aluminiumprofilen aufgehängt ist.

6.3.1 Erfassen der Referenzpunkte und Aufnahme der Pan- und Tiltwerte

Ein wesentlicher Input für den im Abschnitt 6.2.2.2 beschriebenen Kalibrierprozess sind Referenzpunkte. Hierbei bieten sich visuell markante Punkte oder Elemente des Prüflings an, deren 3D-Koordinaten leicht aus dem CAD-Modell entnehmbar sind. Für das in Abbildung 6.14 gezeigte Versuchsbauteil liegen keine CAD-Daten vor, weshalb die Punktekoordinaten mithilfe eines externen Messsystems manuell bestimmt werden. Da CAD-Modelle im industriellen Kontext üblicherweise verfügbar sind, stellt dieses Vorgehen daher nicht den bevorzugten Ansatz dar.

Als externes Messsystem zur Erfassung der Positionen der Referenzpunkte wird ein Leica LTD800 Lasertracker verwendet, der laut Datenblatt des Herstellers eine spezifizierte Messgenauigkeit von weniger als 50 µm im optimalen Messbereich bietet [479], [480]. Diese Genauigkeit übersteigt die zu erwartende Genauigkeit des MHS bei weitem und wird daher als ausreichende Referenz angenommen.

Als Referenzpunkte werden Niete in markanten Positionen gewählt, z. B. am Schnittpunkt einer horizontalen und vertikalen Nietreihe. Da Nietköpfe über die Oberfläche hinaus ragen, sind sie leicht von der Oberfläche selbst zu unterscheiden. Auf Papier gedruckte Zielscheiben werden über die Niete gelegt, um die Zentrierung des Lichtflecks zu erleichtern (Abbildung 6.15). Darüber hinaus dienen diese Zielscheiben als Hilfsmittel zur Bestimmung der Lichtpunktverzerrung und helfen bei der Erfassung von Abweichungen bei wiederholtem Anleuchten der Referenzpunkte. Die Aufnahme der Referenzpunkte erfolgt über die Platzierung von 3D-gedruckten Aufsätzen für die Niete, welche die Lasertracker-Targets aufnehmen können. Damit können die Mittelpunkte der entsprechenden Zielscheiben ermittelt werden.

Nach Festlegung der Referenzpunkte werden unter Verwendung der kleinsten Blende die Pan- und Tiltwerte sowie Finepan- und Finetiltwerte des MHS mithilfe der in Abbildung 6.12 dargestellten Bedienoberfläche so manipuliert, dass der Lichtfleck jeweils mittig auf die Referenzpunkte fällt. Die DMX-Werte für *pan*, *finepan*, *tilt* und *finetilt* beim Anleuchten jedes Referenzpunktes werden gespeichert und in der Übersicht aus Abbildung 6.13 angezeigt. Eine vollständige Auflistung der Koordinaten der Referenzpunkte und der dazugehörigen DMX-Werte ist in Tabelle A.10 gegeben.

Dabei ist zu beachten, dass dieses Verfahren nur eine begrenzte Genauigkeit bietet, da der Lichtpunkt sowohl durch den Einfallswinkel als auch durch die Krümmung der Projektionsoberfläche in den meisten Fällen deutlich von einem perfekten Kreis abweicht. Auf einer ebenen Fläche, die nicht senkrecht zum Lichtstrahl steht, wür-

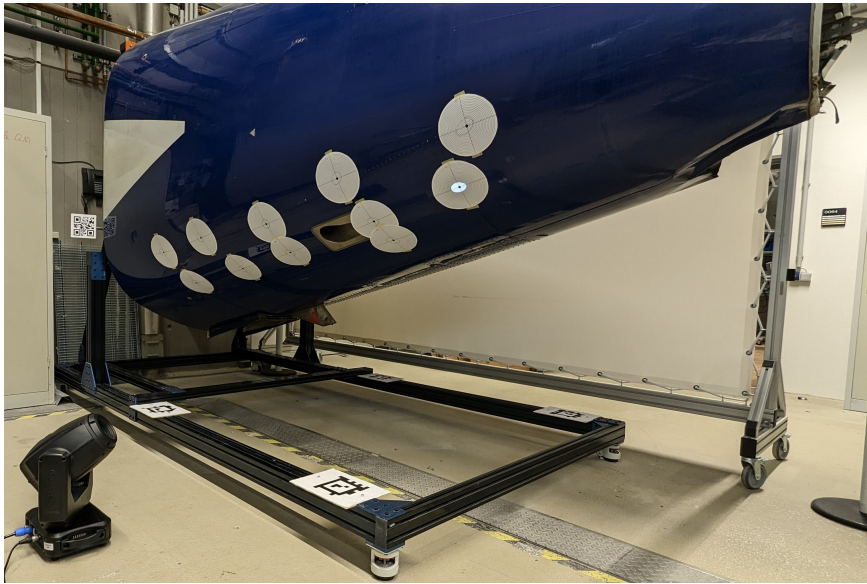


Abbildung 6.15: Auf der Flugzeughaut angebrachte Zielscheiben (weiß) zur Visualisierung der Referenzpunkte.

de der Lichtfleck zu einer unsymmetrischen Ellipse werden. Auf der gekrümmten Fläche des hier verwendeten Versuchsbauteils ist die resultierende Form jedoch nicht mehr ohne weiteres parametrisierbar. Der Effekt dieser Lichtpunktverzerrung ist in Abbildung 6.16 schematisch dargestellt. Daher sollten die Pan- und Tiltwerte der Referenzpunkte nur als Best-Effort-Wert mit einer Unsicherheit im mm -Bereich betrachtet werden.

6.3.2 Mechanische Grenzwerte

6.3.2.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung der mechanischen Grenzwerte

Zur Bestimmung der mechanischen Grenzwerte wird das Lichtprojektionssystem (MHS) in Anlehnung an Industrierobotersysteme evaluiert. Da das System jedoch keinen physischen Endeffektor (TCP) besitzt, sondern einen Lichtstrahl projiziert, müssen die Genauigkeitskonzepte der ISO-Norm 9283 [436] auf die Projektions-treue übertragen werden.

- Absolutgenauigkeit: Sie beschreibt die Übereinstimmung der Projektion mit dem Ground Truth. Der Ground Truth ist hierbei die Soll-Koordinate des Projek-

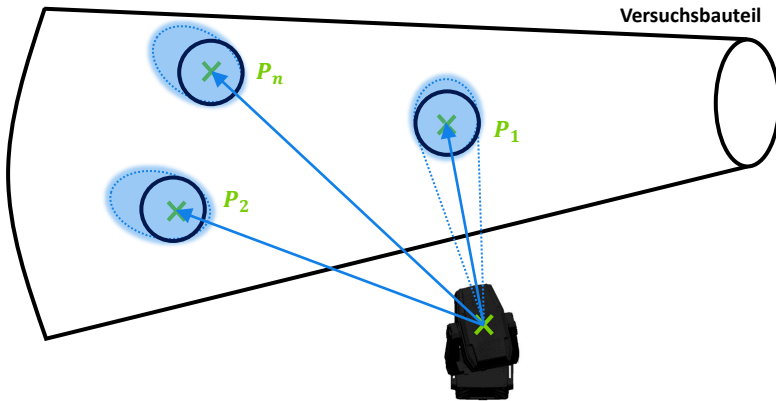


Abbildung 6.16: Schematische Darstellung der Lichtpunktverzerrung auf der Bauteiloberfläche an verschiedenen angefahrenen Projektionspunkten.

tionsmittelpunktes auf der Bauteiloberfläche, wie sie durch das digitale Modell vorgegeben wird. Die Absolutgenauigkeit ist das Maß für die Distanz zwischen dieser Soll-Koordinate und dem Mittelwert der Mittelpunkte aller tatsächlich erzielten Projektionen. Sie repräsentiert die Richtigkeit der Projektion und ist maßgeblich von der Qualität der räumlichen Transformation abhängig.

- **Wiederholgenauigkeit:** Sie beschreibt die Streuung der Projektionsmittelpunkte um ihren eigenen gemeinsamen Mittelwert bei wiederholter Anfahrt derselben Zielwerte. Sie ist ein Maß für die mechanische Präzision. Während die ISO-Norm hierfür eine Anfahrt unter identischen Bedingungen vorsieht, wird das Konzept für diesen Versuch praxisnah erweitert: Die Ziel-Ansteuerwerte werden aus unterschiedlichen Richtungen und Distanzen angefahren. Damit wird nicht nur die reine Präzision, sondern auch der Einfluss von mechanischem Spiel und der Dynamik erfasst. Die resultierende Streuung definiert somit die physikalische Grenze der Reproduzierbarkeit des Lichtpunktes auf der Oberfläche unter realen Einsatzbedingungen.

Da die Absolutgenauigkeit maßgeblich von der Qualität der mathematischen Transformation und Kalibrierung beeinflusst wird, konzentriert sich diese Evaluierung primär auf die Wiederholgenauigkeit. Sie stellt die kritische mechanische Grundvoraussetzung dar: Während systematische Abweichungen der Absolutgenauigkeit softwareseitig korrigiert werden können, lassen sich mechanische Streuungen der Projektionsmittelpunkte (z. B. durch Getriebespiel) nicht kompensieren. Um ei-

ne quantitative Bewertung dieser Streuung unter realistischen Bedingungen zu erhalten, wird ein Versuch entsprechend der Abbildung 6.17 konzipiert. Dafür wird eine Zielscheibe mit einem definierten Mittelpunkt eingesetzt (Abbildung 6.18). Zunächst wird der Lichtstrahl des MHS manuell so ausgerichtet, dass der Projektionsmittelpunkt exakt mit dem Zentrum der Zielscheibe übereinstimmt. Die entsprechenden DMX-Werte dienen als Referenz-Ansteuerwerte für die Zielposition. Durch dieses Vorgehen wird die Absolutgenauigkeit für diesen spezifischen Punkt auf Null gesetzt, sodass im folgenden Experiment ausschließlich die mechanische Reproduzierbarkeit (Wiederholgenauigkeit) gemessen wird. Anschließend wird der Lichtpunkt zu variierenden Startpositionen auf einem konzentrischen Kreis um diesen Mittelpunkt bewegt, welche in Abbildung 6.17 als „Startpunkt der Bewegung“ benannt sind. Von diesen unterschiedlichen Positionen aus wird die Zielposition erneut angesteuert. Die dadurch entstehenden Abweichungen der Projektionsmittelpunkte vom Referenzzentrum sind in Abbildung 6.17 als „Endpunkt der Bewegung“ gekennzeichnet. Während der Versuchsdurchführung werden diese Abweichungen systematisch aufgezeichnet. Zudem werden die Startpunkte in variierenden Abständen definiert.

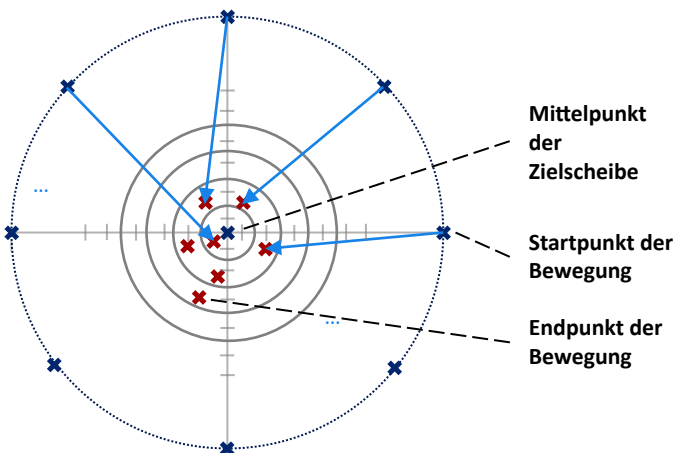


Abbildung 6.17: Prinzipschaubild des Versuchs zur Bestimmung der Genauigkeit der Projektion.

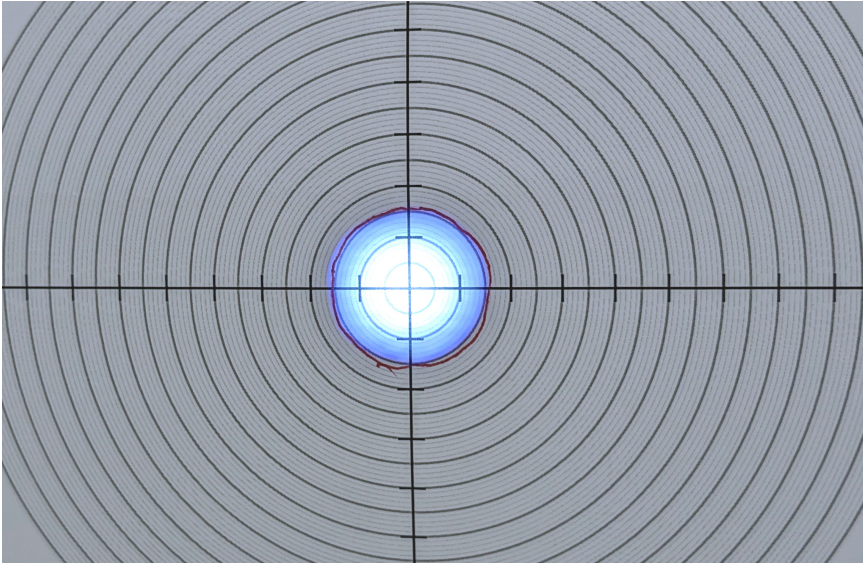


Abbildung 6.18: Lichtpunkt auf der Zielscheibe (hellgraue Kreise: 1mm, schwarze Kreise: 5mm), roter Kreis markiert die Ausgangsposition des Lichtpunktes. Ungenauigkeiten entstehen durch einen unebenen Hintergrund .

6.3.2.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse zur Ermittlung der mechanischen Grenzwerte

Die experimentelle Ermittlung der Wiederholgenauigkeit erfolgt durch eine systematische Testmatrix. Hierzu werden Gruppen von jeweils acht Startpunkten definiert, die in einem gleichmäßigen Winkelraster von 45° auf konzentrischen Kreisen um die Soll-Koordinate angeordnet sind (Abbildung 6.17). Diese radialsymmetrische Anordnung stellt sicher, dass die Zielposition aus allen Bewegungsrichtungen der Pan- und Tilt-Achsen angefahren wird, um richtungsabhängige Einflüsse wie das Getriebeispiel (Backlash) omnidirektional zu erfassen.

Um das System unter verschiedenen dynamischen Lastprofilen zu prüfen, werden die Radien dieser Kreise variiert:

- Große Distanzen ($> 1\text{ m}$): Die Achsen erreichen hierbei ihre maximale Verfahrensgeschwindigkeit, wodurch die Wiederholbarkeit unter dem Einfluss vollständiger Beschleunigungs- und Bremsrampen evaluiert wird.

- Minimale Distanz (5 mm): Diese dient der Untersuchung von Inkrementalbewegungen, bei der primär die mechanische Auflösung der Schrittmotoren und Haftreibungseffekte (Stick-Slip) dominiert.

In der initialen Evaluierung mittels der Zielscheibe konnten bei keiner der gewählten Distanzen mit dem Auge wahrnehmbare Abweichungen der Projektionsmittelpunkte vom markierten Zentrum festgestellt werden. Da die mechanische Präzision des MHS die visuelle Auflösung der Zielscheibe übertraf, wurde der Versuchsaufbau für eine quantitative Analyse um ein externes Hochpräzisionsmessgerät erweitert.

Dafür wird ein Retroreflektor des Lasertrackers aus Abschnitt 6.3.1 direkt am Projektorkopf befestigt. Die Versuchsdurchführung erfolgt mit einer Verteilung der Startpunkte auf einem konzentrischen Kreis mit dem Radius 0,5 m. Nach jeder Rückkehr in die Mitte des Ziels wurde die Position des Retroreflektors mit dem Lasertracker gemessen. Die Messungen und Ergebnisse sind in der Tabelle A.9 aufgelistet. Diese gemessenen Standardabweichungen von $\sigma_x = 79,79 \mu\text{m}$, $\sigma_y = 19,30 \mu\text{m}$ und $\sigma_z = 107,88 \mu\text{m}$ beziehen sich auf die mechanische Position des Projektorkopfes. Da der Projektorkopf die Quelle des Lichtstrahls darstellt, korreliert diese minimale mechanische Varianz direkt mit der Stabilität der Projektionsmittelpunkte auf der Zielfläche. Die Ergebnisse belegen eine extrem hohe Wiederholgenauigkeit des Gesamtsystems und legen nahe, dass die mechanische Wiederholgenauigkeit des MHS die für die Anwendung erforderliche Präzision bei weitem übertrifft.

6.3.3 Algorithmische Genauigkeit des gewählten Kalibrierungsansatzes

Angesichts der hohen mechanischen Genauigkeit, die im vorherigen Abschnitt im Experiment zur Wiederholgenauigkeit des MHS ermittelt wurde, wird der Schwerpunkt nun auf die Bewertung potenzieller Fehlergrößen und -quellen gelegt, die sich aus dem Kalibrierungsansatz aus Abschnitt 6.2.2 des Projektionssystems ergeben. Ziel ist die Bewertung des Transformationsschätzungsfehlers, welcher sich aus den Fehlern in der Schätzung der Position und Orientierung des MHS aus Abschnitt 6.2.2.2 zusammensetzt.

6.3.3.1 Metriken zur Beschreibung der algorithmischen Genauigkeit

Iterative Algorithmen, bei denen die Eingabedaten inhärenten Messfehlern unterliegen, können keine perfekte Lösung liefern. Das Funktionsprinzip strebt die bestmögliche Erfüllung der vorgegebenen Metriken an (sofern dies generell möglich ist und eine Konvergenz erreicht werden kann). Die Metriken des vorgestellten

Algorithmen sind die Gleichungen 6.18, 6.21, 6.26 und 6.27. Eine „bestmögliche“ Erfüllung dieser Gleichungen stellen Werte dar, die möglichst nah an 0 liegen. Es wird davon ausgegangen, dass die Fehler klein sind, sodass nichtlineare Eigenschaften der Fehler vernachlässigt werden und die Mittelwerte für mögliche systematische Fehler sowie die Standardabweichung für potenzielle Ausreißer betrachtet werden können. Da der Mittelwert und die Standardabweichung der Schätzung der Position des MHS in den Gleichungen 6.18 und 6.21 aus der Winkeldifferenz zwischen zwei Vektoren stammen, ist es nicht möglich, sie direkt mit der Positionsgenauigkeit zu korrelieren. Es ist jedoch möglich, die Qualität des Ergebnisses anhand der Schrittweite des MHS zu beurteilen. Im Idealfall liegt der Fehler unterhalb der mechanischen Schrittweite des MHS. In diesem Fall übertrifft die Genauigkeit des Algorithmus die physikalische Auflösung der Hardware, was als Nachweis für seine Eignung im vorgesehenen Anwendungsfall gewertet werden kann.

Für die Analyse des Transformationsschätzungsfehlers wird davon ausgegangen, dass der Positionsfehler klein ist und dass der Lichtstrahl senkrecht auf eine ebene Fläche trifft, sodass keine Lichtpunktverzerrung entsteht. Da die genaue Oberfläche vernachlässigt wird und aus dem Winkelfehler keine Entfernungsinformationen abgeleitet werden können, ist es nicht möglich, sinnvolle kartesische Koordinaten zu rekonstruieren. Daher ist es zweckmäßig, die Winkelfehler des Schwenk- und Neigungswinkels jedes Referenzpunktes zu einem einzigen Winkelfehler zu kombinieren, wie in Gleichung 6.28 dargestellt.

$$\Delta_{\text{kombiniert}}^{\circ} = \arccos(\cos(\Delta_{\text{pan}}^{\circ}) * \cos(\Delta_{\text{tilt}}^{\circ})) \quad (6.28)$$

Mit diesem kombinierten Winkelfehler $\Delta_{\text{kombiniert}}^{\circ}$ kann der Punktpositionsfehler e als Kreis um den wahren Mittelpunkt eines Referenzpunktes P_n berechnet werden (Gleichung 6.29), wie in Abbildung 6.19 dargestellt. Der Abstand d wird aus der geschätzten Position des MHS und den kartesischen Koordinaten des Referenzpunktes P_n ermittelt. Aus den Positionsfehlern der einzelnen Punkte können ein Mittelwert und eine Standardabweichung berechnet werden, um die Qualität des Endergebnisses zu bewerten.

$$e = d \cdot \sin(\Delta_{\text{kombiniert}}^{\circ}) \quad (6.29)$$

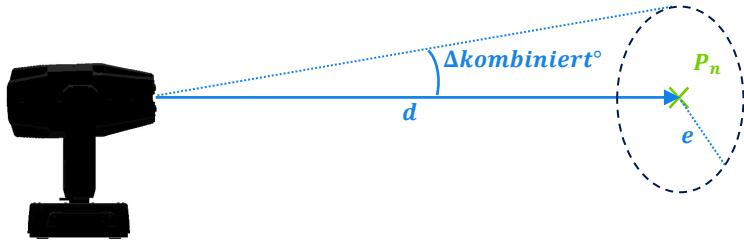


Abbildung 6.19: Darstellung des Punktpositionsfehlers e als Kreis um den Referenzpunkt P_n ausgehend von dem Winkelfehler $\Delta_{\text{kombiniert}}^\circ$.

6.3.3.2 Berechnung der Metriken und Ergebnisse

Als Eingabewerte für den Kalibrieralgorithmus werden die Referenzpunkte aus Tabelle A.10 genutzt, wodurch sich für den zugrundeliegenden Anwendungsfall die Transformationsmatrix in A.3.3.3 ergibt. Die berechneten Mittelwerte, Standardabweichungen und äquivalenten Schrittzahlen sind in der Tabelle 6.2 für die Positions- und Transformationsschätzung sowie für den Punktpositionsfehler aufgeführt. Die Werte der Positionsschätzung deuten auf ein ausreichend genaues Ergebnis hin, wobei der *pan*-Winkel genauer ist als der *tilt*-Winkel. Nach der Transformationsschätzung ist ein großer Fehler im Mittelwert des *tilt*-Winkels zu beobachten, während der *pan*-Winkelfehler in der gleichen Größenordnung bleibt. Diese Abweichung überträgt sich auf den Punktpositionsfehler, wobei der Mittelwert viel größer ist als die Standardabweichung.

Gleichung	Winkel	μ	σ	μ_{steps}	σ_{steps}
6.18: f_I	Δ_{pan}	$-0,01492^\circ$	$0,1557^\circ$	1,80	18,82
6.21: f_{II}	Δ_{tilt}	$0,01748^\circ$	$0,2026^\circ$	6,36	73,75
6.26: f_{III}	Pan	$0,05552^\circ$	$0,1056^\circ$	6,71	12,77
6.27: f_{IV}	Tilt	$-1,0343^\circ$	$0,1406^\circ$	$-376,52$	51,18
6.29: e	Kombiniert	26,4 mm	4,82 mm	-	-

Tabelle 6.2: Ergebnisse der algorithmischen Genauigkeitsanalyse der Positions- und Transformationsschätzung sowie des kombinierten Punktpositionsfehlers.

Der geringe Fehler bei der Positionsschätzung deutet darauf hin, dass ein Ergebnis mit einer adäquaten Anpassung für die gegebenen Eingabewerte gefunden wird, das jedoch von der wahren Projektorposition abweicht und daher zu der Mittelwertabweichung im *tilt*-Winkel führt.

Zur genaueren Untersuchung wird die geschätzte Projektorposition manuell nachjustiert. Dadurch zeigt sich, dass die z -Komponente die Ursache für die Ungenauigkeit ist. Eine Hypothese für die Ursache dieser Ungenauigkeit ist der viel größere pan -Winkelbereich der Referenzpunkte im Vergleich zum $tilt$ -Winkelbereich (Tabelle A.10), da die x - und y -Komponenten genau sind und eine stärkere Korrelation mit dem pan -Winkel aufweisen. Diese Hypothese wird durch die Tatsache gestützt, dass die Genauigkeit des Ergebnisses zunimmt, wenn Referenzpunkte mit einem insgesamt kleineren pan -Bereich ausgewählt werden, obwohl die Gesamtzahl der Punkte verringert wird. Da es sich hierbei um das Ergebnis eines qualitativen, manuellen Abstimmungsprozesses handelt, werden die Ergebnisse aufgrund ihrer begrenzten Allgemeingültigkeit nicht im Detail beschrieben. Es lassen sich dadurch aber praktische Handlungsempfehlungen für den Kalibrierprozess ableiten. Insgesamt sollte bei der Auswahl der Referenzpunkte besonders darauf geachtet werden, dass die Winkel von pan und $tilt$ in einem ähnlichen Bereich liegen, damit die Voraussetzungen für eine Positionsschätzung des Algorithmus begünstigt werden. Die Auswirkung von Schwingungen um ein Ergebnis kann mit dem Dämpfungsfaktor α reduziert werden, der in Gleichung 6.8 in Abschnitt 6.2.2.1 eingeführt wurde. Die Konvergenz zu lokalen Minima kann vermieden werden, indem die Startwerte der Iteration in demselben allgemeinen Bereich wie das erwartete Ergebnis gewählt werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in diesem Abschnitt durchgeführte Analyse der algorithmischen Genauigkeit der Kalibrierung, obwohl unter idealisierten Annahmen bewertet, entscheidende Einblicke in das Verhalten des Algorithmus liefert und wichtige quantitative Referenzwerte etabliert. Die Untersuchung ist methodisch notwendig, um die inhärente Leistung des Kalibrieralgorithmus unter idealisierten Bedingungen zu bewerten und Fehlerquellen zu isolieren. Während die mechanische Wiederholgenauigkeit des MHS im Mikrometerbereich liegt, zeigt die algorithmische Untersuchung, dass die z -Komponente der geschätzten Projektorposition zu Ungenauigkeiten führen kann. Die ermittelten Werte des Punktpositionsfehlers mit einem mittleren Fehler von 26,4 mm und einer Standardabweichung von 4,82 mm bieten erstmals grundlegende quantitative Referenzwerte für die Kalibrierung eines Lichtprojektors als Projektionssystem in der SAR.

6.3.4 Praktische Evaluierung

Die zuvor berechneten Punktpositionsfehler bieten für das verwendete Versuchsbau teil lediglich eine qualitative Aussagekraft, da sie auf vereinfachenden Annah-

men bezüglich einer ebenen Oberfläche beruhen, die nicht mit der realen gekrümmten Geometrie übereinstimmt. Um diese Diskrepanz zwischen theoretischen Betrachtungen und der Realität zu überbrücken und die tatsächliche Anwendbarkeit des Systems zu bewerten, motiviert sich daher eine praktische Evaluierung, die die spezifischen Eigenschaften der Flugzeughecksektion berücksichtigt.

6.3.4.1 Versuchsaufbau

Für die Evaluierung werden die Zielscheiben (Abbildung 6.17), welche mittig auf den Referenzpunkten platziert sind, genutzt. Dafür werden die Referenzpunkte über das manuelle Jogging (Abbildung 6.12) angeleuchtet und die Umrisse des Lichtpunktes auf den Zielscheiben nachgezeichnet, damit die Lichtpunktverzerrung erfasst werden kann. Diese Umrisse stellen die Ground Truth-Werte für den Versuch dar. Anschließend werden die Punkte nochmals über die im Abschnitt 6.3.3 vorgestellte Kalibrierung angesteuert und die Umrisse für jeden Referenzpunkt in einer anderen Farbe nachgezeichnet. Diese Werte können dann den Ground Truth-Werten gegenübergestellt werden.

Dieses manuelle Verfahren ist erforderlich, da insbesondere bei Prüflingen mit gekrümmten Oberflächen der Mittelpunkt des verzerrten Lichtpunktes nur schwer zu rekonstruieren ist. Da die Lichtpunktgröße der beiden resultierenden ellipsenartigen Formen nahezu identisch ist, gibt es immer zwei Schnittpunkte und zwei äußere Punkte mit maximalen Abständen zum Referenzpunkt P_n , wie in Abbildung 6.20 gezeigt. Aufgrund der zugrundeliegenden Freiformgeometrie des Prüflings wird ein Lichtpunkt stärker gedehnt als der andere, was zu zwei Abständen führt, die mit e_l für den unteren und e_u für den oberen Positionsfehler bezeichnet werden (vergleichbar mit dem e -Wert aus der algorithmischen Genauigkeitsbewertung aus Abschnitt 6.3.3).

6.3.4.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Zur Erhebung der Versuchsdaten für die Ground Truth-Lichtpunkte und der auf Basis Kalibrierung entstehenden Lichtpunkte werden die elf Referenzpunkte aus 6.3.1 verwendet. Die ermittelten Werte für e_u und e_l sind in Tabelle A.10 aufgeführt, ebenso wie die daraus resultierenden Mittelwerte und Standardabweichungen. Der kombinierte Mittelwert beträgt 4,64 mm und die kombinierte Standardabweichung 0,83 mm.

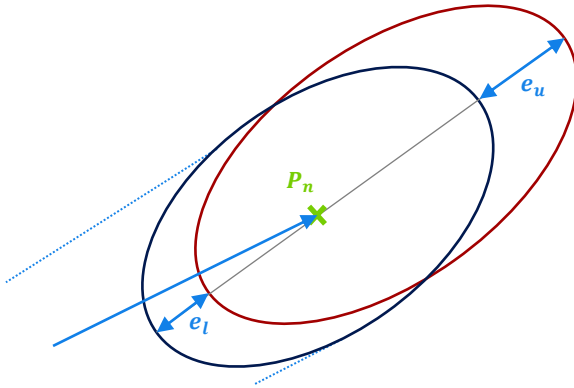


Abbildung 6.20: Untere (e_l) und obere (e_u) gemessene Positionsfehler eines Lichtpunkts an einem gegebenen Referenzpunkt P_n

6.4 Zusammenfassung, Diskussion und Einordnung der Ergebnisse

Dieses Kapitel behandelte die Entwicklung eines Informationsausgabemoduls zur Unterstützung der geometrischen Prüfung. Zunächst wurden im Rahmen der Anforderungsdefinition zentrale Prüfinformationen für den Prüfenden identifiziert. Die darauf aufbauende Entwicklung zielte insbesondere auf die Implementierung von Steuerungs- und Kalibrierfunktionen, die eine Projektion dieser Informationen direkt auf das Bauteil ermöglichen sollten. Hierzu wurde der Lichtprojektor als aussichtsreiche und kostengünstige Basistechnologie zur Umsetzung dieser Funktionen ausgewählt. Die auf dieser Technologie basierenden Funktionen wurden in einer abschließenden Evaluierung hinsichtlich mehrerer Aspekte in Bezug auf die Projektionsgenauigkeit untersucht.

Im Rahmen dieses Entwicklungsprozesses bildet die anwendungsfallsspezifische Auswahl von Informationen und Technologien den zentralen Schritt zur Erreichung des **ersten Teilziels** dieses Moduls (Abbildung 2.16). Erstmals wurde die manuelle geometrische Prüfung im Kontext eines Assistenzsystems detailliert untersucht, wobei die Prüfposition sowie das Prüfergebnis des aktuellen Prüfschrittes als zentrale Informationen für die Zielgruppe identifiziert wurden (Abschnitt 6.1.2). Weiterhin wurde zu Beginn des Abschnitts 6.2 die Technologie auf Basis der spezifischen Anforderungen des Anwendungsfalls ausgewählt. Im vorliegenden Fall war dieser durch mögliche Okklusionen gekennzeichnet. Daraus ergab sich die Anforderung

rung, eine kosteneffiziente Lösung für die Integration redundanter Projektionssysteme in die Umgebung zu finden, was die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit alternativen Projektionstechnologien wie dem Lichtprojektor motivierte.

Hinsichtlich der Informationsauswahl ist die Bedeutung der Ausrichtung auf die Nutzenden des Assistenzsystems hervorzuheben. Die Reduktion der anzuzeigenden Informationen spielt insbesondere in Anwendungsszenarien mit fachlich versierten Nutzenden, wie hier dem Prüfpersonal, eine große Rolle für die Akzeptanz. In Szenarien mit variierenden Nutzungsprofilen ist eine individuelle Betrachtung des Informationsbedarfs der jeweiligen Zielgruppe sowie eine Möglichkeit zur Anpassung des Assistenzsystems an diese Zielgruppen erforderlich. Soll dieses Informationsausgabemodul z. B. im Rahmen von Anlernprozessen eingesetzt werden, kann es notwendig sein, weitere Informationen zu ergänzen, die ggf. die darauf aufbauende Technologieauswahl beeinflussen.

Bei der Auswahl der Technologien ist zu beachten, dass in der vorliegenden Analyse lediglich die Kosten der verschiedenen Projektionssysteme betrachtet wurden. Video-, Laser- und Lichtprojektoren weisen jedoch neben den Kosten auch erhebliche Unterschiede in ihren technischen Eigenschaften auf. Grundsätzlich erfüllen alle Systeme die Funktion, Prüfpositionen und Prüfergebnisse darzustellen. Die Art und Weise, wie dies realisiert wird, ist jedoch sehr unterschiedlich. Diese Unterschiede manifestieren sich beispielsweise in der Beleuchtungsstärke, der Projektionsreichweite und dem Abstrahlwinkel. Sollten diese technischen Parameter in einem spezifischen Anwendungsfall von entscheidender Bedeutung sein, ist es ratsam, die Auswahlkriterien für die Technologie entsprechend um diese Aspekte zu erweitern.

Die Realisierung des **zweiten Teilziels** – die Entwicklung geeigneter Steuerungs- und Kalibrierfunktionen für Lichtprojektoren (Abschnitte 6.2.1 und 6.2.2) – adressierte eine deutliche Lücke in der bisherigen Forschung, da MHSs in SAR-Anwendungen bisher nicht berücksichtigt wurden. Als Forschungsbeitrag wurde ein Steuerungsansatz eingeführt, der auf der Transformation von kartesischen Zielkoordinaten in sphärische Bewegungswinkel des MHS basiert und Prüfergebnisse mittels Farb-DMX-Kanal-Anpassung visualisiert.

Für die Funktion der Kalibrierung wurde ein neues, auf der Newton-Iteration basierendes Verfahren konzipiert und implementiert, das die räumliche Beziehung zwischen Projektor und Bauteil herstellt und somit dessen Einsatz im SAR-Kontext überhaupt erst ermöglicht. Der zugrundeliegende Algorithmus benötigt als Eingabe Referenzpunkte, die Winkel, unter denen diese Punkte vom MHS beleuchtet

werden, sowie eine manuelle Schätzung der Position des Projektors relativ zum Bauteil. Die Erfassung dieser Daten erfordert einen zeitlichen Aufwand durch das Prüfpersonal, der vor dem Einsatz des Lichtprojektors im Prozess geleistet werden muss. Da bei großen Bauteilen häufig speziell angefertigte Halterungen mit hoher Genauigkeit verwendet werden, ist dieser Aufwand in den meisten Fällen nur einmal pro Lichtprojektor und Arbeitsstation erforderlich. Dies gilt auch dann, wenn eine Halterung mehrere Produktvarianten aufnehmen kann und eine Referenzierung des Bauteils gleichzeitig die Halterung mitreferenziert. Bei Arbeitsstationen, die viele Produktvarianten mit unterschiedlichen Halterungen verwenden, steigt der Kalibrieraufwand jedoch deutlich an. Um dennoch eine effiziente Anwendung des MHS zu gewährleisten, empfiehlt es sich, feste Positionen der Aufnahmen zu definieren, die Transformationsmatrix anhand eines Referenzbauteils zu bestimmen und diese durch statische Transformationen für verschiedene Aufnahmen anwendbar zu machen. Dieses Vorgehen erfordert jedoch ein externes Messsystem, das die Translationen und Rotationen der Werkstückaufnahmen zueinander erfasst. Diese Aspekte sollten insbesondere im Hinblick auf eine Weiterentwicklung des Moduls für industrielle Anwendungen näher untersucht werden.

Zur Adressierung des **dritten Teilziels** erfolgte eine detaillierte Untersuchung verschiedener Fehlerquellen und der resultierenden Projektionsgenauigkeit. Die Evaluierung der mechanischen Grenzwerte (Abschnitt 6.3.2.1) zeigte eine hohe erreichbare Wiederholgenauigkeit der Lichtpunktpose, was einen industriellen Einsatz prinzipiell ermöglicht und einen ersten Richtwert für diese Technologie liefert.

Ein kritischer wissenschaftlicher Beitrag lag in der Untersuchung der algorithmischen Genauigkeit des Kalibrierverfahrens (Abschnitt 6.3.3). Die vorgeschlagene Punktpositionsfehlermetrik erwies sich als nur bedingt aussagekräftig, da suboptimale Ergebnisse im ersten Schritt des Algorithmus zu größeren Fehlern im zweiten Schritt führten. Daraus ergab sich eine zentrale Erkenntnis: Eine ausgewogene Winkelverteilung der Referenzpunkte zwischen *pan* und *tilt* ist entscheidend für die Genauigkeit des vorgestellten Kalibrierverfahrens. Daraus folgt, dass ungünstig dimensionierte Bauteile, bei denen z. B. die Länge deutlich größer ist als die Breite, zu ungünstigen Bedingungen für die Kalibrierung führen, was in der praktischen Anwendung zu Einschränkungen führen kann.

Dennoch stellen die Ergebnisse dieser Experimente eine erstmalige (theoretische) Charakterisierung der Kalibrierung des MHS als Projektionssystem in der SAR dar. Der mittlere Fehler von ca. 2,6 cm und die Standardabweichung von ca. 0,4 cm bieten grundlegende quantitative Referenzwerte für die Forschung und Sys-

temauslegung, da vergleichbare Untersuchungen in der Literatur, insbesondere für die spezifische Anwendungsdomäne und konkurrierende Projektionssysteme, fehlen.

Aufgrund der bisherigen Vereinfachungen im Rahmen der vorangegangenen Experimente wurde abschließend im Abschnitt 6.3.4 ein praktischer Evaluierungsansatz verfolgt. Um die Projektionsgenauigkeit in der Realität zu bewerten, musste die Verzerrung des Lichtpunktes in die Betrachtung einfließen. Zu deren Bewertung wurden die neuartigen Metriken des unteren und oberen Positionsfehlers eingeführt und angewendet. Diese quantifizieren die Abweichung zwischen dem tatsächlichen Lichtpunkt und dem aus der entwickelten Kalibrierung resultierenden Lichtpunkt. Die praktische Validierung zeigte, dass die tatsächliche Projektionsgenauigkeit deutlich unter den theoretisch vorhergesagten Werten lag, was auf eine Diskrepanz zwischen der algorithmischen Analyse und den realen Ergebnissen hinweist. Dies deutet darauf hin, dass die im Abschnitt 6.3.3 getroffenen Vereinfachungen möglicherweise nicht in allen Fällen anwendbar sind. Insbesondere ist der Winkel zwischen dem Lichtstrahl und der Oberfläche im realen Experiment viel flacher als der in der Vereinfachung angenommene senkrechte Winkel. Abhängig von der allgemeinen Ausrichtung zwischen MHS und Prüfling können die tatsächlichen Fehler im Vergleich zu den theoretischen Werten mehr oder weniger günstig sein. Darüber hinaus beinhaltet der Kalibriervorgang selbst manuelle Vorgänge, bei denen der Mittelpunkt des Lichtpunktes vom Nutzenden geschätzt werden muss, was eine weitere schwer messbare Unsicherheit verursacht. Die Experimente zeigen jedoch, dass die Projektion mit MHS für eine Vielzahl von Anwendungen erfolgversprechend ist, bei denen Informationen im einstelligen Zentimeterbereich angezeigt werden müssen.

Unter Bezugnahme auf die in Abbildung 3.3 dargestellten **praktischen Defizite** der geometrischen Prüfung adressiert die hier vorgestellte Projektionslösung insbesondere die Probleme, die sich aus der papierbasierten Darstellung von Prüfinformationen ergeben. Dazu zählen Zuordnungsfehler, die sich in der Messung falscher Prüfpositionen niederschlagen, redundante Prüfungen aufgrund unklarer Bearbeitungszustände sowie der erhöhte Zeitaufwand für das Auffinden der korrekten Prüfposition. Obwohl im Entwicklungsprozess der Fokus auf der Funktionsfähigkeit und Genauigkeit des Lichtprojektors und nicht auf der Untersuchung der Prozessauswirkungen lag, ist aufgrund der Vielzahl bereits vorliegender Forschungsergebnisse davon auszugehen, dass der Lichtprojektor auch zeitliche Vorteile bietet. Die einfache Farbcodierung hilft Mehrfachprüfungen zu vermeiden

und orientiert sich an in der Industrie üblichen Farbgebungen, sodass auch hier ohne weitere Untersuchungen eine Effektivitätssteigerung mit dem Lösungsmodul realistisch erscheint. Durch die Projektion entfällt das Übertragen von Positionen aus einer 2D-Zeichnung auf das Bauteil vollständig, wodurch gleichzeitig eine kognitive Entlastung zu erwarten ist. Es ist auch davon auszugehen, dass dadurch eine hohe Nutzungsakzeptanz des Lichtprojektors in der realen Anwendung zu vermuten ist. Durch diese Eigenschaften trägt das vorgestellte Lösungsmodul nicht nur zur Schließung bestehender theoretischer Defizite bei, sondern kann auch aus wirtschaftlicher Sicht erfolversprechend sein.

7 Zusammenfassung, Einordnung im Forschungsfeld und Ausblick

7.1 Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse im Forschungsfeld

Assistenzsysteme haben sich als wirksame Mittel zur Steigerung der Effizienz und Effektivität von schwer automatisierbaren industriellen Prozessen erwiesen. Der Einsatz dieser Systeme konzentriert sich jedoch weitgehend auf das Fügen von kleinskaligen Produkten, während großskalige Szenarien häufig unberücksichtigt bleiben. Insbesondere im Flugzeugbau, in dem die Prüfung von Großbauteilen ein wesentlicher Bestandteil der Wertschöpfungskette ist, beschränkt das die Anwendbarkeit von Assistenzsystemen in der Domäne. Um Assistenzsysteme in diesem Anwendungsfeld zu befähigen, wurde zunächst eine umfassende Analyse des Standes der Wissenschaft durchgeführt, um Defizite und den daraus resultierenden Forschungsbedarf zu identifizieren. Als Ergebnis zeigten sich sowohl Defizite in einzelnen Komponenten (Bausteinen) von Assistenzsystemen als auch ein komponentenübergreifendes Verständnisdefizit aufgrund der unzureichenden Auseinandersetzung mit der Anwendungsdomäne in bisherigen Veröffentlichungen. Um diesen Defiziten zu begegnen, wurden vier Zielsetzungen abgeleitet. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse in Bezug auf die einzelnen Zielsetzungen zusammengefasst und deren jeweilige Bedeutung für das Forschungsfeld herausgestellt. Abschließend wird die Relevanz der Dissertation als Ganzes für vorherrschende Wandlungstreiber dargestellt.

7.1.1 Systematische Erschließung der Anwendungsdomäne als Wissensfundament

Das **erste Ziel** befasste sich mit der grundsätzlichen Erschließung von Assistenzsystemen in der Anwendungsdomäne. Dazu wurden erstmals manuelle Prüfprozesse im Kontext von Assistenzsystemen näher betrachtet (Kapitel 3). Auf Basis der PPR-

Methode wurden zwei repräsentative Anwendungsfälle aus der Endprüfung von Flugzeugzulieferern analysiert. Im Resultat wurden wesentliche Charakteristika zu Prüfmerkmalen und -dokumenten, zur Basisprozesskette, zu Prüfmitteln und zum Prüfpersonal herausgearbeitet, die bei der Gestaltung eines Assistenzsystems zu berücksichtigen sind. Darauf aufbauend wurde ein ERD-Modell zur formalisierten Konsolidierung der gewonnenen Erkenntnisse über die Informationsobjekte und deren Beziehungen entworfen. Neben konzeptionellen Grundlagen ergaben sich aus den Analysen praktische Implikationen für den Entwicklungsprozess: Zum einen wurden spezifische Fehler als Ansatzpunkte für das Assistenzsystem identifiziert, zum anderen wurde der Einfluss der Prüfpersonaleigenschaften auf den Entwicklungsprozess herausgestellt.

Die wissenschaftliche Relevanz dieser durchgeführten Erschließung liegt in der Bereitstellung einer empirisch gestützten Wissensbasis für ein in der Forschung bisher kaum betrachtetes Feld. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die detaillierte Herausarbeitung der prozessualen Schwachstellen und typischen Fehlerarten (z. B. Zuordnungs- und Übertragungsfehler). Diese Erkenntnisse liefern konkrete Anknüpfungspunkte für die zukünftige, zielgerichtete Entwicklung von Assistenzfunktionen und leisten damit einen initialen Beitrag zur wissenschaftlich fundierten Gestaltung der digitalen Transformation von Prüfprozessen. Das entworfene ERD-Modell geht dabei über eine reine Dokumentation hinaus und stellt als wiederverwendbares Artefakt im Sinne des „Design Science Research“-Ansatzes eine strukturierte Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten zur Konzeption von Assistenzsystemen oder Dateninfrastrukturen dar.

Neben Kapitel 3, das explizit zur Adressierung des ersten Ziels definiert wurde, zahlen darüber hinaus auch die systematische Forschungsanalyse und die gesamte Vorgehensweise, beide orientiert am HAAT-Modell, implizit auf diese Zielsetzung ein. Dieser holistische Ansatz, der das Zusammenspiel der Systemkomponenten in den Fokus rückt, unterscheidet sich von bisherigen Forschungsansätzen, die oft nur isolierte Aspekte beleuchten. So ermöglichte erst die strukturierte Analyse des Stands der Forschung unter Anwendung des HAAT-Modells den übergreifenden Blick auf die Anforderungen an Assistenzsystemkomponenten, der für die gezielte Domänenanalyse notwendig war. Die methodische Klammer der gesamten Arbeit bildet die Kombination dieses Analyse-Frameworks mit dem menschenzentrierten Entwicklungsprozess nach ISO 9241-210. Dieser integrierte Ansatz gewährleistet, dass die technologische Entwicklung konsequent auf dem analysierten Nutzungskontext basiert und unter realitätsnahen Bedingungen validiert wird. Gerade durch die durchgängige Erprobung an realen Bauteilen und Prüfscenarien wird sicherge-

stellt, dass die entwickelten Module den spezifischen Charakteristika der Zielgruppe des Prüfpersonals (Abschnitt 3.1.4) gerecht werden, was einen entscheidenden Mehrwert gegenüber Ansätzen mit vereinfachten Testszenarien darstellt. Die gesamte Vorgehensweise kann somit als methodischer Referenzrahmen für zukünftige Forschungsarbeiten dienen, die auf die Entwicklung von Assistenzsystemen in anspruchsvollen, realitätsnahen Szenarien abzielen.

7.1.2 Technologische Beiträge und Impulse für die Assistenzsystemforschung

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen über die Anwendungsdomäne konnten die **technischen Lösungskomponenten** entwickelt und damit die verbleibenden Ziele adressiert werden.

7.1.2.1 Informationseingabemodul für die Sichtprüfung mit Fokus auf Oberflächendefekten

Das **zweite Ziel** bezog sich auf die Entwicklung eines Informationseingabemoduls zur Dokumentation von Defekten in der Sichtprüfung (Kapitel 4). Der Stand der Wissenschaft gab keine klaren Empfehlungen für bevorzugte Technologien, weshalb einfache Prototypen mittels Tablet und AR-Brille entwickelt und bewertet wurden. Die Ergebnisse favorisierten das Tablet für die Informationseingabe. Weiterhin zeigte sich, dass einfache geometrische Maskierungswerkzeuge unzureichend sind. Daher erfolgte eine Weiterentwicklung zu einem VFM-basierten Ansatz mit 3D-Defektlokalisierung. Die Defektlokalisierung erreichte in der Evaluierung ausreichende Genauigkeiten. Die erstmalige Verwendung von VFMs in Assistenzsystemen lieferte insbesondere bei der punktbasierten Segmentierung vielversprechende Ergebnisse, die sich in nutzungszentrierten Kennzahlen wie Gebrauchstauglichkeit und Arbeitsbelastung sowie in qualitativen Aspekten wie Effizienz, Segmentierungsqualität und Reproduzierbarkeit äußerten. Diese Untersuchungen bestätigten die Anwendbarkeit des Moduls und schlossen die bestehende Lücke bei den Dokumentationswerkzeugen für Oberflächendefekte.

Ein grundlegender Beitrag dieses Moduls ist die wissenschaftliche Fundierung der Technologieauswahl für die Informationseingabe. Die komparative Studie zur Gebrauchstauglichkeit belegt für den spezifischen Kontext der Sichtprüfung eine höhere Eignung des Tablets im Vergleich zur AR-Brille. Diese erstmalige Untersuchung, die explizit die Informationseingabe und nicht die -ausgabe in den Fokus

rückt, liefert eine empirische Entscheidungsgrundlage für zukünftige Systemgestaltungen. Die ermittelten Gebrauchstauglichkeitswerte können dabei als Referenz für Studien dienen, die die Eignung von Basistechnologien in anderen Prüf- oder Montageaufgaben untersuchen.

Aufbauend auf dieser technologischen Basis liegt der wissenschaftliche Kernbeitrag des Moduls in der erstmaligen Integration und empirischen Validierung eines Vision Foundation Models (SAM) in einem interaktiven, menschenzentrierten Assistenzsystem. Obwohl das transformative Potenzial von Foundation Modellen für KI-Anwendungen weithin diskutiert wird und Studien wie die von [481] umfassende Fähigkeiten von Vision-Language Modellen evaluieren, oft ohne deren tiefgreifende Erprobung in einem spezifischen Anwendungsfall, zeichnet sich die vorliegende Arbeit durch ihren fokussierten Anwendungsbezug aus: Sie liefert durch die Implementierung und nutzerbasierte Evaluierung konkrete Evidenz für die Praxistauglichkeit des VFM-Ansatzes in der industriellen Sichtprüfung. Die dabei gewonnenen empirischen Daten sind somit nicht nur für die Weiterentwicklung von Assistenzsystemen relevant, sondern leisten auch einen wertvollen Beitrag zur Mensch-KI-Interaktionsforschung. Zukünftige Arbeiten können hier anknüpfen, um die Synergien zwischen menschlicher Expertise und der Leistungsfähigkeit von Foundation Modellen weiter zu untersuchen.

7.1.2.2 Umwelterfassungsmodul für das modulare, multi-modale Tracking von Prüfmitteln

Das **dritte Ziel** konzentrierte sich auf die Prüfmittellokalisierung (Kapitel 5). Hierfür wurde eine systematische Vorgehensweise zur Erarbeitung modularer, multi-modaler Tool Tracking-Applikationen entwickelt. Dieser Ansatz, der die flexible Kombination verschiedener Sensoren, Lokalisierungsverfahren und Fusionsalgorithmen erlaubt, wurde exemplarisch anhand eines industrienahen Anwendungsfalls durchlaufen. Das dabei entwickelte Lokalisierungssystem kombiniert Outside-In-Tracking mit dem erstmaligen Einsatz eines VIO-Verfahrens als Inside-Out-Komponente. Als zentrale Gegenmaßnahme zur Reaktion auf Okklusionsszenarien wurde eine Methode zur aktiven Driftreduzierung integriert. Die abschließende Evaluierung untersuchte die Leistungsfähigkeit des Systems unter anspruchsvollen Bedingungen und berücksichtigte dabei erstmals im Bereich des Tool Trackings systematisch Okklusionsszenarien. Sie bestätigte die Wirksamkeit der eingeführten Gegenmaßnahmen und die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems.

Wissenschaftlich adressiert dieses Modul die grundlegende Herausforderung der oftmals unzureichenden Robustheit von Tool Tracking-Systemen in dynamischen, okklusionsanfälligen und großvolumigen Arbeitsumgebungen. Da die vorhandene Literatur hierfür bislang kaum Lösungen bietet, erschließt die Arbeit ein relevantes, aber unzureichend untersuchtes Forschungsfeld. Ein wesentlicher wissenschaftlicher Beitrag liegt in der Einführung einer systematischen, modularen Vorgehensweise zur Entwicklung solcher komplexen Lokalisierungssysteme. Dieser Ansatz, der auf einer adaptierbaren Systemarchitektur basiert, etabliert eine wichtige Base-Line für zukünftige Entwicklungen. Er fördert die Anpassungsfähigkeit an veränderliche Bedingungen sowie die Übertragbarkeit auf neue Arbeitsplätze. Zugleich dient er als Plattform für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen. Durch die modulare Austauschbarkeit der Komponenten können auf einfache Weise verschiedene Sensormodalitäten, neuartige Lokalisierungsverfahren oder Filteralgorithmen implementiert werden. Dies ermöglicht eine systematische Erforschung ihres Einflusses und ihrer Wechselwirkungen. Darauf aufbauend ist der technologische Kernbeitrag zur Lösung der genannten Herausforderung die neuartige Kombination eines VIO-Verfahrens als Inside-Out-Komponente mit einer aktiven Driftkompensation. Die Evaluierungsergebnisse belegen dabei als zentrale wissenschaftliche Erkenntnis, dass gerade diese Driftkompensation zwingend erforderlich ist, um in derartigen Szenarien die Lokalisierungsergebnisse robust und innerhalb akzeptabler Genauigkeiten zu halten.

7.1.2.3 Informationsausgabe zur in-situ Projektion von Prüfinformationen

Das vierte Ziel umfasste das Informationsausgabemodul zur in-situ Projektion von Prüfinformationen (Kapitel 6). Für den vielversprechenden Ansatz der SAR wurden zunächst anhand des Anwendungsfalls die zu übertragenden Informationen und eine Basistechnologie ausgewählt. Diese dienten als Grundlage für die Funktionsentwicklung zur Erweiterung der Methode auf große Arbeitsräume. Dazu wurden Kalibrier- und Steuerfunktionen für Lichtprojektoren entwickelt und messtechnisch evaluiert. Ziel dieser Evaluierung war die quantitative Beurteilung der Praxistauglichkeit der gewählten Projektionstechnologie basierend auf den erreichbaren Genauigkeiten und unter Berücksichtigung der auftretenden Fehlerquellen. Die Ergebnisse wiesen die grundsätzliche Eignung von Lichtprojektoren als SAR-Technologie für den untersuchten Anwendungsfall nach.

Der wissenschaftliche Beitrag dieses Moduls liegt zunächst in der Schaffung einer Gestaltungsgrundlage für die Informationsbereitstellung. Durch die Analyse

des Nutzungskontextes wurden die Prüfposition und der Prüfstatus als zentrale, erfolgskritische Informationen identifiziert. Die bewusste Reduktion der Projektion auf diese Kerninformationen adressiert gezielt die Bedürfnisse der hochqualifizierten Zielgruppe, indem sie eine kognitive Überfrachtung vermeidet und dem aus der Forschung bekannten Expertise-Reverse-Effekt entgegenwirkt. Darauf aufbauend erfolgt die Einordnung des technologischen Beitrags durch die Qualifizierung von Lichtprojektoren (MHSs) als kosteneffiziente Technologie für die großflächige in-situ Informationsausgabe. Damit wird das Spektrum bisheriger SAR-Ansätze, die oft auf Videoprojektoren oder teure Lasersysteme beschränkt waren, gezielt um eine validierte Option erweitert. Im Zuge dieser erstmaligen Validierung für anspruchsvolle industrielle Kontexte wurden zudem neue methodische Ansätze zur Quantifizierung von Fehlerquellen und zur Bewertung der Projektionsgenauigkeiten entwickelt. Die damit bereitgestellten analytischen Werkzeuge und Metriken ermöglichen weiterführende, vergleichende Untersuchungen dieser Projektionstechnologie.

Zusammengenommen trägt jedes der genannten Ziele zur Erreichung der übergeordneten Zielsetzung bei, indem Lösungskomponenten für die Assistenz im Kontext der Prüfung in der Flugzeugproduktion erarbeitet wurden. Diese können in Abhängigkeit von den für ein Produkt erforderlichen Prüfprozessen (geometrisch, visuell) einzeln oder in Kombination miteinander in einem Assistenzsystem eingesetzt werden.

7.1.3 Bedeutung für gesellschaftliche und marktbedingte Wandlungstreiber

Die in dieser Arbeit konzipierten und evaluierten Module sind nicht nur für die spezifischen Herausforderungen in der Flugzeugproduktion relevant. Ihre zugrundeliegenden Prinzipien und technologischen Ansätze adressieren vielmehr zentrale Wandlungstreiber, wie sie in der Einleitung (Abschnitt 1.1) skizziert wurden. Darüber hinaus bieten sie ein deutliches Transferpotenzial für andere Schlüsselindustrien mit Großbauteilproduktion und hohem Anteil manueller Wertschöpfungsprozesse (z. B. Schienenfahrzeugbau, Schiffbau, Windkraftanlagen).

Im Folgenden werden die übergreifende Relevanz der Arbeit sowie das Potenzial der entwickelten Lösungen als Hilfsmittel im Umgang mit gesellschaftlichen und marktbedingten Wandlungstreibern anhand konkreter Fallbeispiele beleuchtet. Dabei werden jeweils die kurz-, mittel- und langfristigen Auswirkungen skizziert.

- **Beitrag zur Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung:** Angesichts globaler Herausforderungen wie dem Klimawandel (Abbildung 1.1) ist die Optimierung des Ressourceneinsatzes von zentraler Bedeutung. Das in dieser Arbeit für die Luftfahrt detailliert beschriebene Prinzip der präzisen, digital unterstützten Prüfung zur Qualitätssicherung zeigt kurzfristig Effekte in Form einer verbesserten Bauteilqualität und einer Reduktion von Prüffehlern. Mittelfristig ist dieses Prinzip fundamental auf andere Sektoren übertragbar, um beispielsweise Materialeffizienz zu steigern oder Betriebskosten durch präzisere Prozesse zu senken. In der Luftfahrt spezifisch können korrekte Prüfungen an Strukturelementen nicht nur die Sicherheit erhöhen, sondern auch aerodynamische Eigenschaften gewährleisten (z. B. durch Vermeidung von Nietkopfüberständen) und somit den Kerosinverbrauch im Betrieb positiv beeinflussen. Langfristig trägt dies zu einer umweltverträglicheren Luftfahrt bei.
- **Menschzentrierung: Kognitive Entlastung im demografischen Wandel:** Der demografische Wandel führt zu einer alternden Belegschaft (Abschnitt 1.1). Die entwickelten Assistenzlösungen (insbesondere das Informationsausgabemodul) zielen auf eine kognitive Entlastung der Mitarbeitenden ab. Dieses Prinzip ist universell anwendbar, um kurzfristig ergonomischere Arbeitsbedingungen zu schaffen und die Prozesssicherheit zu erhöhen. Mittel- bis langfristig kann dies die Arbeitsplatzattraktivität – auch branchenübergreifend – steigern, wodurch erfahrene Mitarbeitende länger und gesünder im Wertschöpfungsprozess gehalten werden können.
- **Antwort auf den Fachkräftemangel durch verbesserte Integration und Wissensmanagement:** Der in der Einleitung thematisierte Fachkräftemangel (Abbildung 1.1) stellt produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen. Die hier entwickelten Module können durch ihre intuitive Bedienung und die digitale Bereitstellung von Prüfinformationen kurz- bis mittelfristig die Einarbeitungszeiten für neue Fachkräfte verkürzen. Dies unterstützt die Integration von Personal mit unterschiedlichen Vorkenntnissen oder aus anderen Sprachregionen, da komplexe Prüfprozesse verständlicher und zugänglicher gestaltet werden. Langfristig kann die Digitalisierung von Prüfwissen dem Verlust von Erfahrungswissen entgegenwirken und eine breitere Wissensbasis im Unternehmen sichern.
- **Stärkung des Vertrauens durch fortschrittliche Qualitätssicherung und Risikominimierung:** Qualitätsbedingte Zwischenfälle, wie der in der Einleitung

dieser Arbeit thematisierte (Abschnitt 1.3), können weitreichende Konsequenzen nach sich ziehen. Neben unmittelbaren Sicherheitsrisiken führen sie oft zu erheblichen Imageschäden für die beteiligten Unternehmen. Zudem verursachen sie hohe Folgekosten durch Reparaturen, Rückrufaktionen oder Produktionsausfälle. Im Flugzeugbau beispielsweise können sie zu drastischen regulatorischen Maßnahmen wie Flugverboten für betroffene Flugzeugtypen führen. Die Auswirkungen solcher Ereignisse treffen nicht nur den einzelnen Hersteller, sondern können die gesamte Lieferkette destabilisieren und somit einen für die Volkswirtschaft eines Landes, wie beispielsweise Deutschland, bedeutenden Industriesektor empfindlich beeinträchtigen. Die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze für moderne, digital unterstützte Qualitätssicherungssysteme zielen darauf ab, kurzfristig die Prozesssicherheit und -transparenz durch verbesserte Dokumentation und Nachvollziehbarkeit zu erhöhen. Mittelfristig können sie dazu beitragen, die Fehlerwahrscheinlichkeit zu reduzieren und somit das Risiko solcher kostspieligen und vertrauensschädigenden Vorfälle signifikant zu minimieren. Langfristig kann der Einsatz solcher fortschrittlicher Qualitätssicherungstechnologien das Vertrauen der Öffentlichkeit, der Kunden und der Regulierungsbehörden in die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Produkte und der verantwortlichen Industrien nachhaltig stärken und die Resilienz des gesamten Sektors erhöhen.

Die hier entwickelten Prinzipien und Technologien können somit adaptiert werden, um auch in den genannten angrenzenden Industriedomänen manuelle Füge-, Prüf- oder Wartungsprozesse effizienter und sicherer zu gestalten.

7.2 Ausblick

Für die Weiterentwicklung der in dieser Dissertation vorgestellten Lösungsansätze bieten sich vielfältige industrielle und wissenschaftliche Anknüpfungspunkte an. Diese sind nicht nur grundlegend für die weitere Integration der Funktionsmodule in bestehende Systemlandschaften, sondern eröffnen auch neue Wege für die Forschung und Praxis.

Die **Industrialisierung** der entwickelten Module setzt eine Integration dieser zu einem kohärenten System voraus. In dieser Arbeit wurden Werkzeuge vorgestellt und diskutiert (Abschnitt 2.2.3.3 und 2.2.3.6), mit denen eine Integration erfolgen könnte. Eine direkte Anwendung dieser im Rahmen der Dissertation war jedoch nicht vorgesehen, da dies keinen zusätzlichen wissenschaftlichen Mehrwert geboten hätte. Stattdessen wurde die Anwendung der Integrationsansätze in einer separaten Veröffentlichung [83] demonstriert, die nun als Ausgangspunkt für Industrialisierungsbemühungen dienen kann. Die resultierende IIoT-Plattform (Abbildung 7.1) integriert ein Steuerungsmodell in Form eines Labelled Transition Systems (Abbildung A.12), das die Entitäten des Prüfplans abbildet und die Verarbeitungskomponente verkörpert. Zur Interaktion mit dem Steuerungsmodell wurden Frontendapplikationen für Smart Watches (Abbildung A.13) und Backendlösungen entwickelt, einschließlich einer Datenbank zur physischen Repräsentation des Datenmodells (Abbildung 3.5) und APIs für den Datenaustausch.

Die weiterführende Erprobung dieses Gesamtsystems anhand industrieller Anwendungsfälle sowie die Bewertung seiner Auswirkungen auf Prozesskennzahlen wie Effizienz und Effektivität sind entscheidende Schritte, um die Wirtschaftlichkeit zu untermauern und den Einsatzbereich von Assistenzsystemen in der Industrie auszudehnen. Eine umfassende Kostenanalyse der Soft- und Hardware im industrialisierten Zustand ist notwendig, um die ökonomische Tragfähigkeit der Implementierung zu bewerten. Zur weiteren Validierung der Praxistauglichkeit und zur kontinuierlichen Weiterentwicklung des Systems bedarf es zusätzlicher Studien, insbesondere mit Fachkräften aus der Flugzeugproduktion. Das Einholen von direktem Feedback der tatsächlichen Zielgruppe (Prüfpersonal) ist entscheidend, um das System optimal an ihre spezifischen Bedürfnisse und Arbeitsabläufe anzupassen und somit eine hohe Technologieakzeptanz zu gewährleisten.

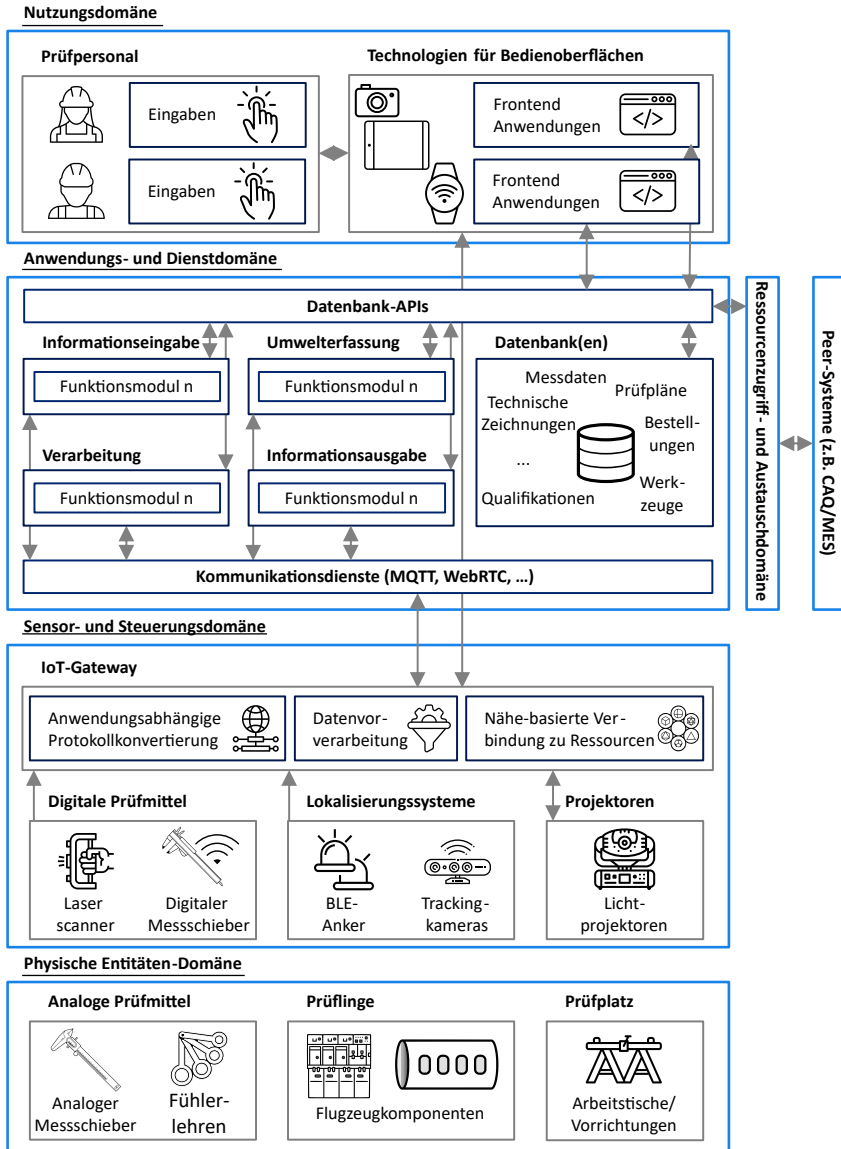


Abbildung 7.1: IIoT-Plattformarchitektur für das integrierte Assistenzsystem nach ISO/IEC 30141 [355].

Obwohl diese Dissertation erste Assistenzlösungen für manuelle Prüfprozesse entwickelt hat, bedarf es weiterer **Forschungsanstrengungen** in diesem Bereich. Die Fokussierung auf geometrische und visuelle Prüfungen als repräsentative Prozesse war aufgrund ihrer hohen Relevanz notwendig, jedoch wurden nicht alle Arten von Prüfprozessen abgedeckt. Angesichts der vielversprechenden Ergebnisse erscheint es sinnvoll, das Spektrum der Prüfprozesse zu erweitern. Das in dieser Arbeit verwendete Analyseverfahren bietet ein unabhängiges Werkzeug, um prozessspezifische Rahmenbedingungen zu untersuchen und daraus Anforderungen an Assistenzmodule abzuleiten.

In diesem Zusammenhang können nicht nur prozessspezifische, sondern auch branchenspezifische Rahmenbedingungen als Grundlage für weitere Forschungen dienen. Die systematische Analyse dieser branchenspezifischen Rahmenbedingungen und die daraus folgende Anpassung der Module (z. B. an unterschiedliche Materialien, Oberflächenbeschaffenheiten, Umgebungsbedingungen, Sicherheitsregularien) stellen einen wichtigen zukünftigen Forschungsbedarf dar, um eine breitflächig digital unterstützte Produktion in Schlüsselindustrien zu fördern.

Die Entwicklung des **Informationseingabemoduls** hat wesentlich dazu beigetragen, ein breiteres Spektrum von Tätigkeiten bei der Sichtprüfung zu unterstützen. Eine der wichtigsten Weiterentwicklungen ist die Verbesserung der Defektlokalisierungsmethoden. Dabei könnte der Einsatz fortgeschrittener, modellbasierter sowie KI-basierter Lokalisierungsverfahren die Präzision erhöhen und die Abhängigkeit von physischen Markern minimieren. Darüber hinaus kann dann im Idealfall die derzeit noch notwendige Interaktion mit dem Prüfpersonal zur Auswahl eines konkreten Bauteils entfallen.

Ein weiterer Fokus kann auf der Optimierung der Segmentierungswerkzeuge liegen. Der Einsatz von stark generalisierenden KI-Modellen hat sich insbesondere für die Fokussierung auf spezifische Defektkonturen als effektiv erwiesen und bietet erheblichen Mehrwert. Das vorgestellte Assistenzmodul ist auf die Erkennung vorhandener Defekte oder Bauteile beschränkt und kann fehlende Teile nicht identifizieren. Durch die Integration modellbasierter Ansätze zur Vollständigkeitsprüfung könnte eine umfassendere Lösung für die Sichtprüfung erreicht werden. Insbesondere die Kombination des vorgestellten SAM-basierten Ansatzes mit den Methoden von Ben Abdallah u. a. [259] und Hu u. a. [260] könnte eine holistische Lösung für die Sichtprüfung ermöglichen. In diesem Kontext sind auch die aktuellen Forschungsbemühungen im Bereich der VFMs nicht zu vernachlässigen. So ermöglicht das kürzlich vorgestellte SAM2 [482] die direkte Segmentierung und

das Tracking von Masken in Videodateien oder Videostreams und eröffnet damit neue Möglichkeiten in der Interaktion mit den Benutzenden.

Darüber hinaus sollte die Erweiterung des Moduls um eine (teil-)automatisierte Defektklassifikationsfunktion weiter untersucht werden, um sowohl die Effizienz zu steigern als auch personenunabhängigere Ergebnisse zu erzielen. Diese Funktion könnte durch den Einsatz von Transfer Learning [483] entwickelt werden, wobei die während des Sichtprüfungsprozesses kontinuierlich generierten Daten zum Fine-Tuning des Modells verwendet werden könnten. Durch ein solches Vorgehen wird die Zuverlässigkeit des Systems schrittweise erhöht, bis es bestimmte Defektklassen eigenständig erkennen kann. Zusätzlich könnten den Mitarbeitenden Vorschläge unterbreitet werden, an welchen Stellen sich potenzielle Defekte im Bild befinden. Diese können die Vorschläge dann bestätigen oder ablehnen. Dieser Human-in-the-Loop-Ansatz kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Defektklassifizierung im Einsatz kontinuierlich weiter trainieren und optimieren.

Das **Umwelterfassungsmodul** verdeutlicht das Potenzial von Tool Tracking im Rahmen der Flugzeugproduktion, bietet jedoch auch Anlass für weiterführende Forschungsarbeiten. Die Methodik zur Entwicklung von Tool Tracking-Applikationen wurde bislang nur in einem spezifischen Anwendungsfall eingesetzt. Zukünftige Forschung sollte sie in weiteren Szenarien mit vergleichbaren Herausforderungen (z. B. im Schiff- oder Schienenfahrzeugbau) testen, um ihre Universalität und Anpassungsfähigkeit zu validieren. Dies würde nicht nur die generelle Anwendbarkeit belegen, sondern zugleich ihre Übertragbarkeit auf verwandte Domänen verdeutlichen. In diesem Zusammenhang ist ebenfalls eine Anpassung einzelner Teilschritte der Methodik oder eine Erweiterung um eigenständige Schritte denkbar.

Die erstmalige Nutzung der VIO-Methode im Rahmen des Tool Trackings hat sich als vielversprechend erwiesen, besonders durch die Integration der optischen Merkmalerkennung, welche die Drift begrenzt. Die Möglichkeiten von VIO-basierten Algorithmen wie VI-SLAM sollten weiter erforscht werden. Speziell die Leistungsfähigkeit dieser Algorithmen in Bezug auf Genauigkeitsbereiche und ihre Eignung für das Tool Tracking ohne die Notwendigkeit, visuelle Marker in der Umgebung zu platzieren, bieten aussichtsreiche Forschungsansätze. Die Nutzung von VI-SLAM würde den Einsatz von Loop Closure ermöglichen, wodurch die Driftreduzierung automatisiert und der Aufwand für das Prüfpersonal minimiert werden könnte.

Um die Ursachen für die teilweise schlechte Performance zu ermitteln, ist im Bereich der Sensorfusion eine umfassende Untersuchung der Parameter des Kalman-Filters notwendig. Es liegt nahe, dass die durchgeführte Sensorcharakterisierung

und die daraus resultierende Gewichtung der Eingangsdaten zu stark vereinfacht wurden und somit die Realität nicht widerspiegeln. Eine genauere und umfassendere Charakterisierung der Sensoren des VIO-Verfahrens ist daher unerlässlich, um die Unsicherheiten der Sensordaten realitätsgerecht quantifizieren zu können. Hierzu ist eine tiefgreifende Analyse der Sensorleistung unter verschiedenen Betriebsbedingungen erforderlich, bei der auch Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten sowie deren Auswirkungen auf die Lokalisierungsunsicherheit untersucht werden. Durch die systematische Erfassung und Analyse dieser Daten kann die Unsicherheit in der Sensorfusion präziser modelliert werden, womit sich die Zuverlässigkeit des Tool Trackings signifikant verbessert.

In einem weiteren Schritt könnte die Implementierung fortgeschrittener Filteralgorithmen, wie beispielsweise des Extended Kalman-Filters, der speziell für die Verarbeitung nichtlinearer Modelle entwickelt wurde, in Erwägung gezogen werden. Dies würde die Möglichkeit bieten, die entwickelten Sensormodelle umfassender zu nutzen. Durch eine präzisere Charakterisierung der Sensoren kann der Filter genauer bestimmen, wie die verschiedenen Datenquellen gewichtet werden. Dies erhöht wiederum die Genauigkeit der Lokalisierung.

Die weitere Forschung und Entwicklung des **Informationsausgabemoduls** sollte sich auf drei Hauptbereiche konzentrieren. Erstens die Erweiterung des Anwendungsbereichs kognitiver Assistenzanwendungen, die MHSs nutzen. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Skalierung des Assistenzsystems durch den Einsatz mehrerer kooperativ arbeitender MHSs gelegt werden. Dies ermöglicht, dass bei Abschattung eines MHS durch ein Objekt der Lichtstrahl eines anderen MHS sichtbar bleibt und somit eine durchgängige Anzeige der Prüfpositionen in dynamischen Umgebungen gewährleistet ist. Gleichzeitig muss beim Einsatz mehrerer MHSs der Einrichtungsaufwand bei der Arbeitsvorbereitung reduziert werden. Zukünftige Arbeiten könnten sich darauf konzentrieren, die Kalibrierprozesse weiter zu vereinfachen und Möglichkeiten zur Teilautomatisierung zu untersuchen, um die Inbetriebnahmezeit zu verkürzen. Ein möglicher Ansatz könnte darin bestehen, MHSs mit einer Kamera auszustatten und visuelle Targets an den Referenzpunkten anzubringen. Der Lichtstrahl des MHS könnte automatisiert über die Oberfläche des Bauteils bewegt werden. Wenn ein Target getroffen wird, könnten die Werte für Pan und Tilt automatisch gespeichert werden. Darüber hinaus bietet die Entwicklung verschiedener Gobo-Designs die Möglichkeit, den Lichtpunkt so zu verändern (z. B. in Form von Buchstaben oder Icons), dass er den Nutzenden weitere Informationen vermittelt. Dies ist vor allem für Anwendungsfälle interessant, bei denen

die Zielgruppe einen höheren Informationsbedarf hat als das in dieser Arbeit betrachtete Prüfpersonal.

Zweitens könnte der verwendete iterative Algorithmus optimiert werden. Die Implementierung alternativer, nichtlinearer Lösungsverfahren könnte die Genauigkeit und Robustheit des Systems deutlich verbessern. Durch Anpassung der Iterationsschritte und Einführung von Gewichtungsfaktoren könnten zudem die Effizienz gesteigert und die Anzahl der benötigten Referenzpunkte reduziert werden. Des Weiteren könnten manuelle Plausibilitätsprüfungen eingeführt und die Verwendung von Quaternionen anstelle von Eulerwinkeln untersucht werden, um die Genauigkeit in komplexen Anwendungsszenarien zu erhöhen.

Drittens sollte die Charakterisierung der MHSs selbst weiter erforscht werden. Eine mathematische Beschreibung des mechanischen Zooms und Fokus in Kombination mit individuellen Gaborädern oder einer separaten Irisblende würde eine präzise Steuerung der Lichtpunktgröße und -form ermöglichen. Diese Kontrollmöglichkeit ist besonders wertvoll für Anwendungen, die eine verzerrungsfreie Lichtprojektion erfordern.

In einer abschließenden Synthese der Zusammenfassung und des dargelegten Ausblicks lässt sich Folgendes festhalten: Die in dieser Dissertation erfolgte systematische Erschließung der Anwendungsdomäne sowie die Entwicklung der dargestellten technologischen Kernbeiträge schließen spezifische Forschungslücken. Darüber hinaus unterstreichen sie die praktische Relevanz von Assistenzsystemen im Kontext der adressierten Wandlungstreiber. Die konsequent menschenzentrierte Ausrichtung der Lösungsansätze – von der Analyse bis zur Evaluierung – steht dabei in Übereinstimmung mit den in der Einleitung diskutierten Prinzipien der Industrie 5.0 und eröffnet neue Perspektiven für die Forschung im Bereich der Assistenzsysteme. Der im Ausblick beschriebene Weg sieht die wissenschaftliche Weiterentwicklung und synergetische Integration der erarbeiteten Bausteine vor. Dadurch kann der manuelle Prüfprozess von einer isolierten Tätigkeit zu einem vollständig digitalisierten und assistierten Prozessschritt transformiert werden. Somit werden die gewonnenen Daten unmittelbar für die Wertschöpfungskette nutzbar. Die Arbeit dient demnach nicht nur als wissenschaftlicher Nachweis der technischen Machbarkeit. Vielmehr liefert sie auch Impulse für zukünftige, menschenzentrierte Produktionslösungen, die nachhaltig zur Stärkung von Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit beitragen.

Literatur

- [1] H. Kagermann, J. Helbig, W. Wahlster und A. Hellinger, *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry ; Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion, 2013. Adresse: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>.
- [2] European Commission. Directorate General for Research and Innovation., *Industry 5.0: towards a sustainable, human centric and resilient European industry*. Publications Office, 2021. DOI: 10.2777/308407.
- [3] M. Hermann, T. Pentek und B. Otto, "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios," in *Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, T. X. Bui und R. H. Sprague, Hrsg., Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 3928–3937, ISBN: 978-0-7695-5670-3. DOI: 10.1109/HICSS.2016.488.
- [4] M. Kleinemeier, "Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungs-Netzwerken," in *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1*, Ser. SpringerLink Bücher, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 219–226, ISBN: 978-3-662-45279-0. DOI: 10.1007/978-3-662-45279-0_43.
- [5] J. Nelles, S. Kuz, A. Mertens und C. M. Schlick, "Human-centered design of assistance systems for production planning and control: The role of the human in Industry 4.0," in *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, IEEE, 2016, S. 2099–2104, ISBN: 978-1-4673-8075-1. DOI: 10.1109/ICIT.2016.7475093.
- [6] C. Prinz, F. Morlock, S. Freith, N. Kreggenfeld, D. Kreimeier und B. Kullenkötter, "Learning Factory Modules for Smart Factories in Industrie 4.0," *Procedia CIRP*, Jg. 54, S. 113–118, 2016, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.105.
- [7] D. Romero, P. Bernus, O. Noran, J. Stahre und Å. Fast-Berglund, "The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems," in *Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World*, Ser. IFIP Advances in Information and Communication Technology, I. Nääs, O. Vendrametto, J. Mendes Reis, R. F. Gonçalves, M. T. Silva, G. von Cieminski und D. Kiritsis,

- Hrsg., Bd. 488, Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 677–686, ISBN: 978-3-319-51132-0. DOI: 10.1007/978-3-319-51133-7_80.
- [8] J. Deuse, F. Busch, K. Weisner und M. Steffen, “Gestaltung sozio-technischer Arbeitssysteme für Industrie 4.0,” in *Digitalisierung industrieller Arbeit*, Nomos, 2015, S. 148–165. DOI: 10.5771/9783845263205-148.
- [9] D. Gorecky, M. Schmitt, M. Loskyll und D. Zuhlke, “Human-machine-interaction in the industry 4.0 era,” in *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, 2014, S. 289–294, ISBN: 978-1-4799-4905-2. DOI: 10.1109/INDIN.2014.6945523.
- [10] B. Tropschuh, F. Dillinger, S. Korder, M. Maier, Q. Gärtner und S. Vernim, “Industrie 5.0 – ein menschenzentrierter Ansatz,” *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 116, Nr. 6, S. 387–392, 2021, ISSN: 0947-0085. DOI: 10.1515/zwf-2021-0091.
- [11] S. Nahavandi, “Industry 5.0—A Human-Centric Solution,” *Sustainability*, Jg. 11, Nr. 16, S. 4371, 2019. DOI: 10.3390/su11164371.
- [12] B. Vogel-Heuser und K. Bengler, “Von Industrie 4.0 zu Industrie 5.0 – Idee, Konzept und Wahrnehmung,” *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, Jg. 60, Nr. 6, S. 1124–1142, 2023, ISSN: 1436-3011. DOI: 10.1365/s40702-023-01002-x.
- [13] P. K. R. Maddikunta, Q.-V. Pham, P. B. N. Deepa, K. Dev, T. R. Gadekallu, R. Ruby und M. Liyanage, “Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications,” *Journal of Industrial Information Integration*, Jg. 26, S. 100257, 2022, ISSN: 2452-414X. DOI: 10.1016/j.jii.2021.100257.
- [14] B. Wang, P. Zheng, Y. Yin, A. Shih und L. Wang, “Toward human-centric smart manufacturing: A human-cyber-physical systems (HCPS) perspective,” *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 63, S. 471–490, 2022, ISSN: 0278-6125. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.05.005.
- [15] D. Romero und J. Stahre, “Towards The Resilient Operator 5.0: The Future of Work in Smart Resilient Manufacturing Systems,” *Procedia CIRP*, Jg. 104, S. 1089–1094, 2021, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.183.
- [16] Statista, *Demografischer Wandel*, 2023. Adresse: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6759/dokument/demografischer-wandel-statista-dossier/>.
- [17] M. Calzavara, D. Battini, D. Bogataj, F. Sgarbossa und I. Zennaro, “Ageing workforce management in manufacturing systems: state of the art and future research agenda,” *International Journal of Production Research*, Jg. 58, Nr. 3, S. 729–747, 2020, ISSN: 0020-7543. DOI: 10.1080/00207543.2019.1600759.

- [18] P. Raspels, S. Düsing, J. Helfen, D. Dimitrova, D. A. Ostwald und S. Hofmann, *Demografischer Wandel: In Deutschland werden Arbeitskräfte rar: Berufs-, qualifikations- und branchenspezifische Analyse bis zum Jahr 2030*, PricewaterhouseCoopers AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, Hrsg., 2016.
- [19] T. Haase, W. Termath und M. Martsch, “How to Save Expert Knowledge for the Organization: Methods for Collecting and Documenting Expert Knowledge Using Virtual Reality based Learning Environments,” *Procedia Computer Science*, Jg. 25, S. 236–246, 2013, ISSN: 1877-0509. DOI: 10.1016/j.procs.2013.11.029.
- [20] H. Oestreich, T. Töniges, M. Wojtynek und S. Wrede, “Interactive Learning of Assembly Processes using Digital Assistance,” *Procedia Manufacturing*, Jg. 31, S. 14–19, 2019, ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.03.003.
- [21] L. Hoerner, M. Schamberger und F. Bodendorf, “Using Tacit Expert Knowledge to Support Shop-floor Operators Through a Knowledge-based Assistance System,” *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, Jg. 32, Nr. 1, S. 55–91, 2023, ISSN: 0925-9724. DOI: 10.1007/s10606-022-09445-4.
- [22] B. Fitzenberger, *Fach- und Arbeitskräftemangel . . . und es gibt ihn doch!* 2023. DOI: 10.48720/IAB.F00.20230328.01.
- [23] S. Deppe, L. Brandt, M. Brunninghaus, J. Papenkorrdt, S. Heindorf und G. Tschirner-Vinke, “AI-Based Assistance System for Manufacturing,” in *2022 27th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Piscataway, NJ: IEEE, 2022, S. 1–4, ISBN: 978-1-6654-9996-5. DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921520.
- [24] A. Brolin, P. Thorvald und K. Case, “Experimental study of cognitive aspects affecting human performance in manual assembly,” *Production & Manufacturing Research*, Jg. 5, Nr. 1, S. 141–163, 2017. DOI: 10.1080/21693277.2017.1374893.
- [25] D. Bläsing, S. Hinrichsen und M. Bornewasser, “Reduction of Cognitive Load in Complex Assembly Systems,” in *Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications II*, Ser. Advances in Intelligent Systems and Computing, T. Ahram, R. Taiar, V. Gremeaux-Bader und K. Aminian, Hrsg., Bd. 1152, Cham: Springer International Publishing und Imprint Springer, 2020, S. 495–500, ISBN: 978-3-030-44266-8. DOI: 10.1007/978-3-030-44267-5_75.
- [26] M. Öfele, C. Hartmann, S. Sommer, F. Kerber und S. Braunreuther, “KI in der Produktion,” in *Künstliche Intelligenz und menschliche Gesellschaft*, L. Kovács, Hrsg., Berlin: De Gruyter, 2023, S. 105–120, ISBN: 978-3-11-103470-6. DOI: 10.1515/9783111034706-008.

- [27] A. Herzog-Stein und S. Ulrike, *Arbeits- und Lohnstückkostenentwicklung 2022: Energiepreisschocks führen zu steigenden Arbeitskosten bei fallenden Reallöhnen*, Hans Böckler Stiftung, Hrsg., 2023. Adresse: <https://www.boeckler.de/de/boeckler-impuls-deutschland-auf-platz-sechs-50446.htm>.
- [28] C. Brecher, Hrsg., *Integrative Production Technology for High-Wage Countries*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-21066-2. DOI: 10.1007/978-3-642-21067-9.
- [29] Perez und Carlos, *Tesla's Factory Woes Reveals Why You Shouldn't Automate Everything*, medium.com, Hrsg., 2018. Adresse: <https://medium.com/intuitionmachine/teslas-factory-failures-reveals-why-you-shouldn-t-automate-everything-16c54e7f9f16>.
- [30] E. Musk, *Tweet Message*, 2018. Adresse: <https://x.com/elonmusk/status/984882630947753984>.
- [31] T. Becker und H. Stern, "Future Trends in Human Work area Design for Cyber-Physical Production Systems," *Procedia CIRP*, Jg. 57, S. 404–409, 2016, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.070.
- [32] S. Rupp und R. Müller, "Worker assistance systems in the automotive prototype assembly – A case study," *Procedia Manufacturing*, Jg. 55, S. 350–357, 2021, ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.10.049.
- [33] A. Riedel, J. Gerlach, M. Dietsch, S. Herbst, F. Engelmann, N. Brehm und T. Pfeifroth, "A deep learning-based worker assistance system for error prevention: Case study in a real-world manual assembly," *Advances in Production Engineering & Management*, Jg. 16, Nr. 4, S. 393–404, 2021, ISSN: 1854-6250. DOI: 10.14743/apem2021.4.408.
- [34] A. Baechler, L. Baechler, S. Autenrieth, P. Kurtz, T. Hoerz, T. Heidenreich und G. Kruell, "A Comparative Study of an Assistance System for Manual Order Picking – Called Pick-by-Projection – with the Guiding Systems Pick-by-Paper, Pick-by-Light and Pick-by-Display," in *Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, T. X. Bui und R. H. Sprague, Hrsg., Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 523–531, ISBN: 978-0-7695-5670-3. DOI: 10.1109/HICSS.2016.72.
- [35] Z. Yang, J. Shi, W. Jiang, Y. Sui, Y. Wu, S. Ma, C. Kang und H. Li, "Influences of Augmented Reality Assistance on Performance and Cognitive Loads in Different Stages of Assembly Task," *Frontiers in psychology*, Jg. 10, S. 1703, 2019, ISSN: 1664-1078. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01703.
- [36] D.-I. M. König und Winkler, Univ.-Prof. Dr. habil. Herwig, *Digitalisierung in der Montage mit dem Schwerpunkt des Einsatzes von Assistenzsystemen*, 2023. DOI: 10.26127/BTUopen-6212.

- [37] B. G. Mark, E. Rauch und D. T. Matt, "Worker assistance systems in manufacturing: A review of the state of the art and future directions," *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 59, S. 228–250, 2021, ISSN: 0278-6125. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.02.017.
- [38] Bosch Rexroth AG, *ActiveAssist: Das Assistenzsystem für die variantenreiche Montage*, FMS Technik, Hrsg., 2019. Adresse: [https://www.fms-technik.ch/produkte/industrie-4.0/pdf/R999001408_ActiveAssist_2.0_\(2019-07\)_media.pdf?m=1610617755&](https://www.fms-technik.ch/produkte/industrie-4.0/pdf/R999001408_ActiveAssist_2.0_(2019-07)_media.pdf?m=1610617755&).
- [39] MiniTec, *MiniTec SmartAssist: Werkerassistenzsystem*, 2024. Adresse: https://www.minitec.de/fileadmin/user_upload/downloads/MiniTec_SmartAssist_Flyer.pdf.
- [40] G. Spur, Hrsg., *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren* (Edition Handbuch der Fertigungstechnik), 1. Aufl. München: Hanser, 2014, ISBN: 3-446-42827-5.
- [41] P. Burggräf, M. Dannapfel, T. Adlon und N. Föhlisch, "Adaptive assembly systems for enabling agile assembly – Empirical analysis focusing on cognitive worker assistance," *Procedia CIRP*, Jg. 97, S. 319–324, 2021, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.244.
- [42] P. Rupprecht, H. Kueffner-McCauley, M. Trimmel, M. Hornacek und S. Schlund, "Advanced Adaptive Spatial Augmented Reality utilizing Dynamic in-situ Projection in Industrial Site Assembly," *Procedia CIRP*, Jg. 107, S. 937–942, 2022, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.088.
- [43] H.-J. Warnecke, H.-G. Löhr und W. Kiener, *Montagetechnik: Schwerpunkt der Rationalisierung* (Buchreihe Produktionstechnik heute). Mainz: Krausskopf, 1975, Bd. 7, ISBN: 978-3-7830-0098-6.
- [44] B. Lotter und H.-P. Wiendahl, *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis* (VDI-Buch), 2nd ed. Dordrecht: Springer, 2012, ISBN: 978-3-642-29061-9.
- [45] L. Stauder, A.-L. Knott, R. H. Schmitt und T. Bergs, "Methodology for the integrative adaption of manufacturing process and inspection sequences to component changes of safety-critical medical products," *Production Engineering*, Jg. 16, Nr. 4, S. 535–544, 2022, ISSN: 0944-6524. DOI: 10.1007/s11740-022-01114-1.
- [46] K. Moenck, J.-E. Rath, J. Koch, A. Wendt, F. Kalscheuer, T. Schüppstuhl und D. Schoepflin, "Digital twins in aircraft production and MRO: challenges and opportunities," *CEAS Aeronautical Journal*, 2024, ISSN: 1869-5582. DOI: 10.1007/s13272-024-00740-y.

- [47] K. Moenck, J. Koch, J.-E. Rath, L. Büsch, J. Gierecker, F. Kähler, F. Kalscheuer, C. Masuhr, J. Kipping, P. Prünke, D. Schoepflin, H. Eschen, L. A. Wulff, R. Rodeck, G. Wende, M. Gomse und T. Schüppstuhl, "Industry 5.0 in aircraft production and MRO: challenges and opportunities," *CEAS Aeronautical Journal*, 2025, ISSN: 1869-5582. DOI: 10.1007/s13272-025-00832-3.
- [48] Mordor Intelligence, *Commercial aviation market size share analysis - growth trends forecasts up to 2030*, 2023. Adresse: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/commercial-aircraft-market-share>.
- [49] M. Vette-Steinkamp, "Rekonfigurierbares Robotersystem für die Montage von flächigen Flugzeugstrukturbauteilen," Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2018, ISBN: 978-3-8440-6005-8.
- [50] H. Gruss, "Schweißgerechte Struktur- und Prozessstrategien im Flugzeugbau," Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2008. DOI: 10.25673/4898.
- [51] M. Hinsch, *Industrielles Luftfahrtmanagement: Technik und Organisation luftfahrttechnischer Betriebe*, 5. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2022, ISBN: 978-3-662-66451-3. DOI: 10.1007/978-3-662-66452-0.
- [52] D. Scholz, "Flugzeugsysteme," in *Handbuch der Luftfahrzeugtechnik*, Ser. Hanser eLibrary, C.-C. Rossow, K. Wolf und P. Horst, Hrsg., München: Hanser Verlag, 2014, S. 700-805, ISBN: 978-3-446-42341-1. DOI: 10.3139/9783446436046.007.
- [53] H. Eschen, "Automatisierte Herstellung individueller, ebener Sandwichbauteile für Flugzeugkabineninterieur," Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2022, ISBN: 978-3-8439-4951-4.
- [54] S. Elstner, "Eine Methode zur Bewertung von Anlauftrisiken in der Produktentwicklung für die Flugzeugindustrie," Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2017, ISBN: 978-3-946094-21-0.
- [55] Airbus SE, *Production: Building aircraft on time and at top quality*, 2024. Adresse: <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/the-life-cycle-of-an-aircraft/production>.
- [56] J. Ríos, F. M. Morate, M. Oliva und J. C. Hernández, "Framework to support the aircraft digital counterpart concept with an industrial design view," *International Journal of Agile Systems and Management*, Jg. 9, Nr. 3, S. 212, 2016, ISSN: 1741-9174. DOI: 10.1504/IJASM.2016.079934.
- [57] W. N. Felder, *Barriers to Automation of Aircraft Production*, National Institute of Standards and Technology, Hrsg., 2009.

- [58] P. Webb, "Automated Aerospace Manufacture and Assembly," in *Encyclopedia of aerospace engineering*, R. Blockley und W. Shyy, Hrsg., Chichester: Wiley, 2010, ISBN: 978-0-470-75440-5. DOI: 10.1002/9780470686652.eae366.
- [59] S. J. Eastwood, P. Webb und C. McKeown, "The use of the TI 2 manufacturing system on a double-curvature aerospace panel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Jg. 217, Nr. 6, S. 849–855, 2003, ISSN: 0954-4054. DOI: 10.1243/09544050360673224.
- [60] R. S. Weidner, "Wissensbasierte Planung und Beurteilung von Montagesystemen in der Luftfahrtindustrie," Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität, 2014, ISBN: 978-3-8440-2577-4.
- [61] F. Gehlhoff, H. Nabizada, M. Weigand, L. Beers, O. Ismail, A. Wenzel, A. Fay, P. Nyhuis, W. Lagutin und M. Röhrig, "Challenges in Automated Commercial Aircraft Production," *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 55, Nr. 2, S. 354–359, 2022, ISSN: 2405-8963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.04.219.
- [62] T. Auerbach, F. Bauhoff, M. Beckers, D. Behnen, C. Brecher, T. Brosze, G. Buchholz, C. Büscher, B. Corves, U. Eppelt, M. Esser, D. Ewert, K. Fayzullin, R. Freudenberg, P. Fritz, S. Fuchs, Y.-S. Gloy, T. Gries, S. Haag, E. Hauck, W. Herfs, N. Hering, M. Hüsing, M. Isermann, M. Janssen, S. Jeschke, B. Kausch, T. Kempf, F. Klocke, S. Kratz, S. Kuz, P. Loosen, J. Lose, A. Malik, M. P. Mayer, W. Michaeli, T. Molitor, R. Müller, S. Müller, B. Odenthal, A. Pavim, D. Petring, R. Poprawe, T. Potente, N. Pyschny, U. Reisingen, A. Reißmann, M. Riedel, H. Schenuit, D. Schilberg, C. M. Schlick, R. Schmitt, G. Schuh, W. Schulz, M. Schürmeyer, J. Schüttler, U. Thombansen, D. Veselovac, M. Vette, C. Wagels, K. Willms, M. Laass und S. Runge, "Selbstoptimierende Produktionssysteme," in *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*, C. Brecher, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 747–1057, ISBN: 978-3-642-20692-4. DOI: 10.1007/978-3-642-20693-1_6.
- [63] K. Ottogalli, D. Rosquete, J. Rojo, A. Amundarain, J. María Rodríguez und D. Borro, "Virtual reality simulation of human-robot coexistence for an aircraft final assembly line: process evaluation and ergonomics assessment," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Jg. 34, Nr. 9, S. 975–995, 2021, ISSN: 0951-192X. DOI: 10.1080/0951192X.2021.1946855.
- [64] P. Webb, S. Asif, S. Hogger, T. Kosche und P. Kiernan, "Advanced flexible automation cell control for aerospace manufacturing," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Jg. 87, Nr. 2, S. 156–164, 2015, ISSN: 0002-2667. DOI: 10.1108/AEAT-11-2012-0204.
- [65] T. Schüppstuhl und C. Schlosser, "Anwendungsfeld Flugzeugbau," in *Handbuch Industrie 4.0*, G. Reinhart, Hrsg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, S. 635–651, ISBN: 978-3-446-44642-7. DOI: 10.3139/9783446449893.023.

- [66] M. Hinsch, *Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie: DIN EN 9100:2018 - Einführung und Anwendung in der betrieblichen Praxis*, 5. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2020, ISBN: 978-3-662-61746-5. DOI: 10.1007/978-3-662-61747-2.
- [67] International Air Transport Association, *Weltweiter Umsatz mit Passagieren im Flugverkehr von 2004 bis 2025 (in Milliarden US-Dollar)*, Statista, Hrsg., 2024. Adresse: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/4366/umfrage/weltweiter-umsatz-mit-passagieren-im-flugverkehr/>.
- [68] Boeing und Airbus, *Anzahl der bei Airbus und Boeing bestellten Flugzeuge in den Jahren 2003 bis 2023 (Bruttobestellungen)*, Statista, Hrsg., 2024. Adresse: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36629/umfrage/auftragsentwicklung-bei-airbus-und-boeing/>.
- [69] A. Biele, "Produktionsplanungsansätze in der Flugzeugmontage: Modellierung, Algorithmen und Leistungsbewertung," Dissertation, Fernuniversität Hagen, 2018. DOI: 10.18445/20190115-090008-0.
- [70] L. G. Trabasso und G. L. Mosqueira, "Light automation for aircraft fuselage assembly," *The Aeronautical Journal*, Jg. 124, Nr. 1272, S. 216–236, 2020, ISSN: 0001-9240. DOI: 10.1017/aer.2019.117.
- [71] T. Masiak, "Entwicklung eines Mensch-Roboter-kollaborationsfähigen Nietprozesses unter Verwendung von KI-Algorithmen und Blockchain-Technologien: unter Randbedingungen der Flugzeugstrukturmontage," Dissertation, Universität des Saarlandes, 2020. DOI: 10.22028/D291-33029.
- [72] L. Zheng, X. Liu, Z. An, S. Li und R. Zhang, "A smart assistance system for cable assembly by combining wearable augmented reality with portable visual inspection," *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, Jg. 2, Nr. 1, S. 12–27, 2020, ISSN: 2096-5796. DOI: 10.1016/j.vrih.2019.12.002.
- [73] D. Meiners, "Beitrag zur Stabilität und Automatisierung von CFK-Produktionsprozessen," Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2011, ISBN: 978-394-221-662-3.
- [74] P. Rupprecht, H. Kueffner-McCauley, M. Trimmel und S. Schlund, "Adaptive Spatial Augmented Reality for Industrial Site Assembly," *Procedia CIRP*, Jg. 104, S. 405–410, 2021, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.068.
- [75] H. Wildemann und F. Hojak, "Main Differences and Commonalities Between the Aircraft and the Automotive Industry," in *Supply chain integration challenges in commercial aerospace*, K. Richter und J. Walther, Hrsg., Cham: Springer, 2017, S. 119–138, ISBN: 978-3-319-46154-0. DOI: 10.1007/978-3-319-46155-7_9.

- [76] F. Mas, J. Racero, M. Oliva und D. Morales-Palma, "Preliminary ontology definition for aerospace assembly lines in Airbus using Models for Manufacturing methodology," *Procedia Manufacturing*, Jg. 28, S. 207–213, 2019, ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.12.034.
- [77] Spiegel, Hrsg., *Airbus sucht in diesem Jahr in Deutschland 3500 Mitarbeiter*, 2023. Adresse: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/fachkraeftemangel-airbus-sucht-in-diesem-jahr-in-deutschland-3500-mitarbeiter-a-9e2f47ae-15cd-4111-9732-21234e7d4a8a>.
- [78] J. Koenen, *Luftfahrt-Zulieferer rufen den Personalnotstand aus*, Handelsblatt, Hrsg., 2023. Adresse: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/flugzeugbau-luftfahrt-zulieferer-rufen-den-personalnotstand-aus/29207974.html>.
- [79] V. Di Pasquale, S. Miranda, W. P. Neumann und A. Setayesh, "Human reliability in manual assembly systems: a Systematic Literature Review," *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 51, Nr. 11, S. 675–680, 2018, ISSN: 2405-8963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.396.
- [80] A. A. Alogla und M. Alruqi, "Aircraft Assembly Snags: Human Errors or Lack of Production Design?" *Aerospace*, Jg. 8, Nr. 12, S. 391, 2021. DOI: 10.3390/aerospace8120391.
- [81] M. Kuhl, T. Wiener und M. Krauß, "Multisensorial Self-learning Systems for Quality Monitoring of Carbon Fiber Composites in Aircraft Production," *Procedia CIRP*, Jg. 12, S. 103–108, 2013, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2013.09.019.
- [82] K. Ehrlenspiel, A. Kiewert, U. Lindemann und M. Mörtl, "Einflüsse auf die Herstellkosten und Maßnahmen zur Kostensenkung," in *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*, Ser. VDI-Buch Ser, K. Ehrlenspiel, A. Kiewert, U. Lindemann und M. Mörtl, Hrsg., Dordrecht: Springer, 2013, S. 165–415, ISBN: 978-3-642-41958-4. DOI: 10.1007/978-3-642-41959-1_7.
- [83] J. Koch, G. Lotzing, H. Eschen, K. Moenck und T. Schüppstuhl, "A human-centered IIoT platform approach for manual inspections: Towards digital documentation and assistance applications," *Procedia CIRP*, Jg. 120, S. 762–767, 2024, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.072.
- [84] T. Sheveleva, K. Herrmann, M. L. Wawer, C. Kahra, F. Nürnberger, O. Koepler, I. Mozgova, R. Lachmayer und S. Auer, "Ontology-Based Documentation of Quality Assurance Measures Using the Example of a Visual Inspection," in *Advances in System-Integrated Intelligence*, Ser. Lecture Notes in Networks and Systems, M. Valle, D. Lehnhus, C. Gianoglio, E. Ragusa, L. Seminara, S. Bosse, A. Ibrahim und K.-D. Thoben, Hrsg., Bd. 546, Cham: Springer International Publishing, 2023, S. 415–424, ISBN: 978-3-031-16280-0. DOI: 10.1007/978-3-031-16281-7_39.

- [85] R. Hussamadin, G. Jansson und J. Mikkavaara, "Digital Quality Control System—A Tool for Reliable On-Site Inspection and Documentation," *Buildings*, Jg. 13, Nr. 2, S. 358, 2023. DOI: 10.3390/buildings13020358.
- [86] ZEIT Online, Deutsche Presse-Agentur, Associated Press, Reuters, L. Pausch und M. Peer, "US-Airlines finden weitere Probleme bei Boeing-737-9-Max-Inspektion," *ZEIT Online*, Jg. 2024, 9.01.2024. Adresse: <https://www.zeit.de/wirtschaft/2024-01/boeing-inspektion-lose-schrauben>.
- [87] ZEIT Online, Reuters und M. Bogner, "US-Behörde verhängt unbefristetes Flugverbot für Boeing-Modell," *ZEIT Online*, Jg. 2024, 13.01.2024. Adresse: <https://www.zeit.de/wirtschaft/unternehmen/2024-01/boeing-737-max-verbot-aufsichtsbehoerde>.
- [88] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 9000:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN IS 9000:2015*, Berlin, 2015. DOI: 10.31030/2325650.
- [89] W. Eversheim, *Organisation in der Produktionstechnik Band 4*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1989, ISBN: 978-3-642-64800-7. DOI: 10.1007/978-3-642-61344-9.
- [90] H.-J. Warnecke, "Ablauf der Montage," in *Fügen, Handhaben und Montieren*, Ser. Handbuch der Fertigungstechnik / hrsg. von Günter Spur und Theodor Stöferle, G. Spur, Hrsg., München: Hanser, 1986, ISBN: 3-446-12536-1.
- [91] G. Spur und H.-J. Helwig, "Einführung in die Montagetechnik," in *Fügen, Handhaben und Montieren*, Ser. Handbuch der Fertigungstechnik / hrsg. von Günter Spur und Theodor Stöferle, G. Spur, Hrsg., München: Hanser, 1986, ISBN: 3-446-12536-1.
- [92] L. Hörauf, "Software-gestützte Planung cyber-physischer Montagesysteme mittels durchgängiger Informationsnutzung," Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2019, ISBN: 978-3-8440-6674-6.
- [93] Deutsches Institut für Normung, *DIN 55350:2021-10, Begriffe zum Qualitätsmanagement*, Berlin, 2021. DOI: 10.31030/3270647.
- [94] C. Brückner, *Qualitätsmanagement für die Automobilindustrie: Grundlagen, Normen, Methoden ; [mit praktischem Normenwegweiser ISO 9001, TS 16949 VDA 6.2, VDA 6.4, 1. Aufl.* Düsseldorf: Symposion Publishing, 2009, ISBN: 978-3-939707-20-2.
- [95] M. Hinsch und J. Olthoff, Hrsg., *Impulsgeber Luftfahrt: Industrial Leadership durch luftfahrtspezifische Aufbau- und Ablaufkonzepte (Lexikon)*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, ISBN: 978-3-642-32668-4.
- [96] Verein Deutscher Ingenieure, *Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung: Einführung, Grundlagen*, 1978.

- [97] B. Bender, K. Gericke, J. Heusel, T. Bronnhuber, O. Helms, J. Krzywinski, F. Klocke, K. Dilger, R. Müller, T. Ehlers und R. Lachmayer, "Gestaltungsrichtlinien," in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, B. Bender und K. Gericke, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, S. 567–828, ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7_16.
- [98] G. Seliger, "Montage und Demontage," in *Dubbel*, K.-H. Grote und J. Feldhusen, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 1461–1467, ISBN: 978-3-642-38890-3. DOI: 10.1007/978-3-642-38891-0_115.
- [99] Deutsches Institut für Normung, *DIN 8580:2022-12, Fertigungsverfahren-Begriffe, Einteilung*, Berlin, 2022. DOI: 10.31030/3217872.
- [100] Deutsches Institut für Normung, *DIN 8593-0:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin, 2003. DOI: 10.31030/9500684.
- [101] K. Engmann, Hrsg., *Technologie des Flugzeuges* (Vogel Fachbuch), 6., neu bearb. Aufl. Würzburg: Vogel, 2015, ISBN: 978-3-8343-6195-0.
- [102] Deutsches Institut für Normung, *DIN 8593-5:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen - Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin, 2003. DOI: 10.31030/9500689.
- [103] L. Mende, "Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage," Dissertation, Universität des Saarlandes, 2020. DOI: 10.22028/D291-32507.
- [104] Federal Aviation Administration, Hrsg., *Airworthiness Certification: How Does the FAA Certify Aircraft?* 2023. Adresse: https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/airworthiness_certification.
- [105] S. Hesse, *Grundlagen der Handhabungstechnik: Mit 15 Tabellen sowie 17 Übungsaufgaben und 104 Kontrollfragen*, 2., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser, 2010, ISBN: 978-3-446-41872-1. DOI: 41872.
- [106] V. Azamfirei, F. Psarommatis und Y. Lagrosen, "Application of automation for in-line quality inspection, a zero-defect manufacturing approach," *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 67, S. 1–22, 2023, ISSN: 0278-6125. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.12.010.
- [107] G. Lanza, B. Haefner, L. Schild, D. Berger, N. Eschner, R. Wagner und M. Zaiß, "In-Line Measurement Technology and Quality Control," in *Metrology*, Ser. Springer reference, W. Gao, Hrsg., Singapore: Springer, 2019, S. 399–433, ISBN: 978-981-10-4937-8. DOI: 10.1007/978-981-10-4938-5_14.
- [108] J. M. Rožanec, E. Trajkova, P. Dam, B. Fortuna und D. Mladenčić, "Streaming Machine Learning and Online Active Learning for Automated Visual Inspection," *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 55, Nr. 2, S. 277–282, 2022, ISSN: 2405-8963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.04.206.

- [109] M. Richter, "Über lernende optische Inspektion am Beispiel der Schüttgut-sortierung," Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2018. DOI: 10.5445/KSP/1000085620.
- [110] J. Jamshidi, A. Kayani, P. Iravani, P. G. Maropoulos und M. D. Summers, "Manufacturing and assembly automation by integrated metrology systems for aircraft wing fabrication," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Jg. 224, Nr. 1, S. 25–36, 2010, ISSN: 0954-4054. DOI: 10.1243/09544054JEM1280.
- [111] A. Weckenmann und T. Werner, "Produktion: Messen und Prüfen," in *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, T. Pfeifer und W. Masing, Hrsg., München und Wien: Hanser, 2014, S. 623–664, ISBN: 978-3-446-43431-8. DOI: 10.3139/9783446439924.027.
- [112] R. Schmitt und T. Pfeifer, *Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken*, 4., vollst. überarb. Aufl. München: Hanser, 2010, ISBN: 978-3-446-41277-4. DOI: 41277.
- [113] H. Brüggemann und P. Bremer, "Qualitätsmanagementsysteme," in *Grundlagen Qualitätsmanagement*, H. Brüggemann und P. Bremer, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 124–150, ISBN: 978-3-658-28779-5. DOI: 10.1007/978-3-658-28780-1_5.
- [114] W. Geiger und W. Kotte, *Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven (Praxis und Studium)*, 5., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2008, ISBN: 978-3-8348-0273-6. DOI: 03357.
- [115] J. Herrmann und H. Fritz, "Qualität managen," in *Qualitätsmanagement*, J. Herrmann und H. Fritz, Hrsg., München: Hanser, 2016, S. 9–26, ISBN: 978-3-446-44043-2. DOI: 10.3139/9783446440227.002.
- [116] W. E. Deming, *Out of the Crisis* (MIT Press Ser). Cambridge: MIT Press, 2000, ISBN: 978-0-262-28763-0.
- [117] G. Linß, "Prüfplanung," in *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, Ser. Hanser eLibrary, T. Pfeifer, R. Schmitt und W. Masing, Hrsg., München: Hanser, 2021, S. 651–675, ISBN: 978-3-446-46230-4. DOI: 10.3139/9783446466210.028.
- [118] W. Jakoby, *Qualitätsmanagement für Ingenieure: Eine Einführung in die qualitätsorientierte Gestaltung von Produkten, Prozessen und Organisationen* (Lehrbuch), 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2022, ISBN: 978-3-658-36676-6.
- [119] G. Linß, "Methoden und Werkzeuge zur Qualitätsplanung," in *Qualitätsmanagement für Ingenieure*, G. Linß, Hrsg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018, S. 283–358, ISBN: 978-3-446-44042-5. DOI: 10.3139/9783446439368.011.

- [120] E. Hering und A. Schloske, *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse: Methode zur vorbeugenden, systematischen Qualitätsplanung unter Risikogesichtspunkten* (essentials). Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2019, ISBN: 978-3-658-25765-7.
- [121] W. Geiger und W. Kotte, "Tätigkeitsbegriffe zum Qualitätsmanagement," in *Handbuch Qualität*, Ser. Praxis und Studium, W. Geiger und W. Kotte, Hrsg., Wiesbaden: Vieweg, 2008, S. 101–122, ISBN: 978-3-8348-0273-6. DOI: 10.1007/978-3-8348-9429-8_10.
- [122] J. P. Sondermann, "Poka Yoke in der Qualitätslenkung und -prüfung," in *Poka Yoke*, Ser. Pocket Power, J. P. Sondermann und J. P. Sondermann, Hrsg., München: Hanser, 2013, S. 33–37, ISBN: 978-3-446-43569-8. DOI: 10.3139/9783446437616.004.
- [123] W. Dutschke, "Prüfdatenauswertung," in *Fertigungsmesstechnik*, W. Dutschke, Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2002, S. 211–216, ISBN: 978-3-519-36322-4. DOI: 10.1007/978-3-322-96810-4_15.
- [124] G. F. Kamiske, "Qualitätssicherung als Motor für Entwicklung und Stabilität," in *Qualitätssicherung - Praxiswissen*, G. F. Kamiske, Hrsg., München: Hanser, 2015, S. 1–32, ISBN: 978-3-446-44515-4. DOI: 10.3139/9783446446113.001.
- [125] J. M. Juran, *Der neue Juran: Qualität von Anfang an*. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 1993, ISBN: 978-3-478-41010-6.
- [126] H. Brüggemann und P. Bremer, "QM im Produktrealisierungsprozess," in *Grundlagen Qualitätsmanagement*, H. Brüggemann und P. Bremer, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 151–168, ISBN: 978-3-658-28779-5. DOI: 10.1007/978-3-658-28780-1_6.
- [127] P. Gust, "Toleranzen – geometrische Produktspezifikationen schaffen Qualität," in *Maschinenbau*, W. Skolaut, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 783–810, ISBN: 978-3-662-55881-2. DOI: 10.1007/978-3-662-55882-9_24.
- [128] K. Schiebold, *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Sichtprüfung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, ISBN: 978-3-662-44666-9. DOI: 10.1007/978-3-662-44667-6.
- [129] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 9712:2022-09, Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung (ISO 9712:2021); Deutsche Fassung EN ISO 9712:2022*, Berlin, 2022. DOI: 10.31030/3301059.
- [130] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 13018:2016-06, Zerstörungsfreie Prüfung - Sichtprüfung - Allgemeine Grundlagen; Deutsche Fassung EN 13018:2016*, Berlin, 2016. DOI: 10.31030/2414774.
- [131] T. Pfeifer, *Fertigungsmesstechnik*, 3rd ed. München: De Gruyter, 2011, ISBN: 978-3-486-71135-6. DOI: 10.1524/9783486711356.

- [132] C. P. Keferstein, M. Marxer und C. Bach, *Fertigungsmesstechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, ISBN: 978-3-658-17755-3. DOI: 10.1007/978-3-658-17756-0.
- [133] R. Tutsch, "Fertigungsmesstechnik," in *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, Ser. VDI-Buch, H.-J. Gevatter und U. Grünhaupt, Hrsg., Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, S. 199–362, ISBN: 3-540-21207-8. DOI: 10.1007/3-540-34823-9_11.
- [134] J. P. Rohweder, G. Kasten, D. Malzahn, A. Piro und J. Schmid, "Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe," in *Daten- und Informationsqualität*, K. Hildebrand, M. Gebauer, H. Hinrichs und M. Mielke, Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008, S. 25–45, ISBN: 978-3-8348-0321-4. DOI: 10.1007/978-3-8348-9266-9_2.
- [135] K. Ishikawa, *Introduction to quality control*. [S. l.]: Chapman-Hall und 3a corporation, 1989, ISBN: 978-94-011-7690-3.
- [136] F. Klocke, "Fertigungsmesstechnik und Werkstückqualität," in *Fertigungsverfahren 1*, Ser. VDI-Buch, F. Klocke, Hrsg., Berlin: Springer Vieweg, 2017, S. 5–45, ISBN: 978-3-662-54206-4. DOI: 10.1007/978-3-662-54207-1_2.
- [137] J. E. See, C. G. Drury, A. Speed, A. Williams und N. Kalandi, "The Role of Visual Inspection in the 21 st Century," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Jg. 61, Nr. 1, S. 262–266, 2017, ISSN: 2169-5067. DOI: 10.1177/1541931213601548.
- [138] W. Helbig, "Elementare Fehlerrechnung," in *Praxiswissen in der Messtechnik*, W. Helbig, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 41–54, ISBN: 978-3-658-27801-4. DOI: 10.1007/978-3-658-27802-1_3.
- [139] Deutsches Institut für Normung, *DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*, Berlin, 1995. DOI: 10.31030/2713411.
- [140] S. Prorok, "Messsystemanalyse," in *Statistische Unsicherheit in der industriellen Produktion*, S. Prorok, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 165–226, ISBN: 978-3-662-63888-0. DOI: 10.1007/978-3-662-63889-7_3.
- [141] S. Bracke, "Prüfprozesseignung," in *Technische Zuverlässigkeit*, S. Bracke, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 397–423, ISBN: 978-3-662-65014-1. DOI: 10.1007/978-3-662-65015-8_15.
- [142] G. Schönfelder, "Messfehler, Messgenauigkeit und Messparameter," in *Sensoren in Wissenschaft und Technik*, E. Hering und G. Schönfelder, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023, S. 821–830, ISBN: 978-3-658-39490-5. DOI: 10.1007/978-3-658-39491-2_18.

- [143] B. Štrbac, B. Ačko, S. Havrlišan, I. Matin, B. Savković und M. Hadžistević, "Investigation of the effect of temperature and other significant factors on systematic error and measurement uncertainty in CMM measurements by applying design of experiments," *Measurement*, Jg. 158, S. 107692, 2020, ISSN: 0263-2241. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107692.
- [144] F. Puente León, "Zufällige Messfehler," in *Messtechnik*, F. Puente León, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 105–177, ISBN: 978-3-662-44820-5. DOI: 10.1007/978-3-662-44821-2_4.
- [145] R. Christoph und H. J. Neumann, *Multisensor-Koordinatenmesstechnik: Dimensionelles Messen mit Optik, Taster und Röntgentomografie* (Die Bibliothek der Technik), 2., überarbeitete Auflage. Landsberg: verlag moderne industrie, 2019, Bd. Band 352, ISBN: 978-3-86236-124-3.
- [146] Deutsches Institut für Normung, *DIN ISO 22514-7:2020-06, Statistische Verfahren im Prozessmanagement - Fähigkeit und Leistung - Teil 7: Fähigkeit von Messprozessen (ISO/DIS 22514-7:2020); Text Deutsch und Englisch*, Berlin, 2020. DOI: 10.31030/3160215.
- [147] D. Hofmann, "Analyse und Korrektur systematischer, zufälliger und grober Meßfehler," in *Handbuch Meßtechnik und Qualitätssicherung*, D. Hofmann, Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1983, S. 183–210, ISBN: 978-3-528-08507-0. DOI: 10.1007/978-3-663-14093-1_10.
- [148] M. Marxer, C. Bach und C. P. Keferstein, *Fertigungsmesstechnik: Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik* (Lehrbuch), 10., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, ISBN: 978-3-658-34167-1. DOI: 10.1007/978-3-658-34168-8.
- [149] Y. Torres, S. Nadeau und K. Landau, "Classification and Quantification of Human Error in Manufacturing: A Case Study in Complex Manual Assembly," *Applied Sciences*, Jg. 11, Nr. 2, S. 749, 2021. DOI: 10.3390/app11020749.
- [150] H. Czichos und H. Sturm, "Tribologische Mess- und Prüftechnik," in *Tribologie-Handbuch*, H. Czichos und K.-H. Habig, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 245–310, ISBN: 978-3-658-29483-0. DOI: 10.1007/978-3-658-29484-7_9.
- [151] R. Weidner, T. Redlich und J. P. Wulfsberg, Hrsg., *Technische Unterstützungssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015, ISBN: 978-3-662-48383-1. DOI: 10.1007/978-3-662-48383-1.
- [152] M. Herczeg, *Software-Ergonomie: Grundlagen der Mensch-Computer-Kommunikation*, 1. Aufl. Bonn: Addison-Wesley, 1994, ISBN: 3-486-24357-8.

- [153] D. Zühlke, *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen: Ueware-Engineering für technische Systeme* (VDI-Buch), 2. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, ISBN: 978-3-642-22073-9. DOI: 10.1007/978-3-642-22074-6.
- [154] B. G. Mark, E. Rauch und D. T. Matt, “Industrial Assistance Systems to Enhance Human–Machine Interaction and Operator’s Capabilities in Assembly,” in *Implementing Industry 4.0 in SMEs*, D. T. Matt, V. Modrák und H. Zsifkovits, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 129–161, ISBN: 978-3-030-70515-2. DOI: 10.1007/978-3-030-70516-9_4.
- [155] W. Apt, M. Bovenschulte, K. Priesack, C. Weiss, E. Hartmann und VDI-VDE Innovation + Technik GmbH Institut für Innovation und Technik, *Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb* (Forschungsbericht). Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2018.
- [156] T. Keller, C. Bayer, P. Bausch und J. Metternich, “Benefit evaluation of digital assistance systems for assembly workstations,” *Procedia CIRP*, Jg. 81, S. 441–446, 2019, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.076.
- [157] R. Sochor, L. Kraus, L. Merkel, S. Braunreuther und G. Reinhart, “Approach to Increase Worker Acceptance of Cognitive Assistance Systems in Manual Assembly,” *Procedia CIRP*, Jg. 81, S. 926–931, 2019, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.229.
- [158] R. Müller, M. Vette-Steinkamp, L. Hörauf, C. Speicher und A. Bashir, “Worker centered cognitive assistance for dynamically created repairing jobs in rework area,” *Procedia CIRP*, Jg. 72, S. 141–146, 2018, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.137.
- [159] M. Bornewasser und S. Hinrichsen, Hrsg., *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2020. DOI: 10.1007/978-3-662-61374-0.
- [160] C. Petzoldt, D. Keiser, T. Beincke und M. Freitag, “Functionalities and Implementation of Future Informational Assistance Systems for Manual Assembly,” in *Subject-Oriented Business Process Management. The Digital Workplace – Nucleus of Transformation*, Ser. Communications in Computer and Information Science, M. Freitag, A. Kinra, H. Kotzab, H.-J. Kreowski und K.-D. Thoben, Hrsg., Bd. 1278, Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 88–109, ISBN: 978-3-030-64350-8. DOI: 10.1007/978-3-030-64351-5_7.
- [161] P. Hold, S. Erol, G. Reisinger und W. Sihn, “Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems,” *Procedia Manufacturing*, Jg. 9, S. 143–150, 2017, ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.024.

- [162] T. Haase, A. Keller, F. Warschewske, M. Weitag, S. Sauer und D. Berndt, "Digital Assembly Assistance Systems: Methods, Technologies and Implementation Strategies," in *Human-Technology Interaction*, C. Röcker und S. Büttner, Hrsg., Cham: Springer International Publishing and Imprint Springer, 2023, S. 15–48, ISBN: 978-3-030-99237-7. DOI: 10.1007/978-3-030-99235-4_2.
- [163] E. Lampen, J. Teuber, F. Gaisbauer, T. Bär, T. Pfeiffer und S. Wachsmuth, "Combining Simulation and Augmented Reality Methods for Enhanced Worker Assistance in Manual Assembly," *Procedia CIRP*, Jg. 81, S. 588–593, 2019, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.160.
- [164] A. B. Postawa, "Werker-Assistenz und -Qualifizierung für manuelle (De-)Montage durch bild- und schriftgestützte Visualisierung am Arbeitsplatz," Dissertation, Technische Universität Berlin, 2014, ISBN: 978-3-8396-0733-6.
- [165] B. Otten, "Tätigkeitsgerechte Unterstützung durch Exoskelette mit aktiven Antrieben," Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr, 2023. DOI: 10.24405/14780.
- [166] M. P. de Looze, T. Bosch, F. Krause, K. S. Stadler und L. W. O'Sullivan, "Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load," *Ergonomics*, Jg. 59, Nr. 5, S. 671–681, 2016. DOI: 10.1080/00140139.2015.1081988.
- [167] S. Schlund, "Assistenzsysteme," in *Handbuch Unternehmensorganisation*, D. Spath und E. Westkamper, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019, S. 1–16, ISBN: 978-3-642-45370-0. DOI: 10.1007/978-3-642-45370-0_90-1.
- [168] F. Kalscheuer, H. Eschen und T. Schüppstuhl, "Towards Semi Automated Pre-assembly for Aircraft Interior Production," in *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*, T. Schüppstuhl, K. Tracht und A. Raatz, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 203–213, ISBN: 978-3-030-74031-3. DOI: 10.1007/978-3-030-74032-0_17.
- [169] S. Beetz, "Beitrag zur Methode der Arbeitsplatz-integrierten Assistenz am Beispiel Formmesstechnik," Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006, ISBN: 978-3-8322-4953-3.
- [170] R. Sochor, L. Merkel, S. Braunreuther, G. Reinhart und F. Greiter, "Monetäre Bewertung eines Anreizsystems/Economic feasibility study of an incentive system for motivating manual assembly employees," *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 110, Nr. 03, S. 125–129, 2020, ISSN: 1436-4980. DOI: 10.37544/1436-4980-2020-03-41.

- [171] R. D. Sochor, "Verbesserung des Wissensmanagements in der manuellen Montage durch Einsatz eines Anreizsystems," Dissertation, Technische Universität München, 2023, ISBN: 978-3-8316-5047-7.
- [172] K. Fink, "Cognitive assistance systems for manual assembly throughout the German manufacturing industry," *Journal of Applied Leadership and Management*, Nr. 8, S. 38–53, 2020. Adresse: <https://www.journal-alm.org/article/view/21149>.
- [173] D. Bläsing und M. Bornewasser, "Influence of Increasing Task Complexity and Use of Informational Assistance Systems on Mental Workload," *Brain sciences*, Jg. 11, Nr. 1, 2021, ISSN: 2076-3425. DOI: 10.3390/brainsci11010102.
- [174] M. Drouot, N. Le Bigot, E. Bricard, J.-L. de Bougrenet und V. Nourrit, "Augmented reality on industrial assembly line: Impact on effectiveness and mental workload," *Applied ergonomics*, Jg. 103, S. 103793, 2022. DOI: 10.1016/j.apergo.2022.103793.
- [175] J. Klapper, E. Gelec, B. Pokorni, M. Hämmerle und R. Rothenberger, *Potenzielle digitaler Assistenzsysteme*, 2019. DOI: 10.24406/PUBLICA-FHG-299758.
- [176] J. Imorde, N. Steireif, F. Willemsen, M. Kranz und S. Mütze-Niewöhner, *Intelligente Assistenzsysteme in der Produktion: eine Interviewstudie mit Betriebsratsmitgliedern zu Fragen der Beteiligung, des Nutzens und der Arbeitsgestaltung*. RWTH Aachen University, 2023. DOI: 10.18154/RWTH-2023-03726.
- [177] S. Werning, L. Berkemeier, B. Zobel, C. Fitte, I. Ickerott und O. Thomas, "Smart Glasses als Assistenzsystem in der betrieblichen Einarbeitung," *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, Jg. 56, Nr. 3, S. 612–627, 2019, ISSN: 1436-3011. DOI: 10.1365/s40702-018-00478-2.
- [178] A. Bächler, L. Bächler, S. Autenrieth, H. Behrendt, M. Funk, G. Krüll, T. Hörz, T. Heidenreich, C. Misselhorn und A. Schmidt, "Systeme zur Assistenz und Effizienzsteigerung in manuellen Produktionsprozessen der Industrie auf Basis von Projektion und Tiefendatenerkennung," in *Zukunft der Arbeit - Eine praxisnahe Betrachtung*, S. Wischmann und E. Andreas Hartmann, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, S. 33–49, ISBN: 978-3-662-49265-9. DOI: 10.1007/978-3-662-49266-6_3.
- [179] L. Mlekus, J. Lehmann und G. W. Maier, "New work situations call for familiar work design methods: Effects of task rotation and how they are mediated in a technology-supported workplace," *Frontiers in psychology*, Jg. 13, S. 935952, 2022, ISSN: 1664-1078. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.935952.

- [180] S. Drolshagen, M. Pfingsthorn, P. Gliesche und A. Hein, "Acceptance of Industrial Collaborative Robots by People With Disabilities in Sheltered Workshops," *Frontiers in robotics and AI*, Jg. 7, S. 541 741, 2020. DOI: 10 . 3389 / frobt . 2020 . 541741.
- [181] M. Jost, A. Luxenburger, S. Knoch und J. Alexandersson, "PARTAS: A Personalizable Augmented Reality Based Task Adaption System for Workers with Cognitive Disabilities," in *Proceedings of the 15th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, F. Makedon, Hrsg., New York, NY, USA: ACM, 2022, S. 159–168, ISBN: 978-1-4503-9631-8. DOI: 10 . 1145/3529190 . 3529208.
- [182] A. Bächler, T. Hörz, G. Krüll, L. Bächler, S. Autenrieth, T. Heidenreich und P. Kurtz, "Assistenzsysteme für manuelle Industrieprozesse: Innovative Assistenz für leistungsgeminderte und leistungsgewandelte Mitarbeiter in der manuellen Montage und Kommissionierung," in *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen*, R. Weidner und T. Redlich, Hrsg., Hamburg: Univ. der Bundeswehr Hamburg Laboratorium Fertigungstechnik, 2014, S. 130–141, ISBN: 978-3-86818-073-2.
- [183] T. Keller, "Analyse der Effekte von Werkerassistenzsystemen auf die Leistungsfähigkeit manueller Montagesysteme," Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2021, ISBN: 978-3-8440-8365-1.
- [184] K. Lensing, "KI-basierte Assistenzsysteme für die Industrie 4.0," in *Handbuch Industrie 4.0*, T. Bauernhansl, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023, S. 209–237, ISBN: 978-3-662-58531-3. DOI: 10 . 1007 / 978-3-662-58532-0_163.
- [185] C. Bayer, R. Makhlouf und J. Metternich, "Digitale Assistenzsysteme in der Produktion," *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 110, Nr. 03, S. 103–107, 2020, ISSN: 1436-4980. DOI: 10 . 37544/1436-4980-2020-03-19.
- [186] M. Aehnelt, "Informationsassistenz zur kognitiven Automatisierung manueller Montagearbeitsplätze," Dissertation, Universität Rostock, 2017. DOI: 10 . 18453/ROSDOK_ID00001917.
- [187] L. Merkel, C. Berger, S. Braunreuther und G. Reinhart, "Determination of Cognitive Assistance Functions for Manual Assembly Systems," in *Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design*, Ser. Advances in Intelligent Systems and Computing, T. Z. Ahram, Hrsg., Bd. 795, Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 198–207, ISBN: 978-3-319-94618-4. DOI: 10 . 1007/978-3-319-94619-1_19.
- [188] B. Pokorni, D. Popescu und C. Constantinescu, "Design of Cognitive Assistance Systems in Manual Assembly Based on Quality Function Deployment," *Applied Sciences*, Jg. 12, Nr. 8, S. 3887, 2022. DOI: 10 . 3390 / app12083887.

- [189] M. R. Endsley, "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Jg. 37, Nr. 1, S. 32–64, 1995, ISSN: 0018-7208. DOI: 10.1518/001872095779049543.
- [190] C. Stockinger, T. Steinebach, D. Petrat, R. Bruns und I. Zöller, "The Effect of Pick-by-Light-Systems on Situation Awareness in Order Picking Activities," *Procedia Manufacturing*, Jg. 45, S. 96–101, 2020, ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.078.
- [191] T. Rasmussen, T. Feuchtner, W. Huang und K. Grønbæk, "Supporting workspace awareness in remote assistance through a flexible multi-camera system and Augmented Reality awareness cues," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Jg. 89, S. 103655, 2022, ISSN: 1047-3203. DOI: 10.1016/j.jvcir.2022.103655.
- [192] C. Gutwin und S. Greenberg, "A Descriptive Framework of Workspace Awareness for Real-Time Groupware," *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, Jg. 11, Nr. 3-4, S. 411–446, 2002, ISSN: 0925-9724. DOI: 10.1023/A:1021271517844.
- [193] M. Aehnel und S. Bader, "Information Assistance for Smart Assembly Stations," in *Proceedings of the International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, S. Loiseau, Hrsg., S.l.: SCITEPRESS, 2015, S. 143–150, ISBN: 978-989-758-073-4. DOI: 10.5220/0005216501430150.
- [194] O. Korn, M. Funk und A. Schmidt, "Design approaches for the gamification of production environments," in *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, F. Makedon, G.-L. Mariottini, O. Korn, I. Maglogiannis und V. Metsis, Hrsg., New York, NY, USA: ACM, 2015, S. 1–7, ISBN: 9781450334525. DOI: 10.1145/2769493.2769549.
- [195] D. Keiser, C. Petzoldt, T. Beinke und M. Freitag, "Einsatz von Gamification zur Motivationssteigerung in manuellen Montageassistenzsystemen - Methodik zur Auswahl geeigneter Spiel-Design-Elemente," *Industrie Management 4.0*, Jg. 36, Nr. 3, S. 49–52, 2020.
- [196] "Entscheidungsunterstützung," in *Wirtschaftsinformatik*, W. Lassmann, J. Schwarzer, R. Rogge und H.-J. Kaftan, Hrsg., Wiesbaden: Gabler, 2006, S. 411–444, ISBN: 978-3-409-12725-7. DOI: 10.1007/978-3-8349-9152-2_10.
- [197] J. K. K. Ho und D. Sculli, "System complexity and the design of decision support systems," *Systems Practice*, Jg. 8, Nr. 5, S. 505–516, 1995, ISSN: 0894-9859. DOI: 10.1007/BF02281958.

- [198] M. Peruzzini, F. Grandi und M. Pellicciari, "Exploring the potential of Operator 4.0 interface and monitoring," *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 139, S. 105 600, 2020, ISSN: 0360-8352. DOI: 10.1016/j.cie.2018.12.047.
- [199] M. Lagomarsino, M. Lorenzini, E. de Momi und A. Ajoudani, "An Online Framework for Cognitive Load Assessment in Industrial Tasks," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 78, S. 102 380, 2022, ISSN: 0736-5845. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102380.
- [200] S. Büttner, "Projektionsbasierte Augmented-Reality-Assistenz in der Montage: Explorative Entwicklung und empirische Untersuchung von Anwendungsszenarien zur Entwicklung von Gestaltungsempfehlungen für zukünftige Systeme," Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2022. DOI: 10.21268/20220928-0.
- [201] T. Zigart, "Entwicklung eines multikriteriellen Evaluierungsmodells für industrielle Assistenzsysteme," Dissertation, Technische Universität Wien, 2022. DOI: 10.34726/HSS.2022.98440.
- [202] D. Keiser, C. Petzoldt, T. Beinke, M. Freitag und H. Vogler, "Mitarbeiterzentrierte Assistenzsysteme für die manuelle Montage - Systematische Evaluation von Montageassistenzsystemen," *Industrie Management 4.0*, Jg. 37, Nr. 3, S. 11–15, 2021.
- [203] S. Werrlich, "Gestaltungskonzept für Augmented Reality unterstütztes Training an manuellen Montagearbeitsplätzen," Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2020.
- [204] N. Döring, *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023, ISBN: 978-3-662-64761-5. DOI: 10.1007/978-3-662-64762-2.
- [205] F. D. Davis, "A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems : theory and results," 1985.
- [206] N. Marangunić und A. Granić, "Technology acceptance model: a literature review from 1986 to 2013," *Universal Access in the Information Society*, Jg. 14, Nr. 1, S. 81–95, 2015, ISSN: 1615-5289. DOI: 10.1007/s10209-014-0348-1.
- [207] V. Venkatesh und F. D. Davis, "A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies," *Management Science*, Jg. 46, Nr. 2, S. 186–204, 2000, ISSN: 0025-1909. DOI: 10.1287/mnsc.46.2.186.11926.
- [208] Venkatesh, Morris und Davis, "User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View," *MIS Quarterly*, Jg. 27, Nr. 3, S. 425, 2003, ISSN: 0276-7783. DOI: 10.2307/30036540.

- [209] V. Venkatesh und H. Bala, "Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions," *Decision Sciences*, Jg. 39, Nr. 2, S. 273–315, 2008, ISSN: 0011-7315. DOI: 10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x.
- [210] J. Brooke, "SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale," in *Usability evaluation in industry*, P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester und I. L. McClelland, Hrsg., Bristol, PA, London und ©1996: Taylor and Francis, 1996, ISBN: 0-429-15701-0.
- [211] A. Bangor, P. Kortum und J. Miller, "Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale," *J. Usability Studies*, Jg. 4, Nr. 3, S. 114–123, Mai 2009.
- [212] S. G. Hart und L. E. Staveland, "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research," in *Human mental workload*, Ser. Advances in Psychology, P. A. Hancock und N. Meshkati, Hrsg., Bd. 52, Amsterdam: North-Holland, 1988, S. 139–183, ISBN: 978-0-444-70388-0. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [213] A. D. Prabaswari, C. Basumerda und B. W. Utomo, "The Mental Workload Analysis of Staff in Study Program of Private Educational Organization," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jg. 528, Nr. 1, S. 012 018, 2019, ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/528/1/012018.
- [214] B. Laugwitz, T. Held und M. Schrepp, "Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire," in *HCI and Usability for Education and Work*, Ser. Lecture Notes in Computer Science, A. Holzinger, Hrsg., Bd. 5298, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 63–76, ISBN: 978-3-540-89349-3. DOI: 10.1007/978-3-540-89350-9_6.
- [215] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum und M. G. Lilienthal, "Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness," *The International Journal of Aviation Psychology*, Jg. 3, Nr. 3, S. 203–220, 1993, ISSN: 1050-8414. DOI: 10.1207/s15327108ijap0303_3.
- [216] M. Hussain, J. Park und H. K. Kim, "Augmented reality sickness questionnaire (ARSQ): A refined questionnaire for augmented reality environment," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Jg. 97, S. 103 495, 2023, ISSN: 0169-8141. DOI: 10.1016/j.ergon.2023.103495.
- [217] M. Funk, T. Kosch, S. W. Greenwald und A. Schmidt, "A benchmark for interactive augmented reality instructions for assembly tasks," in *Proceedings of the 14th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, C. Holzmann, Hrsg., Ser. ACM Digital Library, New York, NY: ACM, 2015, S. 253–257, ISBN: 978-1-4503-3605-5. DOI: 10.1145/2836041.2836067.

- [218] S. Pimminger, W. Kurschl, L. Panholzer, T. Neumayr, M. Augstein, J. Altmann und J. Heinzelreiter, "Assembly Task Analysis Using the General Assembly Task Model (GATM) on the Shop Floor," *Procedia CIRP*, Jg. 93, S. 1109–1114, 2020, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.007.
- [219] H. B. Maynard, G. J. Stegemerten und J. L. Schwab, *Methods - time measurement* (MacGraw-Hill industrial organization and management series). New York u.a.: McGraw-Hill, 1948, ISBN: 978-1-258-35098-7.
- [220] J. Heilala, J. Montonen und K. Helin, "Selecting the right system – assembly system comparison with total cost of ownership methodology," *Assembly Automation*, Jg. 27, Nr. 1, S. 44–54, 2007, ISSN: 0144-5154. DOI: 10.1108/01445150710724702.
- [221] K. Hofmann, *Assistenzsysteme in der Industrie 4.0: Arbeitsrechtliche und beschäftigendatenschutzrechtliche Fragestellungen in einem automatisierten Arbeitsumfeld* (Der Elektronische Rechtsverkehr). Baden-Baden, 2021, Bd. Band 45, ISBN: 978-3-7489-2514-9. DOI: 70154.
- [222] A. Minow, "Arbeitsphysiologische Untersuchungen beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme für variantenreiche Montageprozesse in der Arbeitswelt 4.0," Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2021. DOI: 10.25673/39299.
- [223] C. Patron, "Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung," Dissertation, Technische Universität München, 2005, ISBN: 3-8316-0474-6.
- [224] B. Illgen, "Lernfähiges Assistenzsystem zur Optimierung der Planung maritimer Großprojekte in der Anbahnungsphase," Dissertation, Universität Rostock, 2021. DOI: 10.18453/rosdok_id00003752.
- [225] M. Schröder, "Entscheidungsunterstützung durch ein Assistenzsystem bei der Wochenprogrammsteuerung in der Automobilindustrie," Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2019, ISBN: 978-3-86975-141-2.
- [226] C. Kaiser, "Effiziente Produkt- und Prozessabsicherung für gefaltete Karosseriebauteile durch ein metamodellbasiertes Assistenzsystem," Dissertation, Technische Universität München, 2018, ISBN: 978-3-95884-018-8.
- [227] J. Finke, S. Hoose, J. Jost und M. Roidl, "Replacing Common Picking Devices from Augmented Reality Scenarios at Warehouses by a Laser Projection System," in *Human Factors in Virtual Environments and Game Design*, Ser. AHFE International, AHFE International, 2022. DOI: 10.54941/ahfe1002065.
- [228] A. Hafner, "Mobile Assistenzsysteme in der Intralogistikplanung der Automobilindustrie – Gestaltung, Nutzen und Akzeptanz Augmented Reality-basierter Mensch-Maschine-Schnittstellen," Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2022. DOI: 10.22032/DBT.53078.

- [229] A. Neumann, B. Strenge, J. C. Uhlich, K. D. Schlicher, G. W. Maier, L. Schalkwijk, J. Waßmuth, K. Essig und T. Schack, "AVIKOM: towards a mobile audiovisual cognitive assistance system for modern manufacturing and logistics," in *Proceedings of the 13th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, F. Makedon, Hrsg., New York, NY, USA: ACM, 2020, S. 1–8, ISBN: 978-1-4503-7773-7. DOI: 10.1145/3389189.3389191.
- [230] A. Reidt, "Referenzarchitektur eines integrierten Informationssystems zur Unterstützung der Instandhaltung," Dissertation, Technische Universität München, 2019.
- [231] A. Keller, J. Schöner, J. de La Barré, H. Groß, T. Ehlers, M. Schulze, H. Kühnel, C. Motsch, T. Haase und S. M. Weber, "Erfahrungen und Lösungsansätze für die Einführung eines digitalen Assistenzsystems in der Instandhaltung," in *Digitalisierung der Arbeitswelt im Mittelstand 2*, V. Nitsch, C. Brandl, R. Häußling, P. Roth, T. Gries und B. Schmenk, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 297–342, ISBN: 978-3-662-65857-4. DOI: 10.1007/978-3-662-65858-1_9.
- [232] C. Deneke, K. Moenck und T. Schueppstuhl, "Augmented Reality Based Data Improvement for the Planning of Aircraft Cabin Conversions," in *2021 The 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications(Europe)*, Ser. ACM Digital Library, New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 2021, S. 37–45, ISBN: 978-1-4503-8992-1. DOI: 10.1145/3463858.3463896.
- [233] L. Eversberg, "System zur kognitiven Assistenz mit Augmented Reality für manuelle, objektspezifische Reparaturarbeiten basierend auf dem Digitalen Zwilling," Dissertation, Technische Universität Berlin, 2023. DOI: 10.14279/depositonce-19493.
- [234] F. F. Loch, "Adaptive virtual training systems for industrial maintenance and changeover procedures," Dissertation, Technische Universität München, 2019, ISBN: 978-3-96548-057-5.
- [235] C. Woods, M. Hodkiewicz und T. French, "Requirements for Adaptive User Interfaces for Industrial Maintenance Procedures," in *Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction*, Ser. ACM Digital Library, New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 2019, S. 322–326, ISBN: 978-1-4503-7696-9. DOI: 10.1145/3369457.3369487.
- [236] N. Meluzov, "Informationsmanagement für ein digitales Instandhaltungssystem," Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2022. DOI: 10.15480/882.4231.
- [237] Deutsches Institut für Normung, *DIN 31051:2019-06, Grundlagen der Instandhaltung*, Berlin, 2019. DOI: 10.31030/3048531.

- [238] V. Kaptelinin und B. A. Nardi, Hrsg., *Acting with technology: Activity theory and interaction design* (Acting with technology). Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2006, ISBN: 978-0-262-25647-6.
- [239] K. Kuurti, "Activity Theory as a Potential Framework for Human-Computer Interaction Research," in *Context and consciousness*, B. A. Nardi, Hrsg., Cambridge, Mass.: MIT Press, 1996, S. 17–44, ISBN: 978-0-262-28041-9. DOI: 10.7551/mitpress/2137.003.0006.
- [240] G. A. Boy, *The Handbook of Human-Machine Interaction: A human-centered design approach*. CRC Press, 2017, ISBN: 1-315-55738-X. DOI: 10.1201/9781315557380.
- [241] J. Rasmussen, *Cognitive systems engineering* (Wiley series in system engineering), [2. Dr.] New York: Wiley, 1994, ISBN: 0-471-01198-3.
- [242] R. P. Bostrom und J. S. Heinen, "MIS Problems and Failures: A Socio-Technical Perspective. Part I: The Causes," *MIS Quarterly*, Jg. 1, Nr. 3, S. 17, 1977, ISSN: 0276-7783. DOI: 10.2307/248710.
- [243] A. M. Cook, J. M. Polgar und P. Encarnaç o, *Assistive technologies: Principles & practice*, 5th edition. St. Louis, Missouri: Elsevier, 2020, ISBN: 978-0-323-52338-7.
- [244] I. Priadythama, L. Herdiman und S. Susmartini, "Role of rapid manufacturing technology in wearable customized assistive technology for modern industry," in *THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL, MECHANICAL, ELECTRICAL, AND CHEMICAL ENGINEERING 2019 (ICIMECE 2019)*, Ser. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, 2020, S. 030076. DOI: 10.1063/5.0000747.
- [245] O. Korn, M. Brach, A. Schmidt, T. Hörz und R. Konrad, "Context-Sensitive User-Centered Scalability: An Introduction Focusing on Exergames and Assistive Systems in Work Contexts," in *E-Learning and Games for Training, Education, Health and Sports: 7th International Conference, Edutainment 2012 and 3rd International Conference, GameDays 2012, Darmstadt, Germany, September 18-20, 2012. Proceedings*, Ser. Lecture Notes in Computer Science, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, S. Göbel, W. Müller, B. Urban und J. Wiermeyer, Hrsg., Bd. 7516, Berlin, Heidelberg: Scholars Portal, 2012, S. 164–176, ISBN: 978-3-642-33465-8. DOI: 10.1007/978-3-642-33466-5_19.
- [246] O. Korn, M. Funk und A. Schmidt, "Assistive Systems for the Workplace," in *Gamification*, I. R. Management Association, Hrsg., Hershey, Pennsylvania (701 E. Chocolate Avenue, Hershey, Pa., 17033, USA): IGI Global, 2015, S. 1936–1949, ISBN: 978-1-4666-8200-9. DOI: 10.4018/978-1-4666-8200-9.ch097.

- [247] J. Erpenbeck, *Handbuch Kompetenzmessung: Erkennen, verstehen und bewerten von Kompetenzen in der betrieblichen, pädagogischen und psychologischen Praxis*, 3. Auflage 2017. Freiburg: Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft Steuern Recht GmbH, 2017, ISBN: 978-3-7910-3512-3.
- [248] S. E. Dreyfus und H. L. Dreyfus, *A five-stage model of the mental activities involved in directed skill acquisition*. Berkeley: University of California, 1980.
- [249] J. Hartig und N. Jude, "Empirische Erfassung von Kompetenzen und psychometrische Kompetenzmodelle," in *Möglichkeiten und Voraussetzungen technologiebasierter Kompetenzdiagnostik*, Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Hrsg., Bonn und Berlin, 2007, S. 17–36.
- [250] N. Breitkopf, "Adaptive Assistenz in der Produktion: Eine Methodik zur individuellen Mitarbeiterbefähigung," Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2018, ISBN: 978-3-8440-5904-5.
- [251] T. Keller, M. Behling, C. Stockinger, J. Metternich und K. Schützer, "Analysis of the influence of process complexity and employee competence on the effect of digital assistance in industrial assembly," *Production Engineering*, Jg. 15, Nr. 1, S. 1–8, 2021, ISSN: 0944-6524. DOI: 10.1007/s11740-020-01005-3.
- [252] T. Jeske, C. M. Schlick und S. Mütze-Niewöhner, "Unterstützung von Lernprozessen bei Montageaufgaben," in *Flexible Produktionskapazität innovativ managen*, C. M. Schlick, K. Moser und M. Schenk, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 163–192, ISBN: 978-3-642-39895-7. DOI: 10.1007/978-3-642-39896-4_4.
- [253] P. Hold, "Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in der Montage," Dissertation, Technische Universität Wien, 2020. DOI: 10.34726/hss.2020.82467.
- [254] P. Temdee und R. Prasad, *Context-Aware Communication and Computing: Applications for Smart Environment*. Cham: Springer International Publishing, 2018, ISBN: 978-3-319-59034-9. DOI: 10.1007/978-3-319-59035-6.
- [255] J. Pascoe, "Adding generic contextual capabilities to wearable computers," in *Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers (Cat. No. 98EX215)*, IEEE Comput. Soc, 1998, S. 92–99, ISBN: 0-8186-9074-7. DOI: 10.1109/ISWC.1998.729534.
- [256] P. J. Brown, "The Stick-e Document: a Framework for Creating Context-aware Applications," in *Proceedings of EP'96, Palo Alto*, Jan. 1996, S. 182–196.

- [257] G. D. Abowd, A. K. Dey, P. J. Brown, N. Davies, M. Smith und P. Steggles, "Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness," in *Handheld and Ubiquitous Computing*, Ser. Lecture Notes in Computer Science, G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen und H.-W. Gellersen, Hrsg., Bd. 1707, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999, S. 304–307, ISBN: 978-3-540-66550-2. DOI: 10.1007/3-540-48157-5_29.
- [258] D. I. für Normung, *DIN EN ISO 9241-110:2020-10, Ergonomie der Mensch-System-Interaktion- Teil 110: Interaktionsprinzipien (ISO 9241-110:2020); Deutsche Fassung EN ISO 9241-110:2020*, Berlin. DOI: 10.31030/3147467.
- [259] H. Ben Abdallah, I. Jovančević, J.-J. Orteu und L. Brèthes, "Automatic Inspection of Aeronautical Mechanical Assemblies by Matching the 3D CAD Model and Real 2D Images," *Journal of imaging*, Jg. 5, Nr. 10, 2019. DOI: 10.3390/jimaging5100081.
- [260] J. Hu, G. Zhao, W. Xiao und R. Li, "AR-based deep learning for real-time inspection of cable brackets in aircraft," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 83, S. 102 574, 2023, ISSN: 0736-5845. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102574.
- [261] F. Bruno, L. Barbieri, E. Marino, M. Muzzupappa und B. Colacino, "A Handheld Mobile Augmented Reality Tool for On-Site Piping Assembly Inspection," in *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*, Ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering, C. Rizzi, A. O. Andrisano, F. Leali, F. Gherardini, F. Pini und A. Vergnano, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 129–139, ISBN: 978-3-030-31153-7. DOI: 10.1007/978-3-030-31154-4_12.
- [262] E. Marino, L. Barbieri, B. Colacino, A. K. Fleri und F. Bruno, "An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments," *Computers in Industry*, Jg. 127, S. 103 412, 2021, ISSN: 0166-3615. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103412.
- [263] E. Marino, L. Barbieri, F. Bruno und M. Muzzupappa, "Assessing user performance in augmented reality assembly guidance for industry 4.0 operators," *Computers in Industry*, Jg. 157-158, S. 104 085, 2024, ISSN: 0166-3615. DOI: 10.1016/j.compind.2024.104085.
- [264] I. García-Pereira, C. Portalés, J. Gimeno und S. Casas, "A collaborative augmented reality annotation tool for the inspection of prefabricated buildings," *Multimedia Tools and Applications*, Jg. 79, Nr. 9-10, S. 6483–6501, 2020, ISSN: 1380-7501. DOI: 10.1007/s11042-019-08419-x.
- [265] Y. Lin, Z. Xu, D. Bi und D. Yu, "A New Approach for Handheld and Multi-Angle Structured Light Measurement," in *Proceedings / Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA 2008*, Y. Zhang, Hrsg., Piscataway, NJ: IEEE, 2008, S. 1014–1018, ISBN: 978-0-7695-3490-9. DOI: 10.1109/PACIIA.2008.369.

- [266] A. M. Lindberg, F. G. Reis und M. K. Johnson, “A Handheld 3D Surface Measurement System,” in *2021 IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, IEEE, 2021, S. 149–153, ISBN: 978-1-7281-7556-0. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace51421.2021.9511732.
- [267] E. Minnetti, P. Chiariotti, N. Paone, G. Garcia, H. Vicente, L. Violini und P. Castellini, “A Smartphone Integrated Hand-Held Gap and Flush Measurement System for in Line Quality Control of Car Body Assembly,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 20, Nr. 11, 2020. DOI: 10.3390/s20113300.
- [268] R. Bonin, F. Khameneifar und J. R. R. Mayer, “Evaluation of the Metrological Performance of a Handheld 3D Laser Scanner Using a Pseudo-3D Ball-Lattice Artifact,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 21, Nr. 6, 2021. DOI: 10.3390/s21062137.
- [269] K.-J. Wang und Y.-J. Yan, “A Smart Operator Assistance System Using Deep Learning for Angle Measurement,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Jg. 70, S. 1–14, 2021, ISSN: 0018-9456. DOI: 10.1109/TIM.2021.3124044.
- [270] Microtech, *Computerized e-Force caliper Industry 4.0*, 2024. Adresse: <https://microtech.ua/product/micron-computerized-e-force-caliper-industry-40/>.
- [271] Third Dimension, *Gapgun: Die intelligente handgeführte Lösung für präzise Messungen*, 2024. Adresse: <https://www.third.com/de/produkte/hardware/gapgun-pro-2/>.
- [272] P. Bertram, “Entwicklung eines kontextsensitiven, modularen Assistenzsystems für manuelle Tätigkeiten,” Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2020, ISBN: 978-3-18-304022-3.
- [273] H. Oestreich, Y. Da Silva Bröker und S. Wrede, “An Adaptive Workflow Architecture for Digital Assistance Systems,” in *The 14th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference*, Ser. ACM Digital Library, New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 2021, S. 177–184, ISBN: 978-1-4503-8792-7. DOI: 10.1145/3453892.3458046.
- [274] M.-L. Bourguet und J. Chang, “Design and usability evaluation of multimodal interaction with finite state machines: a conceptual framework,” *Journal on Multimodal User Interfaces*, Jg. 2, Nr. 1, S. 53–60, 2008, ISSN: 1783-7677. DOI: 10.1007/s12193-008-0004-2.
- [275] D. Gorecky, S. F. Worgan und G. Meixner, “COGNITO: a cognitive assistance and training system for manual tasks in industry,” in *Proceedings of the 29th Annual European Conference on Cognitive Ergonomics*, A. Dittmar und P. Forbrig, Hrsg., New York, NY, USA: ACM, 2011, S. 53–56, ISBN: 978-1-4503-1029-1. DOI: 10.1145/2074712.2074723.

- [276] A. Gellert, R. Sorostinean und B.-C. Pirvu, "Robust Assembly Assistance Using Informed Tree Search with Markov Chains," *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 22, Nr. 2, 2022. DOI: 10.3390/s22020495.
- [277] E. Coupeté, F. Moutarde und S. Manitsaris, "Gesture Recognition Using a Depth Camera for Human Robot Collaboration on Assembly Line," *Procedia Manufacturing*, Jg. 3, S. 518–525, 2015, ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.216.
- [278] J. Berg, T. Reckordt, C. Richter und G. Reinhart, "Action Recognition in Assembly for Human-Robot-Cooperation using Hidden Markov Models," *Procedia CIRP*, Jg. 76, S. 205–210, 2018, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2018.02.029.
- [279] A. Bashir, "Entwicklung eines intelligenten kognitiven Assistenzsystems für dynamische Produktionsumgebungen - am Beispiel eines Assistenzsystems zur Unterstützung von Mitarbeitern in der Nacharbeit," Dissertation, Universität des Saarlandes, 2023. DOI: 10.22028/D291-41240.
- [280] A. Dhillon und G. K. Verma, "Convolutional neural network: a review of models, methodologies and applications to object detection," *Progress in Artificial Intelligence*, Jg. 9, Nr. 2, S. 85–112, 2020, ISSN: 2192-6352. DOI: 10.1007/s13748-019-00203-0.
- [281] D.-C. Hoang, T. Stoyanov und A. J. Lilienthal, "Object-RPE: Dense 3D Reconstruction and Pose Estimation with Convolutional Neural Networks for Warehouse Robots," in *2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, IEEE, 2019, S. 1–6, ISBN: 978-1-7281-3605-9. DOI: 10.1109/ECMR.2019.8870927.
- [282] N. A. Piga, F. Bottarel, C. Fantacci, G. Vezzani, U. Pattacini und L. Natale, "MaskUKF: An Instance Segmentation Aided Unscented Kalman Filter for 6D Object Pose and Velocity Tracking," *Frontiers in robotics and AI*, Jg. 8, S. 594583, 2021. DOI: 10.3389/frobt.2021.594583.
- [283] L. Büsch, J. Koch, D. Schoepflin, M. Schulze und T. Schüppstuhl, "Towards Recognition of Human Actions in Collaborative Tasks with Robots: Extending Action Recognition with Tool Recognition Methods," *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 23, Nr. 12, 2023. DOI: 10.3390/s23125718.
- [284] R. H. Schmitt, P. Nienheysen, N. Lehmann, H. Jahangir, M. Peterek und T. Neuenhahn, "Digitalized Ultrasonic Inspection By Optical Tracking," in *2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, S. 566–571, ISBN: 978-1-5386-3615-2. DOI: 10.1109/SII.2019.8700372.
- [285] R. Müller, L. Hörauf, C. Speicher und A. Bashir, "Situational cognitive assistance system in rework area," *Procedia Manufacturing*, Jg. 38, S. 884–891, 2019, ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.170.

- [286] S. Schroeder, S. Jaeger, J. Schwer, A. M. Seitz, I. Hamann, M. Werner, C. Thorwächter, I. Santos, T. Wendler, D. Nebel und B. Welke, "Accuracy measurement of different marker based motion analysis systems for biomechanical applications: A round robin study," *PloS one*, Jg. 17, Nr. 7, e0271349, 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0271349.
- [287] I. de Feudis, D. Buongiorno, S. Grossi, G. Losito, A. Brunetti, N. Longo, G. Di Stefano und V. Bevilacqua, "Evaluation of Vision-Based Hand Tool Tracking Methods for Quality Assessment and Training in Human-Centered Industry 4.0," *Applied Sciences*, Jg. 12, Nr. 4, S. 1796, 2022. DOI: 10.3390/app12041796.
- [288] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas und M. J. Marín-Jiménez, "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion," *Pattern Recognition*, Jg. 47, Nr. 6, S. 2280–2292, 2014, ISSN: 0031-3203. DOI: 10.1016/j.patcog.2014.01.005.
- [289] Z. Cao, G. Hidalgo, T. Simon, S.-E. Wei und Y. Sheikh, *OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields*, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1812.08008.
- [290] A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang und H.-Y. M. Liao, *YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection*, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2004.10934.
- [291] W. Hintze, H. Lödding, A. Friedewald, J. Mehnen, D. Romanenk, C. Möller, C. Bullinger und J. N. Sikorra, "Digital Assistance Systems for Smart Drilling Units in Aircraft Structural Assembly," in *Proceedings of the 7th International Workshop on Aircraft System Technologies*, Ser. Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik, O. von Estorff und F. Thielecke, Hrsg., Aachen: Shaker, 2019, ISBN: 978-3-8440-6470-4.
- [292] Sarissa GmbH, *Local Positioning System: Funktionsprinzip*, 2024. Adresse: <https://sarissa.de/loesungen/local-positioning-system>.
- [293] C. Chen, H. Zhu, M. Li und S. You, "A Review of Visual-Inertial Simultaneous Localization and Mapping from Filtering-Based and Optimization-Based Perspectives," *Robotics*, Jg. 7, Nr. 3, S. 45, 2018. DOI: 10.3390/robotics7030045.
- [294] Y. Liu, C. Zhao und M. Ren, "An Enhanced Hybrid Visual-Inertial Odometry System for Indoor Mobile Robot," *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 22, Nr. 8, 2022. DOI: 10.3390/s22082930.
- [295] P. Hausmann, C. B. Sinnott, M. Daumer und P. R. MacNeilage, "Evaluation of the Intel RealSense T265 for tracking natural human head motion," *Scientific reports*, Jg. 11, Nr. 1, S. 12486, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-91861-5.

- [296] Y. Lei, Y. Deng, L. Dong, X. Li, X. Li und Z. Su, "A Novel Sensor Fusion Approach for Precise Hand Tracking in Virtual Reality-Based Human-Computer Interaction," *Biomimetics (Basel, Switzerland)*, Jg. 8, Nr. 3, 2023. DOI: 10.3390/biomimetics8030326.
- [297] S.-h. P. Won, W. Melek und F. Golnaraghi, "Fastening tool tracking system using a Kalman filter and particle filter combination," *Measurement Science and Technology*, Jg. 22, Nr. 12, S. 125 108, 2011, ISSN: 0957-0233. DOI: 10.1088/0957-0233/22/12/125108.
- [298] N. Parnian und M. F. Golnaraghi, "Integration of vision and inertial sensors for industrial tools tracking," *Sensor Review*, Jg. 27, Nr. 2, S. 132–141, 2007, ISSN: 0260-2288. DOI: 10.1108/02602280710731696.
- [299] O. Korn, "Context-aware assistive systems for augmented work: A framework using gamification and projection," Dissertation, Universität Stuttgart, 2014, ISBN: 978-1-291-86486-1.
- [300] O. Korn, M. Blatz, R. Konrad und KORION Simulation & Assistive Technology GmbH, *MotionEAP - System zur Effizienzsteigerung und Assistenz bei Produktionsprozessen in Unternehmen auf Basis von Bewegungserkennung und Projektion: Schlussbericht zum Verbundvorhaben : Titel des Teilvorhaben: Konzeption, Softwareentwicklung und Test manueller Arbeitsplätze mit Bewegungserkennung und Gamification-Komponenten*. KORION Simulation & Assistive Technology GmbH, 2017.
- [301] M. Funk, "Augmented reality at the workplace: a context-aware assistive system using in-situ projection," Dissertation, Universität Stuttgart, 2016. DOI: 10.18419/opus-8997.
- [302] M. Funk, T. Kosch und A. Schmidt, "Interactive worker assistance: Comparing the Effects of In-Situ Projection, Head-Mounted Displays, Tablet, and Paper Instructions," in *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, P. Lukowicz, Hrsg., Ser. ACM Digital Library, New York, NY: ACM, 2016, S. 934–939, ISBN: 978-1-4503-4461-6. DOI: 10.1145/2971648.2971706.
- [303] T. Rusch, A. Riegel, M. Hueber, F. Kerber, L. Merkel, R. Sochor, L. Merhar, M. Romanelli, Z. Guo, H. Klug und B. Stelzle, "Synchronisation von Digitalisierung, Qualitätssicherung und Assistenzsystemen an Arbeitsplätzen mit geringem Automatisierungsgrad," in *Produktivitätsmanagement 4.0*, Ser. ifaa-Edition, T. Jeske und F. Lennings, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, S. 185–227, ISBN: 978-3-662-61583-6. DOI: 10.1007/978-3-662-61584-3_7.

- [304] S. Büttner, O. Sand und C. Röcker, “Extending the Design Space in Industrial Manufacturing Through Mobile Projection,” in *MobileHCI '15 : proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services : Copenhagen, Denmark, August 24-27, 2015*, S. Boring, Hrsg., ACM, 2015, S. 1130–1133, ISBN: 978-1-4503-3653-6. DOI: 10.1145/2786567.2794342.
- [305] S. Büttner, M. Funk, O. Sand und C. Röcker, “Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems,” in *Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, New York, NY, USA: ACM, 2016, S. 1–8, ISBN: 978-1-4503-4337-4. DOI: 10.1145/2910674.2910679.
- [306] J. Alves, B. Marques, M. Oliveira, T. Araujo, P. Dias und B. S. Santos, “Comparing Spatial and Mobile Augmented Reality for Guiding Assembling Procedures with Task Validation,” in *2019 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, IEEE, 2019, S. 1–6, ISBN: 978-1-7281-3558-8. DOI: 10.1109/ICARSC.2019.8733642.
- [307] E. S. Wilschut, R. Könemann, M. S. Murphy, G. J. W. van Rhijn und T. Bosch, “Evaluating learning approaches for product assembly,” in *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, F. Makedon, Hrsg., New York, NY, USA: ACM, 2019, S. 376–381, ISBN: 978-1-4503-6232-0. DOI: 10.1145/3316782.3322750.
- [308] A. E. Uva, M. Gattullo, V. M. Manghisi, D. Spagnulo, G. L. Cascella und M. Fiorentino, “Evaluating the effectiveness of spatial augmented reality in smart manufacturing: a solution for manual working stations,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 94, Nr. 1-4, S. 509–521, 2018, ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-017-0846-4.
- [309] J. Baumeister, S. Y. Ssin, N. A. M. ElSayed, J. Dorrian, D. P. Webb, J. A. Walsh, T. M. Simon, A. Irlitti, R. T. Smith, M. Kohler und B. H. Thomas, “Cognitive Cost of Using Augmented Reality Displays,” *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Jg. 23, Nr. 11, S. 2378–2388, 2017. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2735098.
- [310] R. Müller, L. Hörauf, M. Vette-Steinkamp, A. Kanso und J. Koch, “The Assist-By-X system: Calibration and application of a modular production equipment for visual assistance,” *Procedia CIRP*, Jg. 86, S. 179–184, 2019, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.021.
- [311] P. Rupprecht, “Spatial Augmented Reality in der industriellen Großgeräte- und Baustellenmontage: Entwicklung eines Assistenzsystems mit dynamischer In-situ-Projektion und nutzeradaptiver Gesteninteraktion,” Dissertation, Technische Universität Wien, 2022. DOI: 10.34726/HSS.2022.53621.

- [312] R. Mueller, M. Vette, M. Scholer und J. Ball, "Assembly Assistance and Position Data Feedback by Means of Projection Lasers," in *SAE Technical Paper Series*, Ser. SAE Technical Paper Series, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2016. DOI: 10.4271/2016-01-2107.
- [313] T. Pfeifroth, M. Dietsch und R. Mahlandt, "Projektionsbasierte Assistenz in der Montage/Projection-based assistance in manual assembly – Laser and Video projection as worker assistance systems in manual assembly," *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 112, Nr. 03, S. 146–150, 2022, ISSN: 1436-4980. DOI: 10.37544/1436-4980-2022-03-44.
- [314] R. Müller, R. Müller-Polyzou, L. Hörauf, A. Bashir, M. Karkowski, D. Vesper und S. Gärtner, "Intuitive Bedienung laserbasierter Montageassistenz," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 113, Nr. 6, S. 363–368, 2018, ISSN: 0947-0085. DOI: 10.3139/104.111922.
- [315] O. S. Dolgov, A. I. Kolosov und B. B. Safoklov, "Study of the Effectiveness of the Introduction of Laser Projection System in the Process of Technological Preparation of the Production of Aircraft Structures From Polymer Composite Materials," in *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Piscataway, NJ: IEEE, 2021, S. 639–643, ISBN: 978-1-6654-1966-6. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559593.
- [316] R. Müller-Polyzou, "Socio-technical information and assistance systems to increase effectiveness and efficiency in labour-intensive processes," Dissertation, Leuphana Universität Lüneburg, 2023. DOI: 10.48691/KARK-3290.
- [317] W. Tao, Z.-H. Lai, M. C. Leu, Z. Yin und R. Qin, "A self-aware and active-guiding training & assistant system for worker-centered intelligent manufacturing," *Manufacturing Letters*, Jg. 21, S. 45–49, 2019, ISSN: 2213-8463. DOI: 10.1016/j.mfglet.2019.08.003.
- [318] J. Koch, C. Bückse und T. Schüppstuhl, "Development and Integration of a Workpiece-Based Calibration Method for an Optical Assistance System," *Applied Sciences*, Jg. 13, Nr. 13, S. 7369, 2023. DOI: 10.3390/app13137369.
- [319] W. Mayrhofer, P. Rupprecht und S. Schlund, "One-Fits-All vs. Tailor-Made: User-Centered Workstations for Field Assembly with an Application in Aircraft Parts Manufacturing," *Procedia Manufacturing*, Jg. 39, S. 149–157, 2019, ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.287.
- [320] M. Hornacek, H. Küffner-McCauley, M. Trimmel, P. Rupprecht und S. Schlund, "A spatial AR system for wide-area axis-aligned metric augmentation of planar scenes," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 37, S. 219–226, 2022, ISSN: 1755-5817. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.01.011.

- [321] P. Rupperecht, H. Kueffner-McCauley und S. Schlund, "Information provision utilizing a dynamic projection system in industrial site assembly," *Procedia CIRP*, Jg. 93, S. 1182–1187, 2020, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.053.
- [322] A. Luxenburger, J. Mohr, T. Spieldenner, D. Merkel, F. Espinosa, T. Schwartz, F. Reinicke, J. Ahlers und M. Stoyke, "Augmented Reality for Human-Robot Cooperation in Aircraft Assembly," in *2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality*, Piscataway, NJ: IEEE, 2019, S. 263–2633, ISBN: 978-1-7281-5604-0. DOI: 10.1109/AIVR46125.2019.00061.
- [323] G. Evans, J. Miller, M. Iglesias Pena, A. MacAllister und E. Winer, "Evaluating the Microsoft HoloLens through an augmented reality assembly application," in *Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display 2017*, J. N. Sanders-Reed und J. J. Arthur, Hrsg., Ser. SPIE Proceedings, SPIE, 2017, S. 101970V. DOI: 10.1117/12.2262626.
- [324] M. Moghaddam, N. C. Wilson, A. S. Modestino, K. Jona und S. C. Marsella, "Exploring augmented reality for worker assistance versus training," *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 50, S. 101410, 2021, ISSN: 1474-0346. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101410.
- [325] M. Eswaran und M. Raju Bahubalendruni, "Augmented reality aided object mapping for worker assistance/training in an industrial assembly context: Exploration of affordance with existing guidance techniques," *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 185, S. 109663, 2023, ISSN: 0360-8352. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109663.
- [326] J. Blattgerste, B. Streng, P. Renner, T. Pfeiffer und K. Essig, "Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks," in *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, New York, NY, USA: ACM, 2017, S. 75–82, ISBN: 978-1-4503-5227-7. DOI: 10.1145/3056540.3056547.
- [327] A. Syberfeldt, O. Danielsson, M. Holm und L. Wang, "Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality," *Procedia Manufacturing*, Jg. 1, S. 98–109, 2015, ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.068.
- [328] M. König, M. Stadlmaier, T. Rusch, R. Sochor, L. Merkel, S. Braunreuther und J. Schilp, "MA 2 RA - Manual Assembly Augmented Reality Assistant," in *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, IEEE, 2019, S. 501–505, ISBN: 978-1-7281-3804-6. DOI: 10.1109/IEEM44572.2019.8978844.

- [329] L. Daling, A. Abdelrazeq, C. Sauerborn und F. Hees, "A Comparative Study of Augmented Reality Assistant Tools in Assembly," in *Advances in Usability and User Experience*, Ser. Advances in Intelligent Systems and Computing, T. Ahram und C. Falcão, Hrsg., Bd. 972, Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 755–767, ISBN: 978-3-030-19134-4. DOI: 10.1007/978-3-030-19135-1_74.
- [330] C. Kollatsch, M. Schumann, P. Klimant, V. Wittstock und M. Putz, "Mobile Augmented Reality Based Monitoring of Assembly Lines," *Procedia CIRP*, Jg. 23, S. 246–251, 2014, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.100.
- [331] C. Botto, A. Cannavo, D. Cappuccio, G. Morat, A. N. Sarvestani, P. Ricci, V. Demarchi und A. Saturnino, "Augmented Reality for the Manufacturing Industry: The Case of an Assembly Assistant," in *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, IEEE, 2020, S. 299–304, ISBN: 978-1-7281-6532-5. DOI: 10.1109/VRW50115.2020.00068.
- [332] Microsoft, *Microsoft HoloLens 2: Für präzises, effizientes Arbeiten, bei der Sie die Hände frei haben*, 2024. Adresse: <https://www.microsoft.com/de-de/hololens>.
- [333] J. Sweller, P. Ayres und S. Kalyuga, "The Split-Attention Effect," in *Cognitive Load Theory*, J. Sweller, P. Ayres und S. Kalyuga, Hrsg., New York, NY: Springer New York, 2011, S. 111–128, ISBN: 978-1-4419-8125-7. DOI: 10.1007/978-1-4419-8126-4_9.
- [334] P. Sommerauer und O. Müller, "Augmented reality in informal learning environments: A field experiment in a mathematics exhibition," *Computers & Education*, Jg. 79, S. 59–68, 2014, ISSN: 0360-1315. DOI: 10.1016/j.compedu.2014.07.013.
- [335] D. Dixon, U. Terton und R. Greenaway, "Reducing the Split-Attention Effect in Assembly based Instruction by Merging Physical Parts with Holograms in Mixed Reality," in *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Supported Education*, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2018, S. 235–244, ISBN: 978-989-758-291-2. DOI: 10.5220/0006691202350244.
- [336] J. M. Krüger und D. Bodemer, "Application and Investigation of Multimedia Design Principles in Augmented Reality Learning Environments," *Information*, Jg. 13, Nr. 2, S. 74, 2022. DOI: 10.3390/info13020074.
- [337] N. F. S. Jeffri und D. R. Awang Rambli, "A review of augmented reality systems and their effects on mental workload and task performance," *Heliyon*, Jg. 7, Nr. 3, e06277, 2021, ISSN: 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06277.

- [338] L. Eversberg, P. Ebrahimi, M. Pape und J. Lambrecht, “A cognitive assistance system with augmented reality for manual repair tasks with high variability based on the digital twin,” *Manufacturing Letters*, Jg. 34, S. 49–52, 2022, ISSN: 2213-8463. DOI: 10.1016/j.mfglet.2022.09.003.
- [339] M. Gattullo, G. W. Scurati, A. Evangelista, F. Ferrise, M. Fiorentino und A. E. Uva, “Informing the Use of Visual Assets in Industrial Augmented Reality,” in *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*, Ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering, C. Rizzi, A. O. Andrisano, F. Leali, F. Gherardini, F. Pini und A. Vergnano, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 106–117, ISBN: 978-3-030-31153-7. DOI: 10.1007/978-3-030-31154-4_10.
- [340] S. Wiedenmaier, O. Oehme, L. Schmidt und H. Luczak, “Augmented Reality (AR) for Assembly Processes Design and Experimental Evaluation,” *International Journal of Human–Computer Interaction*, Jg. 16, Nr. 3, S. 497–514, 2003, ISSN: 1044-7318. DOI: 10.1207/S15327590IJHC1603_7.
- [341] S. S. V. K. Kolla, A. Sanchez und P. Plapper, “Comparing Effectiveness of Paper Based and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly and Training Tasks,” *SSRN Electronic Journal*, 2021. DOI: 10.2139/ssrn.3859970.
- [342] M. Hoover, J. Miller, S. Gilbert und E. Winer, “Measuring the Performance Impact of Using the Microsoft HoloLens 1 to Provide Guided Assembly Work Instructions,” *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Jg. 20, Nr. 6, 2020, ISSN: 1530-9827. DOI: 10.1115/1.4046006.
- [343] J. Buchner, K. Buntins und M. Kerres, “The impact of augmented reality on cognitive load and performance: A systematic review,” *Journal of Computer Assisted Learning*, Jg. 38, Nr. 1, S. 285–303, 2022, ISSN: 0266-4909. DOI: 10.1111/jcal.12617.
- [344] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley und M. S. Banks, “Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue,” *Journal of vision*, Jg. 8, Nr. 3, S. 33.1–30, 2008. DOI: 10.1167/8.3.33.
- [345] M. Kaufeld, M. Mundt, S. Forst und H. Hecht, “Optical see-through augmented reality can induce severe motion sickness,” *Displays*, Jg. 74, S. 102283, 2022, ISSN: 0141-9382. DOI: 10.1016/j.displa.2022.102283.
- [346] O. Hein, P. Rauschnabel, M. Hassib und F. Alt, “Sick in the Car, Sick in VR? Understanding How Real-World Susceptibility to Dizziness, Nausea, and Eye Strain Influences VR Motion Sickness,” in *Human-Computer Interaction – INTERACT 2023*, Ser. Lecture Notes in Computer Science, J. Abdelnour Nocera, M. Kristín Lárusdóttir, H. Petrie, A. Piccinno und M. Winckler, Hrsg., Bd. 14143, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, S. 552–573, ISBN: 978-3-031-42282-9. DOI: 10.1007/978-3-031-42283-6_30.

- [347] J.-P. Stauffert, F. Niebling und M. E. Latoschik, "Latency and Cybersickness: Impact, Causes, and Measures. A Review," *Frontiers in Virtual Reality*, Jg. 1, 2020. DOI: 10.3389/frvir.2020.582204.
- [348] L. E. Garrido, M. Frías-Hiciano, M. Moreno-Jiménez, G. N. Cruz, Z. E. García-Batista, K. Guerra-Peña und L. A. Medrano, "Focusing on cybersickness: pervasiveness, latent trajectories, susceptibility, and effects on the virtual reality experience," *Virtual Reality*, Jg. 26, Nr. 4, S. 1347–1371, 2022, ISSN: 1359-4338. DOI: 10.1007/s10055-022-00636-4.
- [349] U. Riedlinger, L. Oppermann und W. Prinz, "Tango vs. HoloLens: A Comparison of Collaborative Indoor AR Visualisations Using Hand-Held and Hands-Free Devices," *Multimodal Technologies and Interaction*, Jg. 3, Nr. 2, S. 23, 2019. DOI: 10.3390/mti3020023.
- [350] M. Wille, L. Adolph, B. Grauel, S. Wischniewski, S. Theis und T. Alexander, "Prolonged work with head mounted displays," in *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers: Adjunct Program*, L. Dunne, T. Martin und M. Beigl, Hrsg., New York, NY, USA: ACM, 2014, S. 221–224, ISBN: 978-1-4503-3048-0. DOI: 10.1145/2641248.2645638.
- [351] C. L. Hughes, C. Fidopiastis, K. M. Stanney, P. S. Bailey und E. Ruiz, "The Psychometrics of Cybersickness in Augmented Reality," *Frontiers in Virtual Reality*, Jg. 1, 2020. DOI: 10.3389/frvir.2020.602954.
- [352] K. M. Stanney, B. Lawson und C. M. Oman, *Cybersickness in Virtual Reality Versus Augmented Reality*, Frontiers in Virtual Reality, Hrsg., 2024. Adresse: <https://www.frontiersin.org/research-topics/12692/cybersickness-in-virtual-reality-versus-augmented-reality>.
- [353] C. Stockinger, "Werkerführungssysteme im Arbeitssystem Montage - Analyse des Einflusses der Gestaltung von Werkerführungssystemen auf Montageleistung und Nutzenden-Beurteilung," Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2021. DOI: 10.26083/tuprints-00018571.
- [354] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham und T. Watson, "The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework," *Computers in Industry*, Jg. 101, S. 1–12, 2018, ISSN: 01663615. DOI: 10.1016/j.compind.2018.04.015.
- [355] ISO-IEC, *30141: Internet of Things (IoT) - Reference Architecture* (International standard / International Electrotechnical Commission), Edition 1.0. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2018, Bd. 30141.
- [356] S.-W. Lin, E. Simmon, D. Young, B. Miller, J. Durand, G. Bleakley, A. Chigani, R. Martin, B. Murphy und M. Crawford, *The Industrial Internet Reference Architecture*, Industry IoT Consortium, Hrsg., 2022. Adresse: <https://www.iiconsortium.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/IIRA-v1.10.pdf>.

- [357] ISO, IEC und IEEE, *42010:2022 - Software, systems and enterprise – Architecture description*, 2022.
- [358] K. Alexopoulos, K. Sipsas, E. Xanthakis, S. Makris und D. Mourtzis, “An industrial Internet of things based platform for context-aware information services in manufacturing,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Jg. 31, Nr. 11, S. 1111–1123, 2018, ISSN: 0951-192X. DOI: 10.1080/0951192X.2018.1500716.
- [359] I. T. Christou, N. Kefalakis, J. K. Soldatos und A.-M. Despotopoulou, “End-to-end industrial IoT platform for Quality 4.0 applications,” *Computers in Industry*, Jg. 137, S. 103591, 2022, ISSN: 0166-3615. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103591.
- [360] E. Montini, V. Cutrona, N. Bonomi, G. Landolfi, A. Bettoni, P. Rocco und E. Carpanzano, “An IIoT Platform For Human-Aware Factory Digital Twins,” *Procedia CIRP*, Jg. 107, S. 661–667, 2022, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.042.
- [361] A. Bannat, “Ein Assistenzsystem zur digitalen Werker-Unterstützung in der industriellen Produktion,” Dissertation, Technische Universität München, 2014.
- [362] N. Jahn, T. Jansen, R. Rost und H. Lödding, “Disruption Management in One-Off Production with Collaborative Digital Assistance Systems – Benefits of an Integrative Approach with a Generic Data Model,” in *Digitization of the work environment for sustainable production (E-Book)*, P. Plapper, Hrsg., Berlin: GITO mbH Verlag, 2022, S. 171–192, ISBN: 9783955454074. DOI: 10.30844/WGAB_2022_9.
- [363] J. R. Rost, “Digitale Assistenzsysteme für kollaboratives Arbeiten in der Unikatproduktion,” Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2023. DOI: 10.15480/882.4912.
- [364] I. Sommerville, *Software Engineering (Informatik)*, 10., aktual. Aufl. Hallbergmoos: Pearson Deutschland, 2018, ISBN: 3-86894-344-7.
- [365] M. Cavalcanti, H. Costelha und C. Neves, “Industry 4.0 Machine-to-Machine Communication Protocols and Architectures on the Shop Floor,” in *Progress in Digital and Physical Manufacturing*, Ser. Springer Tracts in Additive Manufacturing, J. O. Correia Vasco, H. de Amorim Almeida, A. Gonçalves Rodrigues Marto, C. A. Bento Capela, F. G. Da Silva Craveiro, H. M. Da Coelho Rocha Terreiro Galha Bárt, L. M. de Jesus Coelho, M. A. Simões Correia, M. M. Nogueira Vieira und R. M. Barreiros Ruben, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2023, S. 222–234, ISBN: 978-3-031-33889-2. DOI: 10.1007/978-3-031-33890-8_19.

- [366] S. Ullah, J. Ahmad, M. A. Khan, M. S. Alshehri, W. Boulila, A. Koubaa, S. U. Jan und M. M. Iqbal Ch, "TNN-IDS: Transformer neural network-based intrusion detection system for MQTT-enabled IoT Networks," *Computer Networks*, Jg. 237, S. 110 072, 2023, ISSN: 1389-1286. DOI: 10 . 1016 / j . comnet . 2023 . 110072.
- [367] Eclipse Sparkplug Contributors, *Sparkplug 3.0.0: Sparkplug Specification*, Eclipse Foundation, Hrsg., 2022. Adresse: <https://sparkplug.eclipse.org/specification/version/3.0/documents/sparkplug-specification-3.0.0.pdf>.
- [368] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 9241-210:2020-03, Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2019); Deutsche Fassung EN ISO 9241-210:2019*, Berlin, 2020. DOI: 10 . 31030/3104744.
- [369] J. Koch, G. Lotzing, M. Gomse und T. Schüppstuhl, "Application of Multi-Model Databases in Digital Twins Using the Example of a Quality Assurance Process," in *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems*, Ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering, A.-L. Andersen, R. Andersen, T. D. Brunoe, M. S. S. Larsen, K. Nielsen, A. Napoleone und S. Kjeldgaard, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 364–371, ISBN: 978-3-030-90699-3. DOI: 10 . 1007 / 978 - 3 - 030 - 90700 - 6 _ 41.
- [370] J. Koch, K. Eggers, J.-E. Rath und T. Schüppstuhl, "Development Process for Information Security Concepts in IIoT-Based Manufacturing," in *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus*, Ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering, K.-Y. Kim, L. Monplaisir und J. Rickli, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2023, S. 316–331, ISBN: 978-3-031-18325-6. DOI: 10 . 1007 / 978 - 3 - 031 - 18326 - 3 _ 31.
- [371] K. Srikumar, K. Kashish, K. Eggers, N. E. Díaz Ferreyra, J. Koch, T. Schüppstuhl und R. Scandariato, "STRIPED: A Threat Analysis Method for IoT Systems," in *Proceedings of the 17th International Conference on Availability, Reliability and Security*, New York, NY, USA: ACM, 2022, S. 1–6, ISBN: 978-1-4503-9670-7. DOI: 10 . 1145 / 3538969 . 3538970.
- [372] R. Müller, M. Scholer, L. Schirmer und A. Blum, "Tolerance management in robot-based assembly optimizes product, process and system deviations," *Procedia CIRP*, Jg. 93, S. 1103–1108, 2020, ISSN: 2212-8271. DOI: 10 . 1016 / j . procir . 2020 . 04 . 027.
- [373] M. Scholer, "Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Automobilmontage mittels durchgängigem modularem Engineering - Am Beispiel der Mensch-Roboter-Kooperation in der Unterbodenmontage-," Dissertation, Universität des Saarlandes, 2018. DOI: 10 . 22028 / D291 - 27801.

- [374] S. Sathiya Naarayan, D. Pavan Kumar und S. Chandra, "Implication of unequal rivet load distribution in the failures and damage tolerant design of metal and composite civil aircraft riveted lap joints," *Engineering Failure Analysis*, Jg. 16, Nr. 7, S. 2255–2273, 2009, ISSN: 1350-6307. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2009.03.016.
- [375] J. Freund und B. Rücker, *Praxishandbuch BPMN: Mit Einführung in DMN* (Hanser eLibrary), 6., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2019, ISBN: 978-3-446-46111-6. DOI: 10.3139/9783446461123.
- [376] F. de Florio, "Production of Products, Parts, and Appliances," in *Airworthiness*, Elsevier, 2016, S. 155–176, ISBN: 978-0-08-100888-1. DOI: 10.1016/B978-0-08-100888-1.00007-0.
- [377] Europäische Agentur für Flugsicherheit, *Part-66*, 2024. Adresse: <https://www.easa.europa.eu/en/the-agency/faqs/part-66>.
- [378] Europäische Agentur für Flugsicherheit, *Part 21 - Airworthiness and Environmental Certification*, 2024. Adresse: <https://www.easa.europa.eu/en/acceptable-means-compliance-and-guidance-material-group/part-21-airworthiness-and-environmental>.
- [379] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 9100:2018-08, Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung; Deutsche und Englische Fassung EN 9100:2018*, Berlin, 2018. DOI: 10.31030/2853003.
- [380] A. Gadatsch, "Erstellung von Fachkonzepten mit dem Entity-Relationship-Modell (ERM)," in *Datenmodellierung*, Ser. essentials, A. Gadatsch, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 9–34, ISBN: 978-3-658-25729-3. DOI: 10.1007/978-3-658-25730-9_2.
- [381] Q.-D. GmbH, *Q-DAS ASCII Transferformat: V12 / 2015 Deutsch*, Weinheim, 2015.
- [382] Q.-D. GmbH. "30 years of Q-DAS: Together on the road to success," besucht am 6. Apr. 2023. Adresse: <https://www.q-das.com/en/company/30-years-of-q-das>.
- [383] Verein Deutscher Ingenieure und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, *VDI/VDE 2623 - Format für den Austausch von Daten im Prüfmittelmanagement: Definition des Calibration-Data-Exchange-Datenformats (CDE-Datenformat)*, 2022.
- [384] A. Kistner und B. Schäfer, *Prüfmittelmanagement* (DGQ-Band). München: Hanser, 2015, Bd. 13-61, ISBN: 978-3-446-44264-1. DOI: 44264.
- [385] J. Sweller, "Element Interactivity and Intrinsic, Extraneous, and Germane Cognitive Load," *Educational Psychology Review*, Jg. 22, Nr. 2, S. 123–138, 2010, ISSN: 1040-726X. DOI: 10.1007/s10648-010-9128-5.

- [386] S. Kalyuga, P. Ayres, P. Chandler und J. Sweller, "The Expertise Reversal Effect," *Educational Psychologist*, Jg. 38, Nr. 1, S. 23–31, 2003, ISSN: 0046-1520. DOI: 10.1207/s15326985ep3801_4.
- [387] S. Kalyuga, "Expertise Reversal Effect and Its Implications for Learner-Tailored Instruction," *Educational Psychology Review*, Jg. 19, Nr. 4, S. 509–539, 2007, ISSN: 1040-726X. DOI: 10.1007/s10648-007-9054-3.
- [388] S. Kalyuga, P. Chandler und J. Sweller, "Levels of Expertise and Instructional Design," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Jg. 40, Nr. 1, S. 1–17, 1998, ISSN: 0018-7208. DOI: 10.1518/001872098779480587.
- [389] K. Moenck, A. Wendt, P. Prünke, J. Koch, A. Sahrhage, J. Giercker, O. Schmedemann, F. Kähler, D. Holst, M. Gomse, T. Schüppstuhl und D. Schoepflin, *Industrial Segment Anything – a Case Study in Aircraft Manufacturing, Intra-logistics, Maintenance, Repair, and Overhaul*. Adresse: <https://arxiv.org/pdf/2307.12674>.
- [390] J. Koch, D. Jevremovic und T. Schüppstuhl, "Mobile Web App for the Digitization and Annotation of Manual Visual Inspection Tasks," *Procedia CIRP*, Jg. 126, S. 993–998, 2024, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2024.08.373.
- [391] J. Koch, D. Jevremovic, K. Moenck und T. Schüppstuhl, "A digital assistance system leveraging vision foundation models & 3D localization for reproducible defect segmentation in visual inspection," *Procedia CIRP*, Jg. 130, S. 387–397, 2024, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2024.10.105.
- [392] N. Mosca, V. Renò, M. Nitti, C. Patruno und E. Stella, "Post assembly quality inspection using multimodal sensing in aircraft manufacturing," in *Multimodal Sensing and Artificial Intelligence: Technologies and Applications II*, S. Negahdaripour, E. Stella, D. Ceglarek und C. Möller, Hrsg., SPIE, 21.06.2021–26.06.2021, S. 30, ISBN: 978-1-5106-4404-5. DOI: 10.1117/12.2594104.
- [393] N. Mosca, C. Patruno, R. Colella, S. P. Negri und E. Stella, "A RANSAC-based method for detecting post-assembly defects in aircraft interiors," in *2020 IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, [S.l.]: IEEE, 2020, S. 403–408, ISBN: 978-1-7281-6636-0. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace48742.2020.9160295.
- [394] N. Mosca, C. Patruno, V. Reno, M. Nitti und E. Stella, "Qualitative comparison of methodologies for detecting surface defects in aircraft interiors," in *2021 IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, IEEE, 2021, S. 215–220, ISBN: 978-1-7281-7556-0. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace51421.2021.9511778.

- [395] C. V. d. Santos, D. R. Leiva, F. R. Costa und J. A. R. Gregolin, "Materials Selection for Sustainable Executive Aircraft Interiors," *Materials Research*, Jg. 19, Nr. 2, S. 339–352, 2016, ISSN: 1516-1439. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0290.
- [396] A. Agarwal, A. Ajith, C. Wen, V. Stryzheus, B. Miller, M. Chen, M. K. Johnson, J. L. Susa Rincon, J. Rosca und W. Yuan, "Robotic Defect Inspection with Visual and Tactile Perception for Large-Scale Components," in *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2023, S. 10110–10116, ISBN: 978-1-6654-9190-7. DOI: 10.1109/IROS55552.2023.10341590.
- [397] A. M. Rahman und Y. Wang, "Optimizing Intersection-Over-Union in Deep Neural Networks for Image Segmentation," in *Advances in Visual Computing*, G. Bebis, R. Boyle, B. Parvin, D. Koracin, F. Porikli, S. Skaff, A. Entezari, J. Min, D. Iwai, A. Sadagic, C. Scheidegger und T. Isenberg, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 234–244, ISBN: 978-3-319-50834-4.
- [398] C. S. Silva, A. F. Borges und J. Magano, "Quality Control 4.0: a way to improve the quality performance and engage shop floor operators," *International Journal of Quality & Reliability Management*, Jg. 39, Nr. 6, S. 1471–1487, 2022, ISSN: 0265-671X. DOI: 10.1108/IJQRM-05-2021-0138.
- [399] L. Lange, S. Buxbaum Conradi, T. Redlich und J. P. Wulfsberg, "Exploring Fear and Hesitancy among Machine Tool Operators - A socio-technical approach on enhancing machine tool usability from a developer, educator and user perspective," in *Human-Centered Design and User Experience*, Ser. AHFE International, AHFE International, 2023. DOI: 10.54941/ahfe1004292.
- [400] T. Treinen und S. S. V. K. Kolla, "Augmented Reality for Quality Inspection, Assembly and Remote Assistance in Manufacturing," *Procedia Computer Science*, Jg. 232, S. 533–543, 2024, ISSN: 18770509. DOI: 10.1016/j.procs.2024.01.053.
- [401] A. Seeliger, L. Cheng und T. Netland, "Augmented reality for industrial quality inspection: An experiment assessing task performance and human factors," *Computers in Industry*, Jg. 151, S. 103985, 2023, ISSN: 0166-3615. DOI: 10.1016/j.compind.2023.103985.
- [402] F. Ferraguti, F. Pini, T. Gale, F. Messmer, C. Storchi, F. Leali und C. Fantuzzi, "Augmented reality based approach for on-line quality assessment of polished surfaces," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 59, S. 158–167, 2019, ISSN: 0736-5845. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.04.007.
- [403] S. Piontek, M. Schütze und H. Lödding, "Digital assistance for aircraft manufacturing – process requirements and technologies," *Procedia CIRP*, Jg. 120, S. 105–110, 2023, ISSN: 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2023.08.019.

- [404] Meta, *React: The library for web and native user interfaces*, 2024. Adresse: <https://react.dev/>.
- [405] Microsoft, *What is Mixed Reality Toolkit 2?* 2022. Adresse: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/mrtk2/?view=mrtkunity-2022-05>.
- [406] Unity Technologies, *Unity Documentation*, 2024. Adresse: <https://docs.unity.com/>.
- [407] A. Bangor, P. T. Kortum und J. T. Miller, "An Empirical Evaluation of the System Usability Scale," *International Journal of Human-Computer Interaction*, Jg. 24, Nr. 6, S. 574–594, 2008, ISSN: 1044-7318. DOI: 10.1080/10447310802205776.
- [408] I. Rabbi und S. Ullah, "A Survey on Augmented Reality Challenges and Tracking," *Acta Graphica*, Jg. 24, Nr. 1-2, S. 29–46, 2013, ISSN: 1848-3828.
- [409] M. Kalaitzakis, B. Cain, S. Carroll, A. Ambrosi, C. Whitehead und N. Vitzilaios, "Fiducial Markers for Pose Estimation," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Jg. 101, Nr. 4, 2021, ISSN: 0921-0296. DOI: 10.1007/s10846-020-01307-9.
- [410] A. Zakiev, K. Shabalina, T. Tsoy und E. Magid, "Pilot Virtual Experiments on ArUco and ArTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance," in *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*, Ser. Smart Innovation, Systems and Technologies, A. Ronzhin und V. Shishlakov, Hrsg., Bd. 154, Singapore: Springer Singapore, 2020, S. 455–464, ISBN: 978-981-13-9266-5. DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2_37.
- [411] A. Zakiev, T. Tsoy, K. Shabalina, E. Magid und S. K. Saha, "Virtual Experiments on ArUco and AprilTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance under Noisy Sensory Data," in *2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, IEEE, 2020, S. 1–6, ISBN: 978-1-7281-6926-2. DOI: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207701.
- [412] X. X. Lu, "A Review of Solutions for Perspective-n-Point Problem in Camera Pose Estimation," *Journal of Physics: Conference Series*, Jg. 1087, S. 052 009, 2018, ISSN: 1742-6588. DOI: 10.1088/1742-6596/1087/5/052009.
- [413] B. Sredojev, D. Samardzija und D. Posarac, "WebRTC technology overview and signaling solution design and implementation," in *2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, IEEE, 2015, S. 1006–1009, ISBN: 978-9-5323-3082-3. DOI: 10.1109/MIPRO.2015.7160422.
- [414] G. Bradski, "The openCV library.," *Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer*, Jg. 25, Nr. 11, S. 120–123, 2000.

- [415] R. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Jg. 3, Nr. 4, S. 323–344, 1987, ISSN: 0882-4967. DOI: 10.1109/JRA.1987.1087109.
- [416] OPEN CASCADE SAS, *pythonOCC provides a python wrapper for the OpenCASCADE C++ technology*. Adresse: <https://dev.opencascade.org/project/pythonocc>.
- [417] Y.-J. Cha, W. Choi, G. Suh, S. Mahmoudkhani und O. Büyüköztürk, "Autonomous Structural Visual Inspection Using Region-Based Deep Learning for Detecting Multiple Damage Types," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Jg. 33, Nr. 9, S. 731–747, 2018, ISSN: 1093-9687. DOI: 10.1111/mice.12334.
- [418] M. Awais, M. Naseer, S. Khan, R. M. Anwer, H. Cholakkal, M. Shah, M.-H. Yang und F. S. Khan, *Foundational Models Defining a New Era in Vision: A Survey and Outlook*, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2307.13721.
- [419] L. Yuan, D. Chen, Y.-L. Chen, N. Codella, X. Dai, J. Gao, H. Hu, X. Huang, B. Li, C. Li, C. Liu, M. Liu, Z. Liu, Y. Lu, Y. Shi, L. Wang, J. Wang, B. Xiao, Z. Xiao, J. Yang, M. Zeng, L. Zhou und P. Zhang, *Florence: A New Foundation Model for Computer Vision*, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.11432.
- [420] C. Zhang, G. Lin, F. Liu, R. Yao und C. Shen, "CANet: Class-Agnostic Segmentation Networks With Iterative Refinement and Attentive Few-Shot Learning," in *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, 2019, S. 5212–5221, ISBN: 978-1-7281-3293-8. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00536.
- [421] H. Wang, P. K. A. Vasu, F. Faghri, R. Vemulapalli, M. Farajtabar, S. Mehta, M. Rastegari, O. Tuzel und H. Pouransari, *SAM-CLIP: Merging Vision Foundation Models towards Semantic and Spatial Understanding*, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2310.15308.
- [422] Y. Lee und J. Park, "CenterMask: Real-Time Anchor-Free Instance Segmentation," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Juni 2020.
- [423] J. Hu, L. Huang, T. Ren, S. Zhang, R. Ji und L. Cao, "You Only Segment Once: Towards Real-Time Panoptic Segmentation," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Juni 2023, S. 17 819–17 829.
- [424] A. Kirillov, E. Mintun, N. Ravi, H. Mao, C. Rolland, L. Gustafson, T. Xiao, S. Whitehead, A. C. Berg, Lo Wan-Yen, P. Dollár und R. Girshick, *Segment Anything*. Adresse: <https://arxiv.org/pdf/2304.02643.pdf>.
- [425] Y. Zhang, X. Huang, J. Ma, Z. Li, Z. Luo, Y. Xie, Y. Qin, T. Luo, Y. Li, S. Liu, Y. Guo und L. Zhang, *Recognize Anything: A Strong Image Tagging Model*, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.03514.

- [426] X. Zou, J. Yang, H. Zhang, F. Li, L. Li, J. Wang, L. Wang, J. Gao und Y. J. Lee, *Segment Everything Everywhere All at Once*, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2304.06718.
- [427] A. Dosovitskiy, L. Beyer, A. Kolesnikov, D. Weissenborn, X. Zhai, T. Unterhiner, M. Dehghani, M. Minderer, G. Heigold, S. Gelly, J. Uszkoreit und N. Houlsby, *An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale*, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2010.11929.
- [428] A. Radford, J. W. Kim, C. Hallacy, A. Ramesh, G. Goh, S. Agarwal, G. Sastry, A. Askell, P. Mishkin, J. Clark, G. Krueger und I. Sutskever, *Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision*, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2103.00020.
- [429] X. Chen, Z. Zhao, Y. Zhang, M. Duan, D. Qi und H. Zhao, *FocalClick: Towards Practical Interactive Image Segmentation*, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2204.02574.
- [430] Q. Liu, Z. Xu, G. Bertasius und M. Niethammer, *SimpleClick: Interactive Image Segmentation with Simple Vision Transformers*, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2210.11006.
- [431] K. Sofiiuk, I. A. Petrov und A. Konushin, *Reviving Iterative Training with Mask Guidance for Interactive Segmentation*, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2102.06583.
- [432] J. Chen, Y. Xu, S. Lu, R. Liang und L. Nan, “3-D Instance Segmentation of MVS Buildings,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Jg. 60, S. 1–14, 2022, ISSN: 0196-2892. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3183567.
- [433] J. Hong, M. Fulton und J. Sattar, *TrashCan: A Semantically-Segmented Dataset towards Visual Detection of Marine Debris*, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2007.08097.
- [434] M. Minervini, A. Fischbach, H. Scharr und S. A. Tsafaris, “Finely-grained annotated datasets for image-based plant phenotyping,” *Pattern Recognition Letters*, Jg. 81, S. 80–89, 2016, ISSN: 0167-8655. DOI: 10.1016/j.patrec.2015.10.013.
- [435] L. Yang, Y. Z. Wei, Y. HE, W. Sun, Z. Huang, H. Huang und H. Fan, *iShape: A First Step Towards Irregular Shape Instance Segmentation*, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2109.15068.
- [436] ISO Internationale Organisation für Normung, *ISO 9283 - Industrieroboter - Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethode*, Berlin, 1998.
- [437] P. Stephan, I. Heck, P. Krau und G. Frey, “Evaluation of Indoor Positioning Technologies under industrial application conditions in the SmartFactory-KL based on EN ISO 9283,” *IFAC Proceedings Volumes*, Jg. 42, Nr. 4, S. 870–875, 2009, ISSN: 1474-6670. DOI: 10.3182/20090603-3-RU-2001.0294.

- [438] OptiTrack, *Prime 13*, 2024. Adresse: <https://optitrack.com/cameras/prime-13/indepth.html>.
- [439] OptiTrack, *Calibration*, 2024. Adresse: <https://docs.optitrack.com/motive/calibration>.
- [440] Universal Robots, *UR10e Technical Specification*. Adresse: <https://www.universal-robots.com/media/1807466/ur10e-rgb-fact-sheet-landscape-a4-125-kg.pdf>.
- [441] C. Landgraf, K. Ernst, G. Schleth, M. Fabritius und M. F. Huber, "A Hybrid Neural Network Approach for Increasing the Absolute Accuracy of Industrial Robots," in *2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, IEEE, 2021, S. 468–474, ISBN: 978-1-6654-1873-7. DOI: 10.1109/CASE49439.2021.9551684.
- [442] C. Liebers, M. Prochazka, N. Pfützenreuter, J. Liebers, J. Auda, U. Gruenefeld und S. Schneegass, "Pointing It Out! Comparing Manual Segmentation of 3D Point Clouds between Desktop, Tablet, and Virtual Reality," *International Journal of Human-Computer Interaction*, S. 1–15, 2023, ISSN: 1044-7318. DOI: 10.1080/10447318.2023.2238945.
- [443] T. Plewan, B. Mättig, V. Kretschmer und G. Rinkenauer, "Exploring the benefits and limitations of augmented reality for palletization," *Applied ergonomics*, Jg. 90, S. 103250, 2021. DOI: 10.1016/j.apergo.2020.103250.
- [444] K. Moenck, D. T. Thieu, J. Koch und T. Schüppstuhl, *Industrial Language-Image Dataset (ILID): Adapting Vision Foundation Models for Industrial Settings*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2406.09637.
- [445] Intel. "Intel RealSense D435i Depth Camera." Adresse: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/>.
- [446] Intel. "Intel RealSense D455 Depth Camera." Accessed on: 21. Januar 2026. Adresse: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d455/>.
- [447] Intel. "Intel RealSense Tracking Camera T265." Adresse: <https://www.intelrealsense.com/tracking-camera-t265/>.
- [448] A. Alapetite, Z. Wang, J. P. Hansen, M. Zajączkowski und M. Patalan, "Comparison of Three Off-the-Shelf Visual Odometry Systems," *Robotics*, Jg. 9, Nr. 3, S. 56, 2020. DOI: 10.3390/robotics9030056.
- [449] A. Sagitov, K. Shabalina, H. Li und E. Magid, "Effects of rotation and systematic occlusion on fiducial marker recognition," *MATEC Web of Conferences*, Jg. 113, S. 02006, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201711302006.
- [450] V. Mondéjar-Guerra, S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, M. J. Marín-Jiménez und R. Medina-Carnicer, "Robust identification of fiducial markers in challenging conditions," *Expert Systems with Applications*, Jg. 93, S. 336–345, 2018, ISSN: 0957-4174. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.10.032.

- [451] Intel, *Tracking Camera T265 / T261 Datasheet*, Intel Real Sense, Hrsg., 2019. Adresse: <https://dev.intelrealsense.com/docs/tracking-camera-t265-datasheet>.
- [452] S. Park, S. Yu, J. Kim, S. Kim und S. Lee, “3D hand tracking using Kalman filter in depth space,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Jg. 2012, Nr. 1, 2012. DOI: 10.1186/1687-6180-2012-36.
- [453] J. Yan, L. Guorong, L. Shenghua und Z. Lian, “A Review on Localization and Mapping Algorithm Based on Extended Kalman Filtering,” in *2009 International Forum on Information Technology and Applications*, IEEE, 2009, S. 435–440, ISBN: 978-0-7695-3600-2. DOI: 10.1109/IFITA.2009.284.
- [454] Open Robotics, *ROS - Robot Operating System*, 2024. Adresse: <https://www.ros.org/>.
- [455] L. Zhi und M. Xuesong, “Navigation and Control System of Mobile Robot Based on ROS,” in *2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, IEEE, 2018, S. 368–372, ISBN: 978-1-5386-4509-3. DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577901.
- [456] S. Gatesichapakorn, J. Takamatsu und M. Ruchanurucks, “ROS based Autonomous Mobile Robot Navigation using 2D LiDAR and RGB-D Camera,” in *2019 First International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP)*, IEEE, 2019, S. 151–154, ISBN: 978-1-5386-7774-2. DOI: 10.1109/ICA-SYMP.2019.8645984.
- [457] D. Perea Ström, I. Bogoslavskiy und C. Stachniss, “Robust exploration and homing for autonomous robots,” *Robotics and Autonomous Systems*, Jg. 90, S. 125–135, 2017, ISSN: 0921-8890. DOI: 10.1016/j.robot.2016.08.015.
- [458] P. K. Panigrahi und S. K. Bisoy, “Localization strategies for autonomous mobile robots: A review,” *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Jg. 34, Nr. 8, S. 6019–6039, 2022, ISSN: 1319-1578. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.02.015.
- [459] T. Krüger-Basjmeleh, “Befähigung autonomer, mobiler Roboter zum One-Shot-Imitationslernen für den vollständigen Transport von Paletten in Lager- und Produktionsbereichen,” Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2023, ISBN: 978-3-8439-5431-0.
- [460] T. Rupp, P. Levi und D. E. Lazić, “Absolute Lokalisation mobiler Roboter durch Codierungen mit künstlichen Landmarken,” in *Autonome Mobile Systeme 2001*, P. Levi und M. Schanz, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001, S. 178–185, ISBN: 978-3-642-56787-2.
- [461] Open Robotics, *ROS tf*, 2017. Adresse: <http://wiki.ros.org/tf>.
- [462] J. Orton und M. Lichvar, *chrony*, 2024. Adresse: <https://gitlab.com/chrony/chrony>.

- [463] A. Grunnet-Jepsen, M. Harville, B. Fulkerson, D. Piro, S. Brook und J. Radford, *Introduction to Intel® RealSense™ Visual SLAM and the T265 Tracking Camera*, Intel, Hrsg., 2023. Adresse: <https://dev.intelrealsense.com/docs/intel-realsense-tm-visual-slam-and-the-t265-tracking-camera>.
- [464] OptiTrack, *Rigid Body Tracking*, 2024. Adresse: <https://docs.optitrack.com/motive/rigid-body-tracking>.
- [465] Open Robotics, *rviz*, 2018. Adresse: <http://wiki.ros.org/rviz>.
- [466] J. Wang, Y. Alipouri und B. Huang, “Dual Neural Extended Kalman Filtering Approach for Multirate Sensor Data Fusion,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Jg. 70, S. 1–9, 2021, ISSN: 0018-9456. DOI: 10.1109/TIM.2020.3041825.
- [467] C. Ran und Z. Deng, “Self-tuning weighted measurement fusion Kalman filtering algorithm,” *Computational Statistics & Data Analysis*, Jg. 56, Nr. 6, S. 2112–2128, 2012, ISSN: 0167-9473. DOI: 10.1016/j.csda.2012.01.001.
- [468] M. Karasalo und X. Hu, “An optimization approach to adaptive Kalman filtering,” *Automatica*, Jg. 47, Nr. 8, S. 1785–1793, 2011, ISSN: 0005-1098. DOI: 10.1016/j.automatica.2011.04.004.
- [469] D. Schoepflin, J. Koch, M. Gomse und T. Schüppstuhl, “Smart Material Delivery Unit for the Production Supplying Logistics of Aircraft,” *Procedia Manufacturing*, Jg. 55, S. 455–462, 2021, ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.10.062.
- [470] Thomann, *Showtec Phantom 130 Spot*, 2024. Adresse: https://www.thomann.de/intl/showtec_phantom_130_spot.htm.
- [471] Rebeam, *Mirror Head 11 - Sony VPL-FH Series*, 2024. Adresse: <https://www.rebeam-shop.com/en/mirror-head/mirror-head-11-sony-vpl-fh-series/Z-MH-8109>.
- [472] Laserman Technologies, *Z-Laser ZLP2 Compact Laser Projector with Z-FIBER Source*, 2024. Adresse: <https://laserman.co/products/z-laser-zlp2-compact-laser-projector-with-z-fiber-source>.
- [473] B. Sutton, “Chapter 31: Newton’s method,” in *Numerical Analysis: Theory and Experiments*, B. Sutton, Hrsg., Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2019, S. 347–359, ISBN: 978-1-61197-569-7. DOI: 10.1137/1.9781611975703.ch31.
- [474] N. J. Higham, “Chapter 25: Nonlinear Systems and Newton’s Method,” in *Accuracy and Stability of Numerical Algorithms*, N. J. Higham, Hrsg., Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002, S. 459–469, ISBN: 978-0-89871-521-7. DOI: 10.1137/1.9780898718027.ch25.

- [475] OpenJS Foundation & Contributors, *Node-RED: Low-code programming for event-driven applications*, 2024. Adresse: <https://nodered.org/>.
- [476] F. Ihirwe, D. Di Ruscio, S. Mazzini, P. Pierini und A. Pierantonio, "Low-code engineering for internet of things," S. 1–8, 2020. DOI: 10.1145/3417990.3420208.
- [477] Nam Giang, *node-red-contrib-pythonshell*, 2020. Adresse: <https://github.com/namgk/node-red-contrib-pythonshell>.
- [478] ENTTEC, *ESP (DMX over ETHERNET)*, 2016. Adresse: https://www.enttec.com/202017-yk0e/04%20E2%80%BA%20ESP_protocol.
- [479] Leica Geosystems AG, *Leica Laser Tracker for Hand-Tools: Superior by Any Measure – LT(D)800: Document 731 982 - III.2003*.
- [480] Sigma 3D GmbH, *Leica Laser Track LT(D)800: Technische Spezifikationen*, 2025. Adresse: <https://gispoint.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=12322&token=29c7592ef15043427775282beaba62dc7110a6a&download=47901376402000&source=images&opi=89978449>.
- [481] C. Picard, K. M. Edwards, A. C. Doris, B. Man, G. Giannone, M. F. Alam und F. Ahmed, *From Concept to Manufacturing: Evaluating Vision-Language Models for Engineering Design*, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2311.12668.
- [482] N. Ravi, V. Gabeur, Y.-T. Hu, R. Hu, C. Ryali, T. Ma, H. Khedr, R. Rädle, C. Rolland, L. Gustafson, E. Mintun, J. Pan, K. V. Alwala, N. Carion, C.-Y. Wu, R. Girshick, P. Dollár und C. Feichtenhofer, *SAM 2: Segment Anything in Images and Videos*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2408.00714.
- [483] Y. Gong, H. Shao, J. Luo und Z. Li, "A deep transfer learning model for inclusion defect detection of aeronautics composite materials," *Composite Structures*, Jg. 252, S. 112 681, 2020, ISSN: 0263-8223. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112681.
- [484] R. Bewer und K. Steckmann, *Das Praxisbuch der Lichttechnik: Einführung in die professionelle Bühnenbeleuchtung (Factfinder-Serie), 2., überarb. uund erw. Aufl.* München: Carstensen, 2004, ISBN: 978-3-910098-30-5.
- [485] J. Mueller, *Handbuch der Lichttechnik: Know-how für Film, Fernsehen, Theater, Veranstaltungen und Events ; [das Kompendium für den Praktiker, 4., aktualisierte und erw. Aufl.* Bergkirchen: PPVMedien, 2008, ISBN: 978-3-937841-25-0.
- [486] J. Eade, *The DMX512-A handbook: Design and implementation of DMX enabled products and networks* (Entertainment Technology Press systems series). Cambridge: Entertainment Technology Press, 2013, ISBN: 1-904031-72-2.

- [487] Showtec, *Phantom 130 Spot*, 2024. Adresse: <https://www.showtec-lights.com/en/4007p130-phantom-130-spot.html?selected=40072>.
- [488] ENTTEC Ltd. "Open DMX Ethernet Mk2 - RDM compliant DMX over Ethernet Gateway," User Manual, besucht am 6. Juni 2023. Adresse: <https://support.enttec.com/helpdesk/attachments/101026597782>.

A Anhang

A.1 Anhang zu Kapitel 4

A.1.1 Zusätzliche Veranschaulichungen

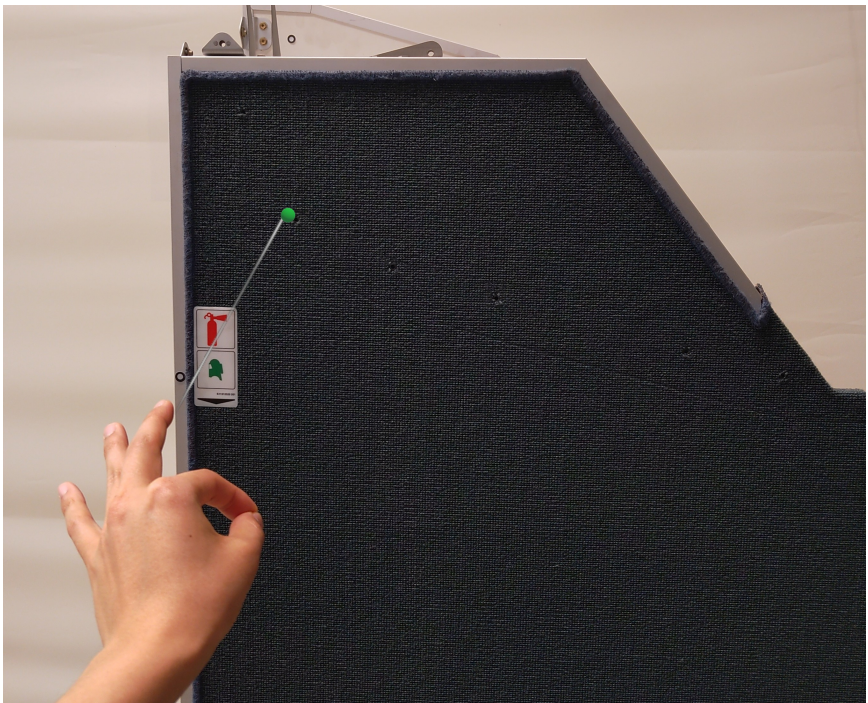


Abbildung A.1: Anlegen eines Startpunktes mithilfe von Raycasting und Pinch-Geste auf dem Spatial-Mesh eines Kabinenbauteils.

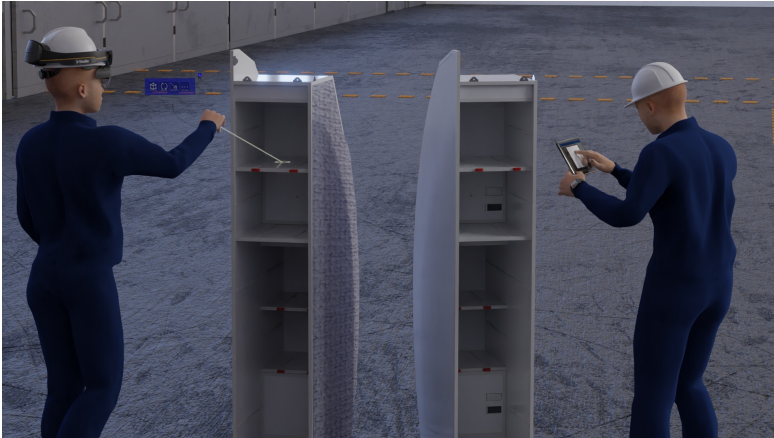
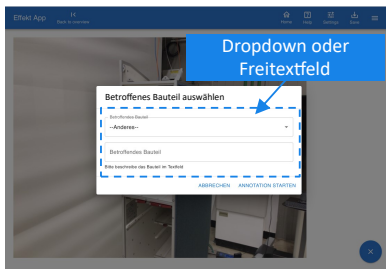
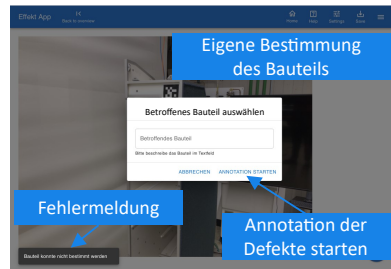


Abbildung A.2: Renderingbasierte Veranschaulichung der komparativen Studie. Links: Durchführung der Sichtprüfung mit AR-Brille. Rechts: Durchführung der Sichtprüfung mit Tablet.



(a) Dropdownmenü und Freitextfeldeingabe bei nicht vorhandenen Komponenten.



(b) Freitextfeldeingabe bei fehlgeschlagener Schnittstellenberechnung.

Abbildung A.3: Bedienoberflächen für die Handhabung von Ausnahmen.

A.1.2 Evaluierungsdaten

A.1.2.1 Daten aus den Versuchen zur 1. Systemiteration

Person	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	SUS Score
P1	3	0	4	3	3	1	3	1	3	4	67,5
P2	0	1	3	3	3	4	2	2	2	1	50
P3	3	0	3	1	3	4	4	1	2	1	70
P4	3	2	3	3	2	2	4	1	4	2	65
P5	3	0	4	0	4	0	3	0	3	2	87,5
P6	4	2	2	3	3	3	2	3	4	2	55
P7	4	0	4	1	4	0	4	0	2	0	97,5
P8	4	0	4	1	4	0	4	0	3	2	92,5
P9	2	0	4	1	4	0	4	0	3	2	85
P10	4	0	3	2	4	0	3	1	3	4	87,5

Tabelle A.1: SUS-Rohdaten der einzelnen Teilnehmenden AR-Gruppe.

Person	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	SUS Score
P1	5	3	4	2	4	3	5	2	5	4	72,5
P2	3	2	4	2	4	2	5	3	3	4	65
P3	5	1	5	2	4	1	5	1	5	1	95
P4	4	1	3	1	4	3	5	2	5	1	82,5
P5	5	1	5	4	4	1	5	2	4	1	85
P6	4	1	3	1	4	1	5	1	5	2	87,5
P7	4	1	5	1	5	1	5	1	4	1	95
P8	5	2	4	4	5	2	5	1	4	3	77,5
P9	5	1	5	2	4	1	5	1	5	1	95
P10	4	1	5	3	4	3	5	2	5	3	77,5

Tabelle A.2: SUS-Rohdaten der einzelnen Teilnehmenden der Tablet-Gruppe.

A.1.2.2 Daten aus den Versuchen zur 2. Systemiteration

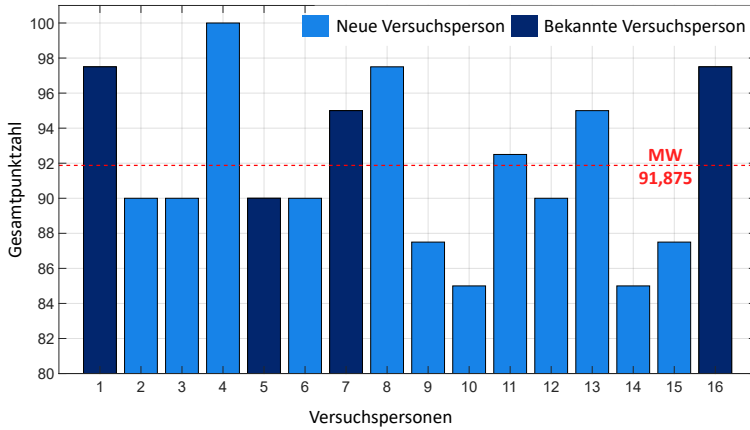


Abbildung A.4: SUS-Gesamtwerte der Teilnehmenden.

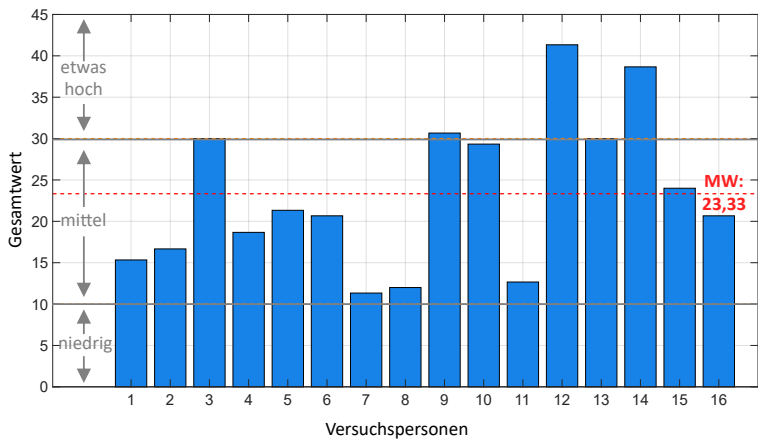


Abbildung A.5: NASA-TLX-Gesamtwerte der Teilnehmenden.

Person	GA	KA	ZA	L	A	F
P1	2	1	1	1	2	1
P2	2	1	2	2	1	1
P3	7	2	1	1	2	4
P4	4	1	1	1	2	1
P5	6	2	1	1	1	1
P6	3	1	3	1	1	1
P7	2	1	1	1	1	1
P8	2	2	1	1	1	1
P9	4	1	5	5	3	1
P10	2	1	3	9	2	3
P11	1	1	2	1	1	1
P12	7	7	6	1	4	2
P13	4	4	1	1	2	1
P14	3	2	7	2	2	2
P15	3	1	3	1	4	2
P16	2	1	3	1	3	1

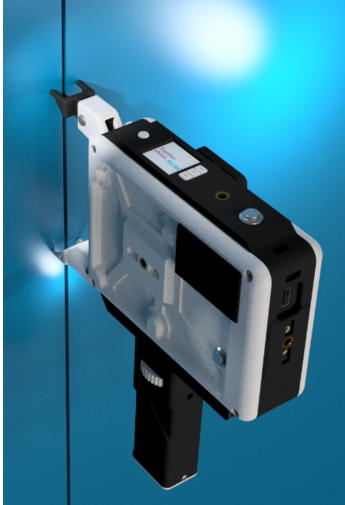
Tabelle A.3: NASA-TLX-Rohdaten der 16 Teilnehmenden zum ersten Teil des Fragebogens. Abkürzungen für die Fragen: **GA**: Geistige Anforderung, **KA**: Körperliche Anforderung, **ZA**: Zeitliche Anforderung, **L**: Leistung, **A**: Anstrengung, **F**: Frustration.

Person	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
P1	L	ZA	ZA	L	L	L	ZA	L	A	L	GA	F	KA	A	L
P2	GA	GA	A	ZA	GA	GA	GA	L	A	L	GA	F	KA	A	L
P3	ZA	A	F	GA	ZA	GA	KA	L	L	L	A	L	KA	L	L
P4	GA	GA	GA	GA	ZA	GA	KA	L	KA	KA	L	A	L	F	A
P5	ZA	GA	F	ZA	GA	L	KA	L	KA	L	L	A	L	F	A
P6	GA	GA	GA	GA	GA	GA	F	L	A	L	GA	F	KA	A	L
P7	GA	GA	KA	F	KA	GA	GA	A	KA	F	GA	F	KA	A	F
P8	KA	F	F	KA	KA	L	A	F	A	L	L	GA	A	F	ZA
P9	L	L	L	L	L	L	A	A	KA	KA	GA	A	A	L	A
P10	A	L	L	KA	KA	A	KA	F	F	F	F	A	A	F	A
P11	L	L	F	F	L	L	A	L	F	F	GA	F	KA	F	A
P12	GA	F	GA	ZA	ZA	ZA	F	L	A	F	L	A	L	A	A
P13	A	ZA	A	ZA	ZA	ZA	F	A	A	L	GA	F	KA	A	F
P14	A	ZA	F	ZA	ZA	F	F	A	L	F	L	A	L	F	A
P15	L	F	ZA	F	ZA	ZA	ZA	L	A	L	GA	F	KA	A	F
P16	ZA	GA	GA	ZA	GA	GA	F	L	A	F	GA	F	KA	F	A

Tabelle A.4: NASA-TLX-Rohdaten der 16 Teilnehmenden zum zweiten Teil des Fragebogens. Abkürzungen für die Fragen: **GA**: Geistige Anforderung, **KA**: Körperliche Anforderung, **ZA**: Zeitliche Anforderung, **L**: Leistung, **A**: Anstrengung, **F**: Frustration.

A.2 Anhang zu Kapitel 5

A.2.1 Darstellung des Prüfmittels und des Versuchskörpers



(a) Konfiguration:
Anbaumodul.

Doppelpin-



(b) Konfiguration: Encoder-Anbaumodul.

Abbildung A.6: Verschiedene Konfigurationen des Prüfmittels im Anwendungsfall.

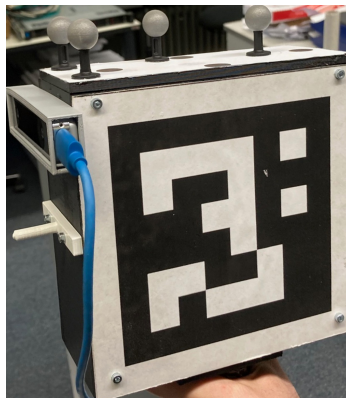
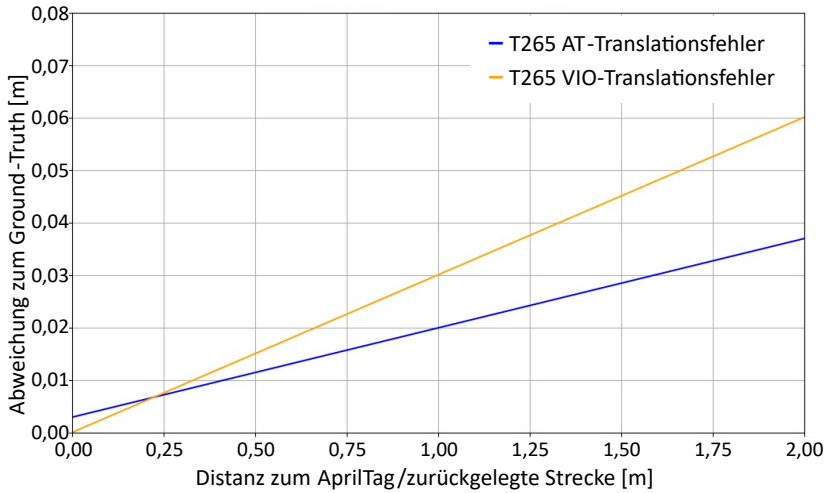


Abbildung A.7: Versuchskörper mit mobiler Kamera und Markern.

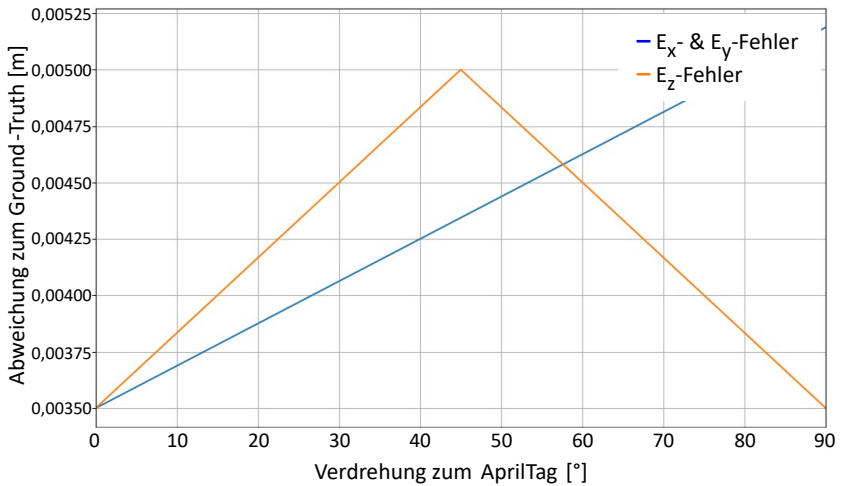
A.2.2 Versuche zur Sensorcharakterisierung der mobilen Kamera

Position	X [m]	Y [m]	Z [m]	Strecke [m]	Abstand [m]
P_0	0,19	0	1	0	0
P_1	0	1,1	1	1,29	1,116
P_2	0	1,1	0	2,29	1,499
P_3	0	-1,1	0	4,49	1,499
P_4	0	-1,1	1	5,49	1,116
P_5	0	0	1	6,59	0,19
P_6	0,265	0	1	6,855 (13,255)	0,075
P_7	0,265	1,1	1	7,955	1,103
P_8	0,265	1,1	0	8,955	1,488
P_9	0,265	-1,1	0	11,155	1,488
P_{10}	0,265	-1,1	1	12,155	1,103

Tabelle A.5: Koordinaten der angefahrenen Positionen für den Versuch zur Ermittlung der Lokalisierungsgenauigkeit der VIO-Lokalisierung.

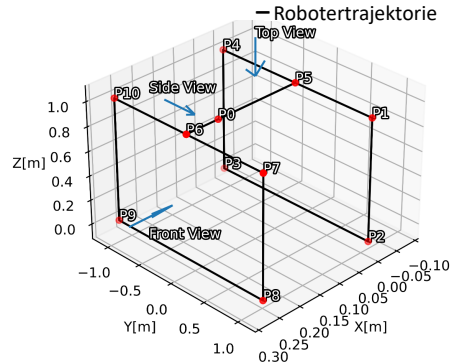
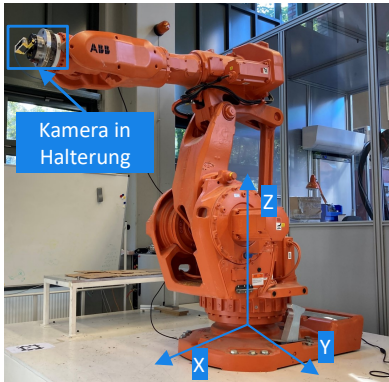


(a) Ergebnisse der Experimente zum Translationsfehler für der mobilen Kamera für die AprilTag- und VIO-Lokalisierung.



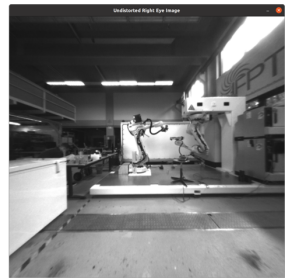
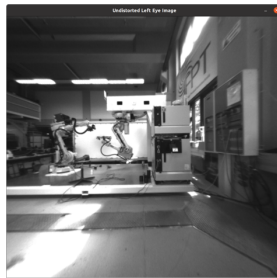
(b) Ergebnisse der Experimente zum Rotationsfehler für die mobilen Kamera.

Abbildung A.8: Experimentell ermittelte Fehlercharakteristika der AprilTag-Lokalisierung sowie des VIO-Lokalisierung der mobilen Kamera.



(a) Versuchsaufbau zur Bestimmung des Fehlers der mobilen Kamera (T265) über die Führung an einem Roboter.

(b) Darstellung der Messpunkte P_0 bis P_{10} als Basis für die abgefahrte Trajektorie im Roboterkoordinatensystem.



(c) Exemplarische Aufnahmen der mobilen Kamera an verschiedenen Messpunkten.

Abbildung A.9: Versuchsaufbau für die Ermittlung der Fehlercharakteristika der VIO-Lokalisierung der mobilen Kamera.

A.2.3 Ergebnisse der Genauigkeitsevaluierung

Lokalisierungsverfahren	Richtigkeit [m]	Präzision [m]	Min. Fehler [m]	Max. Fehler [m]
Mobile Kamera (VIO)	0,065	0,017	0,012	0,143
Mobile Kamera (ATL)	0,692	0,964	0,022	2,103
Statische Kamera 1	0,030	0,002	0,007	0,065
Statische Kamera 2	0,020	0,002	0,005	0,053
Kalman-Filter	0,026	0,010	0,008	0,277

Tabelle A.6: Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen für die jeweiligen Lokalisierungsverfahren sowie für die Sensorfusion mit den Kenngrößen der Richtigkeit und Präzision sowie des minimalen und maximalen Fehlers über alle Messpositionen für die Versuchsreihe mit Driftreduzierung mit der D4351.

Lokalisierungsverfahren	Richtigkeit [m]	Präzision [m]	Min. Fehler [m]	Max. Fehler [m]
Mobile Kamera (VIO)	0,058	0,015	0,003	0,191
Mobile Kamera (ATL)	0,029	0,006	0,018	0,054
Statische Kamera 1	0,030	0,002	0,006	0,063
Statische Kamera 2	0,020	0,002	0,005	0,046
Kalman-Filter	0,026	0,006	0,006	0,074

Tabelle A.7: Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen für die jeweiligen Lokalisierungsverfahren sowie für die Sensorfusion mit den Kenngrößen der Richtigkeit und Präzision sowie des minimalen und maximalen Fehlers über alle Messpositionen für die Versuchsreihe mit Driftreduzierung mit der D455.

A.3 Anhang zu Kapitel 6

A.3.1 Aufbau und Kommunikation von kopfbewegten Lichtprojektoren

MHS sind als Beleuchtungsinstrument in der Bühnen- und Veranstaltungstechnik am weitesten verbreitet und bieten die Flexibilität, die Richtung des Lichts sowie weitere Parameter des Lichtstrahls schnell zu ändern. Der Aufbau dieses Gerätes lässt sich in mehrere zentrale Komponenten untergliedern: die Antriebsmechanik für das Schwenken (Pan) und Neigen (Tilt) im Sockel und Projektorarm, die optischen Elemente im Projektorarm, die Steuerelektronik im Sockel und das zur Kommunikation verwendete Digital Multiplex (DMX)-Protokoll. Der physische Aufbau ist schematisch in Abbildung A.10 veranschaulicht.

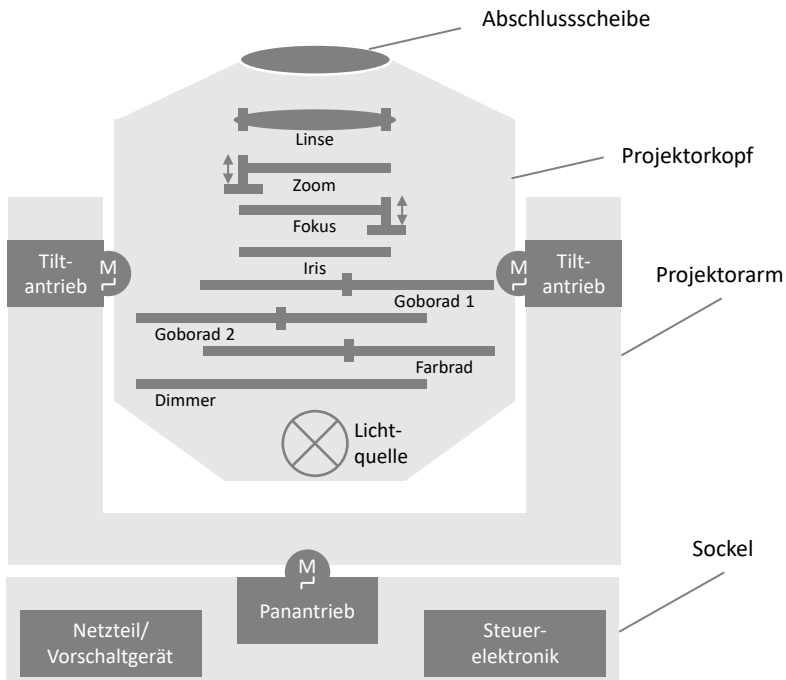


Abbildung A.10: Physischer Aufbau eines Moving Head Spots mit den wesentlichen optischen und elektronischen Komponenten (in Anlehnung an [484]).

A.3.1.1 Pan- und Tiltantriebe

Die Pan- und Tiltantriebe bilden das Fundament für die dynamische Positionierung des Lichtpunktes. Diese werden typischerweise durch Schrittmotoren mit Encoder realisiert. Über ein System von Getrieben, die an die Motorachse gekoppelt sind, wird die Bewegung auf den Kopf des Projektors übertragen. Die Steuerung der Motoren erfolgt über die integrierte Elektronik, die Signale des DMX-Protokolls interpretiert und in entsprechende Bewegungsabläufe umsetzt (Kapitel A.3.1.3). Aus diesem mechanischen Aufbau resultieren zwei Hauptdrehachsen, die im Folgenden mit *pan* und *tilt* bezeichnet werden [484]. Die Bewegungsbereiche liegen typischerweise im Bereich von $pan = [0^\circ \ 360^\circ] / [0^\circ \ 540^\circ]$ und $tilt = [0^\circ \ 180^\circ] / [0^\circ \ 270^\circ]$. Der MHS stellt eine serielle Kinematik dar, wobei *pan* die Drehung um den Sockel und *tilt* die Drehung des Projektorkopfes beschreibt. Dieses Bewegungsprinzip ähnelt der Definition eines sphärischen Koordinatensystems und führt zur Ableitung der kartesischen Steuerung im Kapitel 6.2.1.1.

A.3.1.2 Optische Elemente im Projektorkopf

Im Kopf des MHS befinden sich mehrere optische Komponenten, welche zur Anpassung und Manipulation des ausgehenden Lichtstrahls dienen. Diese werden im Folgenden nach [485] erläutert:

- **Lichtquelle:** Oftmals handelt es sich bei der Lichtquelle um eine Hochleistungs-LED oder eine Entladungslampe, die eine hohe Lichtausbeute und Farbtemperaturstabilität bieten.
- **Dimmer:** Mechanische Dimmer in MHS verwenden physische Blenden oder Shutters, die sich vor die Lichtquelle bewegen, um die Lichtintensität durch mechanisches Blockieren oder Freigeben des Lichtflusses zu regulieren. Elektrische Dimmer hingegen steuern die Lichtintensität durch Pulsweitenmodulation (PWM), um die gewünschte Helligkeit zu erreichen. Beim Einsatz elektrischer Dimmer werden diese in der Regel innerhalb der Steuerelektronik verbaut.
- **Farbrad:** Dieses Rad enthält mehrere Farbfilter, die in den Lichtstrahl eingebracht werden können, um die Farbe des ausgestrahlten Lichts zu verändern.
- **Graphical Optical Blackout (Gobo):** Gobaräder sind Scheiben, die mit einer Vielzahl von Mustern (Gobos) ausgestattet sind. Diese Muster können fest oder rotierend sein und werden genutzt, um texturierte Lichteffekte zu erzeugen.
- **Iris:** Die Iris ist eine verstellbare Blende, die den Durchmesser des Lichtstrahls kontrolliert, ähnlich der Funktion einer Blende in einer Kamera.
- **Fokus:** Der Fokus in einem MHS bezieht sich auf die Schärfe oder Klarheit des projizierten Lichtpunktes oder eines Gobo-Musters. Zur Umsetzung wird typischerweise die Brennweite durch das Verändern der Position einer Linse relativ zur Lichtquelle manipuliert.

- **Zoom:** Der Zoom beeinflusst die Größe des Lichtstrahls oder des projizierten Bildes, ohne dass sich die Position des MHS ändern muss. Durch den Zoom kann der Lichtstrahl verbreitert oder verengt werden, was den Strahlwinkel verändert. Dies wird, wie auch beim Fokus, durch das Verschieben einer Linse erreicht.
- **Linse und Abschlusscheibe:** Die Linse bündelt und richtet den Lichtstrahl, während die Abschlusscheibe dazu dient, das Licht weiter zu formen und unerwünschte Streuung zu minimieren.

A.3.1.3 Steuerelektronik und Kommunikationsprotokoll

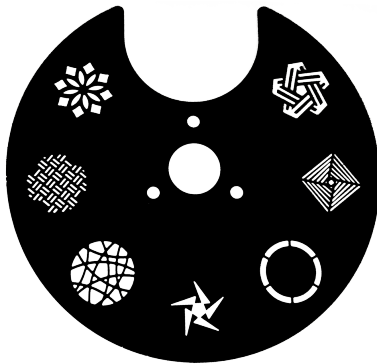
Die Steuerelektronik stellt das zentrale Element für die Verarbeitung der Ansteuersignale und die daraus resultierende Aktivierung der Bewegungs- und Beleuchtungsfunktionen des MHS dar. Diese Elektronik umfasst Mikrocontroller, Treiber für die Motoren und Schnittstellen für die Kommunikation. Zur Kommunikation kommt das branchenstandardisierte DMX512-Protokoll, das speziell für die Beleuchtungstechnik entwickelt wurde, zum Einsatz. Es ermöglicht die Steuerung von bis zu 512 Kanälen pro Netzwerklinie, wobei jeder Kanal einen 8 bit-Wert (also zwischen 0 und 255) übertragen kann, der die Spanne der Zustände des damit gekoppelten Elements definiert [486].

Auf diese Weise werden auch die beiden Hauptdrehachsen, *pan* und *tilt*, die die Position des Lichtstrahls definieren, gesteuert. Für eine feinere Steuerung dienen die Parameter *finepan* und *finetilt*. Entsprechend lassen sich die optischen Elemente aus Kapitel A.3.1.2 über dazugehörige Parameter, wie beispielsweise *zoom* und *focus*, steuern.

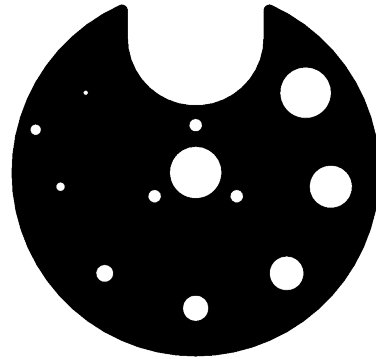
A.3.2 Beschreibung des verwendeten Moving Head Spots und der Schnittstelle

Der in dieser Arbeit verwendete MHS ist ein ShowTec Phantom 130 Spot mit einer Standard-DMX512-Schnittstelle [487]. Er verfügt über eine 130 W LED-Weißlichtquelle, die mit einem Farbfilterrad eingefärbt werden kann und mit zwei Gaborädern gestaltet wird. Dabei ist eines der Gaboräder mit rotierenden und das andere mit statischen Elementen ausgestattet. Das statische Gaborad ist in Abbildung A.11a dargestellt. In der ursprünglichen Konfiguration sind die Gaboräder mit künstlerischen Symbolen und Formen für den Showeinsatz versehen, die für Assistenzanwendungen keinen Nutzen bieten. Da der MHS über keine Iris-Blende zur Manipulation der Lichtpunktgröße verfügt, wurde im Vorhinein ein neues Gaborad mit unterschiedlichen Blendengrößen entworfen (Abbildung A.11b) und anstelle des statischen Gaborads eingesetzt. Das gezeigte Gaborad weist sieben Blendengrößen mit den folgenden Durchmessern auf: 1,25 mm, 2,49 mm, 4,98 mm, 7,48 mm, 9,97 mm, 12,46 mm und 14,95 mm. Diese Maßnahme erhöht die Spezifität des Lichtpunktes, wenn der MHS einen einzelnen Prüfpunkt beleuchten soll. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die beleuchtete Stelle durch das Einbringen anderer Formen wie Pfeile, Kreu-

ze, Kreise oder Piktogramme mit zusätzlichen Informationen bzw. Anweisungen angereichert werden kann.



(a) Ursprüngliches Goborad mit eingebrachten Mustern.



(b) Eigenes Goborad mit verschiedenen Blendengrößen.

Abbildung A.11: Darstellung des ursprünglichen und des in der Arbeit verwendeten Goborades.

Der Bewegungsbereich der Rotationsachsen des verwendeten MHS ist nach Herstellerangaben für $pan = [0^\circ \ 540^\circ]$ und $tilt = [0^\circ \ 245^\circ]$. Da für den Einsatz des MHS als Assistenzsystems ein Winkelbereich von $0 - 180^\circ$ für $tilt$ ausreichend ist, wird er auf diesen Bereich begrenzt. Weiterhin wird die Auflösung für beide Rotationsachsen mit jeweils 16 bit angegeben. Nach Inbetriebnahme zeigte sich, dass nicht der gesamte Wertebereich genutzt wird. Der höchste DMX-Wert, der noch zu einer Bewegung der jeweiligen Achse führt, ist 65280. Folglich änderte jeder Wert, der größer als 65280 ist, nicht die Position des Lichtpunktes. Aus diesen Gründen wird die Umrechnung der Pan- und Tilt-Werte für diesen spezifischen MHS durch die Gleichungen A.1 und A.2 definiert. Die hochgestellte Zahl auf der rechten Seite bestimmt das Format, in dem die Werte gespeichert werden ($^\circ$ für Grad, DMX für die DMX-Kanalnotation und keine hochgestellte Zahl für Dezimalwerte).

$$pan^\circ = pan \cdot \frac{540^\circ}{65280} \quad tilt^\circ = tilt \cdot \frac{180^\circ}{65280} \quad (A.1)$$

$$pan = pan^\circ \cdot \frac{65280}{540^\circ} \quad tilt = tilt^\circ \cdot \frac{65280}{180^\circ} \quad (A.2)$$

Die resultierenden 16 bit-Werte aus Gleichung A.1 und A.2 müssen in zwei 8 bit-Werte für die jeweiligen DMX-Kanäle pan , $finepan$, $tilt$ und $finetilt$ aufgeteilt wer-

den, wie in den Gleichungen A.3 und A.4 gezeigt.

$$pan^{DMX} = (pan \& 0xFF00) \gg 8 \quad finepan^{DMX} = pan \& 0x00FF \quad (\text{A.3})$$

$$tilt^{DMX} = (tilt \& 0xFF00) \gg 8 \quad finetilt^{DMX} = tilt \& 0x00FF \quad (\text{A.4})$$

Zur einfacheren Einbindung des MHS in industrielle Umgebungen wird das ENTTEC ODE Mk2 genutzt, welches ein DMX-Ethernet-Interface darstellt [488]. Dieses erlaubt eine bidirektionale Steuerung des DMX-Bus über Ethernet unter Nutzung unterschiedlicher Protokolle. Für die folgende Entwicklung wird das ESP-Protokoll von ENTTEC verwendet.

A.3.3 Evaluierungsdaten

A.3.3.1 Daten aus dem Experiment zur Ermittlung des optimalen Fokuswertes

Abstand in m	Minimum	Optimum	Maximum
$\leq 1,0$	255	255	255
1,5	255	255	255
2,0	219	223	227
2,5	186	189,5	193
3,0	158	162,5	167
3,5	142	146,5	151
4,0	125	129	133
4,5	111	115,5	120
5,0	99	104,5	110
5,5	83	88	93
$\geq 6,0$	80	80	80

Tabelle A.8: Messwerte aus dem Experiment. Die optimalen Werte sind der Durchschnitt der Minimal- und Maximalwerte und wurden für die Bestimmung der Polynomfunktion verwendet.

A.3.3.2 Daten aus den Versuchen zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit

Index	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	σ_{LT} [mm]
1	-306,4154	-2032,1464	-972,1941	0,00188634
2	-306,4316	-2032,1124	-972,2038	0,00220966
3	-306,2175	-2032,1691	-971,9397	0,00263319
4	-306,2847	-2032,1653	-971,9680	0,00199971
5	-306,2746	-2032,1472	-971,9647	0,00221153
6	-306,2349	-2032,1175	-971,9473	0,00211342
7	-306,2486	-2032,1570	-971,9434	0,00228444
8	-306,2201	-2032,1406	-971,9422	0,00236737
μ	-306,290925	-2032,144438	-972,0129	0,002213208
σ	0,079785928	0,019298765	0,107880628	0,000214366

Tabelle A.9: Messungen der Wiederholbarkeit der Position des Projektorkopfes des MHS. Die Koordinaten liegen im Koordinatensystem des Lasertrackers vor. σ_{LT} ist die vom Lasertracker gemeldete Messunsicherheit.

A.3.3.3 Referenzpunkte und Kalibrierungsergebnisse

Idx	pan	fine-pan	tilt	fine-tilt	X [m]	Y [m]	Z [m]	e_l [mm]	e_u [mm]
1	192	202	45	84	-1,744	0,248	-0,307	5	5
2	185	246	55	235	-1,626	0,579	-0,237	3	6
3	173	29	62	0	-1,505	1,024	-0,180	3	4
4	160	209	65	190	-1,352	1,427	-0,018	3	3
5	150	226	58	10	-1,213	1,956	0,111	4	6
6	153	73	50	73	-1,330	1,924	-0,074	3	6
7	160	36	52	166	-1,448	1,562	-0,181	6	6
8	172	22	50	241	-1,612	1,101	-0,307	5	6
9	180	236	44	190	-1,730	0,769	-0,386	4	4
10	189	52	35	0	-1,870	0,383	-0,474	5	5
11	160	170	45	225	-1,545	1,622	-0,253	5	5
μ $\mu_{\text{komb.}}$								4,18 4,64	5,09 1,00
σ $\sigma_{\text{komb.}}$								1,03 0,83	1,00

Tabelle A.10: Referenzpunkte als DMX-Kanalwerte des MHS, gemessene Koordinaten sowie unterer und oberer Positionsfehler zwischen angefahrenem und berechnetem Referenzpunkt.

Der niedrigste Pan° -Winkel ist $319,52^\circ$ an Punkt 5, der höchste Pan° -Winkel ist $408,26^\circ$ an Punkt 1, was zu einer maximalen Spanne von $88,74^\circ$ zwischen diesen beiden Punkten führt. Der kleinste Neigungswinkel ist $24,71^\circ$, der größte Neigungswinkel ist $46,41^\circ$ an Punkt 4, was zu einer maximalen Spanne von $21,70^\circ$ führt.

$${}_{Ref}^{MH} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} -0,91289 & 0,40821 & 0 & -0,88606 \\ -0,40821 & -0,91289 & 0 & 0,42273 \\ 0 & 0 & 1 & 1,08992 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Aufgrund der Annahme, dass der Drehwinkel α nur zwei Werte annehmen kann $\alpha = \{0^\circ, 180^\circ\}$, setzt sich die Transformationsmatrix nur aus der z -Drehungsmatrix und dem Translationsvektor zusammen.

A.4 Anhang zu Kapitel 7

A.4.1 Zusätzliche Veranschaulichungen

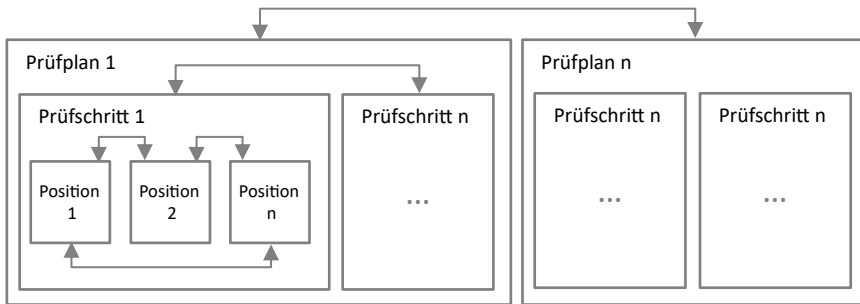


Abbildung A.12: Schematische Abbildung der Hierarchie von Prüfungen in Labelled Transitions Systems.



Abbildung A.13: Bedienoberfläche zur Interaktion mit dem Steuerungsmodell mithilfe einer Smartwatch.