

Reihe 20

Rechnerunter-
stützte Verfahren

Nr. 463

Dipl.-Math.techn. Jan Philipp Steinbach,
Braunschweig

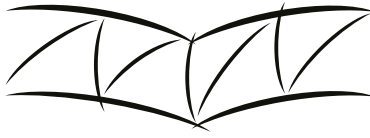
Konzept zur flexiblen Automatisierung von Instandhaltungs- prozessen kleinster Losgrößen in der Luftfahrtbranche



Professur für Automatisierungstechnik

*Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg



HELMUT SCHMIDT
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

Konzept zur flexiblen Automatisierung von Instandhaltungsprozessen kleinster Losgrößen in der Luftfahrtbranche

Der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION
vorgelegt von

Jan Philipp Steinbach
aus Iserlohn

Hamburg 2015

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay
Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2015

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 20

Rechnerunterstützte
Verfahren

Dipl.-Math.techn. Jan Philipp Steinbach,
Braunschweig

Nr. 463

Konzept zur flexiblen Automatisierung von Instandhaltungs- prozessen kleinster Losgrößen in der Luftfahrtbranche



Professur für Automatisierungstechnik

*Professur für Prozessdatenverarbeitung
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Steinbach, Jan Philipp

Konzept zur flexiblen Automatisierung von Instandhaltungsprozessen kleinster Losgrößen in der Luftfahrtbranche

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 463. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

172 Seiten, 93 Bilder, 9 Tabellen.

ISBN 978-3-18-346320-6, ISSN 0178-9473,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

Für die Dokumentation: Automatisierungstechnik – MRO – Instandhaltung – Losgröße-1 – Luftfahrtbranche – Instandhaltungsprozess – flexible Automatisierung

Kleinste Losgrößen, viele Bauteilvarianten und ein hoher Anteil manueller Tätigkeiten sind charakteristisch für die Instandhaltungsprozesse in der Luftfahrtbranche. In der vorliegenden Arbeit wird ein Gesamtkonzept zur Automatisierung derartiger Prozesse vorgestellt. Das Konzept greift den Trend in der Automatisierungstechnik nach mehr Flexibilität auf und sieht den Einsatz einer prozessangepassten Automatisierungslösung in Form eines Informations- und Kommunikationssystems auf Prozessebene vor. Ein solches ermöglicht die gezielte Unterstützung des Facharbeiters durch die systematische Wiederverwendung von Prozesswissen und die Integration eines Systems zur Fehlervermeidung. Die Anwendung des Konzeptes und seiner einzelnen Lösungskomponenten wird anhand von Teilprozessen der Instandhaltung aufgezeigt.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at

<http://dnb.ddb.de>.

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9473

ISBN 978-3-18-346320-6

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay
Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2015

Geleitwort der Herausgeber

Die Automatisierungstechnik ist ein komplexes und vielfältiges wissenschaftliches Gebiet. Am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg wird zum einen die Entwicklung neuer automatisierungstechnischer Methoden vorangetrieben, zum anderen wird die Automatisierung komplexer Produktionsprozesse bearbeitet. Die reale Umsetzung im Rahmen technischer Prozesse, insbesondere industrieller Produktionsprozesse, ist das Ziel des ingenieurwissenschaftlichen Wirkens und zugleich Gradmesser für seinen Erfolg.

Während die Automatisierung von Produktionsprozessen bereits umfangreich wissenschaftlich erforscht wurde, gibt es bisher nur wenige wissenschaftliche Arbeiten zur Automatisierung von Instandhaltungsprozessen, obwohl die Instandhaltung technischer Geräte und Anlagen einen bedeutenden Wirtschaftszweig darstellt. Diese Vernachlässigung von Seiten der automatisierungstechnischen Wissenschaft rührt u.a. daher, dass

- Instandhaltungsaufgaben meist sehr individuell sind,
- für Instandhaltungsaufgaben oft nicht auf eine EDV-gestützte Beschreibung des Gegenstands zurückgegriffen werden kann,
- die Folge instandzuhaltender Gegenstände durch den Instandhaltungsbedarf der Kunden determiniert ist und dadurch die Aufträge nicht nach gleichen Gegenständen geordnet sind, mithin die Gegenstände in „Losgröße 1“ zu bearbeiten sind.

Diese drei Besonderheiten des Instandhaltungsgeschäfts erschweren praktisch eine Automatisierung von Instandhaltungsprozessen und auch die systematische wissenschaftliche Erarbeitung von Automatisierungslösungen für die Instandhaltung.

Herr Dr. Steinbach hat in seiner hier veröffentlichten Arbeit einen methodischen Ansatz entwickelt, der trotz dieser Erschwernisse eine systematische Erschließung von Automatisierungspotential in Instandhaltungsprozessen ermöglicht. Er betrachtete dazu exemplarisch die Instandhaltung in der Luftfahrtindustrie, die gekennzeichnet ist durch besonders teure Objekte der Instandhaltung und besonders akribisch zu befolgende Instandhaltungsvorschriften.

Herr Dr. Steinbach hat sein Konzept exemplarisch bei einem Instandhaltungsunternehmen angewandt. Dabei konnten Prozessdurchführungszeiten systematisch und signifikant reduziert werden, und zwar unabhängig von der Qualifikation desjenigen, der mit diesem Verfahren arbeitet.

Die Herausgeber danken dem VDI-Verlag für die Möglichkeit einer breiten Veröffentlichung dieser Ergebnisse.

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg. In diesem Vorwort möchte ich die Gelegenheit ergreifen, mich bei allen Personen zu bedanken, die zum Gelingen meines Promotionsvorhabens beigetragen haben.

Zuallererst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay bedanken, der mir nicht nur die Mitarbeit an seiner Professur sondern auch an spannenden Forschungsprojekten ermöglicht hat. Durch seine Förderung, fachliche Forderung und Motivation hat er maßgeblich zum Gelingen meines Promotionsvorhabens beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und das damit ausgedrückte Interesse an meiner Arbeit. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Meywerk für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin möchte ich mich bei Florian Hartung und Mehmet Soylu von der Lufthansa Technik AG für die erfolgreiche Zusammenarbeit bedanken. Insbesondere Herrn Soylu gilt besonderer Dank für die unermüdliche Unterstützung und vor allem dafür, sein fundiertes Wissen und seine umfangreiche Erfahrung im Bereich der Instandhaltung von Luftfahrzeugen mit mir zu teilen.

Selbstverständlich möchte ich mich auch bei den ehemaligen Kollegen an der Professur für den fachlichen Austausch, die Diskussionen, die Kollegialität und die Zeit außerhalb der Arbeit bedanken. Weiterhin danke ich Anh Thu Do, Tobias Ernst, Arash Ramezani und Tobias Wolfanger für das Lektorat meiner Arbeit, vielzählige Diskussionen und die wertvolle Kritik.

Besonderen Dank möchte ich meiner Freundin Shima Ramezani aussprechen, die nicht zuletzt wegen ihrer Rücksichtnahme, ihrem Verständnis und ihrer Motivation sondern auch durch zahlreiche Diskussionen und Korrekturen maßgeblich zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen hat.

Mein letzter Dank geht an meine Familie und meine Freunde, die mich während der Erstellung dieser Arbeit stets unterstützten und mir den notwendigen Rückhalt gaben.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	VII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung	2
1.3. Aufbau der Arbeit	2
2. Grundlagen zur Automatisierung von Prozessen in der Instandhaltung	4
2.1. Informationstechnische Systeme im klassischen Produktionsumfeld	5
2.2. Charakterisierung von Produktionsprozessen	7
2.3. Modellierung von Prozessen	15
2.4. Stand der Technik zur Instandhaltung von Luftfahrzeugen	20
2.5. Analyse des Fallbeispiels eines MRO-Dienstleisters	27
2.6. Ausgangssituation und Anforderungen der MRO-Branche	41
2.7. Stand der Forschung zur Automatisierung von Prozessen im MRO	46
2.8. Einordnung der Arbeit	52
2.9. Schlussfolgerungen und Anforderungen	56
3. Automatisierung von Instandhaltungsprozessen	58
3.1. Analyse des Automatisierungspotentials von Instandhaltungsprozessen	58
3.2. Konzept zur Automatisierung eines Instandhaltungsprozesses	64
3.3. Zusammenfassung	66
4. Prozessoptimierung durch Wiederverwendung	68
4.1. Grundlagen der Komplexitätsbeherrschung	68
4.2. Ansätze zur Prozessoptimierung durch Wiederverwendung	73
4.3. Konzept zur Rüstzeitminimierung bei kleinen Losgrößen	76
4.4. Konzept zur Optimierung der Roboterprogrammierung	82
4.5. Zusammenfassung	88
5. Entwurf eines Systems zur Verifikation der Bauteilpositionierung	90
5.1. Rahmenbedingungen und Anforderungen	90
5.2. Stand der Technik der Objekterkennung	91
5.3. Systementwurf	98
5.4. Zusammenfassung	105
6. Informatisierung des Instandhaltungsprozesses	107
6.1. Grundlagen einer Informatisierung	107
6.2. Informations- und Kommunikationssysteme	109
6.3. Entwurf eines IuK-Systems	113

6.4. Zusammenfassung	116
7. Automatisierung im Fallbeispiel	118
7.1. Automatisierung des Strahlprozesses in der Instandhaltung	118
7.2. Experimentelle Validierung	127
7.3. Übertragung des Ansatzes auf einen zerspanenden Instandhaltungsprozess	136
7.4. Zusammenfassung	139
8. Zusammenfassung und Ausblick	141
A. Bauteilspezifikation der Validierung	143
Literaturverzeichnis	144
Referenzierte Normen und Richtlinien	158
Referenzierte Patente	160
Referenzierte Internetquellen und Software	161
Veröffentlichungen des Verfassers	163

Verzeichnis der Abkürzungen

ARIS	Architekturintegrierte Informationssysteme
AW	Absicherungswerkzeuge
a. u.	Arbitrary units
CCD	Charge coupled device
CFRP	Carbon-fiber-reinforced plastic
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CIM	Computer-Integrated-Manufacturing
CMM	Component Maintenance Manual
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
CNC	Computerized Numerical Control
COSL	Component Operation Storage Limits
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
CPS	Cyber-physisches System (siehe CPPS)
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EASA	European Aviation Safety Agency
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
eEPK	Erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette
FFS	Flexibles Fertigungssystem
FIFO	First in first out
FPB	Formalisierte Prozessbeschreibung
HHR	Human Hybrid Robot
HMI	Human Machine Interface
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
ILA	Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart
IPK	Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik
ISA	Instrumentations, Systems, and Automation Society
IT	Informationstechnologie
IT-System	Informationstechnisches System
IuK-System	Informatons- und Kommunikationssystem
JAA	Joint Aviation Authorities
LHT	Lufthansa Technik AG
LuftBO	Betriebsordnung für Luftfahrtgerät
LuftGerPV	Verordnung zur Prüfung von Luftfahrtgerät
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
MES	Machine Execution System
MRB	Maintenance Review Board
MRO	Maintenance Repair and Overhaul
MS	Maintenance Schedule

MSG	Maintenance Steering Group
MSG-3	Maintenance Steering Group 3 Analyse
NC-Maschine	Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine
NDT	Non-Destructive Testing
OCR	Optical character recognition
OEM	Original Equipment Manufacturer
OTED	One Touch Exchange of Die
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssystem
SMED	Single Minute Exchange of Die
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SVM	Sequential vector maschine
TPS	Toyota Produktions-System

1. Einleitung

Dieses einleitende Kapitel gibt einen Überblick über die Problemstellung und Zielsetzung dieser Arbeit. Es beginnt mit einer Zusammenfassung der Ausgangssituation in der Flugzeug-Instandhaltung. Aufbauend darauf werden die Ziele formuliert. Abschließend erfolgt eine Erläuterung zum Aufbau dieser Dissertation.

In der Luftfahrtbranche spricht man im Zusammenhang mit der Instandhaltung von Luftfahrzeugen häufig auch vom MRO. Der Begriff *MRO* setzt sich aus den angelsächsischen Begriffen Maintenance (Wartung), Repair (Reparatur) and Overhaul (Überholung) zusammen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll die Flugzeug-Instandhaltung daher ebenfalls kurz mit MRO bezeichnet werden.

1.1. Motivation und Problemstellung

Die zivile Luftfahrtindustrie „ist ein dynamischer Sektor mit hohen Zuwachsraten und einem leistungsfähigen, industriellen Kern in Deutschland“ [Bun15][®]. Sie umfasst sowohl die Entwicklung und Produktion von Flugzeugen und Flugzeugkomponenten als auch deren Instandhaltung. Studien zur Marktentwicklung kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass sich die weltweite Flottengröße ziviler Passagier- und Frachtflugzeuge von etwa 20.000 im Jahr 2013 in den kommenden 20 Jahren verdoppeln wird ([Ali14][®], [Boe14][®], [Cle15][®], [AIR15][®], [Del15][®]). Diese Entwicklung eröffnet der MRO-Branche, deren Marktvolumen für das Jahr 2030 auf 87 Milliarden Euro geschätzt wird, bedeutende Möglichkeiten [Klo13]. Gleichzeitig stellt diese Entwicklung für die klassischen Unternehmen des MRO eine immense Herausforderung dar. Sie stehen unter enormen Handlungsdruck, ihre Konkurrenzfähigkeit zu erhalten. Bereits seit einigen Jahren sehen sie sich mit steigendem Wettbewerb und verschärftem Kostendruck durch die Flugzeughersteller selbst sowie OEM-Anbieter von Flugzeugkomponenten konfrontiert ([Aer09][®], [Ali14][®]).

Ihre Kernaufgabe der Instandhaltung umfasst alle Maßnahmen, um den funktionsfähigen Zustand eines Luftfahrzeugs zu erhalten oder wiederherzustellen. Zu ihnen gehören die Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung des gesamten Flugzeugs, seiner einzelnen Konstruktionshauptgruppen, wie dem Fahrwerk oder dem Triebwerk, und deren einzelnen Komponenten. Aufgrund der langen Entwicklungs- und Produktlebenszyklen von Flugzeugen muss für die Instandhaltung ein breites Spektrum an Werkstätten und Wartungstechnologien angeboten werden. Deren Entwicklung und Betrieb ist für die Unternehmen des MRO mit hohen Kosten verbunden. Sie werden durch strikte luftfahrtrechtliche Regularien in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Dokumentation der Instandhaltung weiter erhöht [Men13]. Mittlerweile haben mitteleuropäische MRO-Unternehmen ihr Geschäft zur unikaten, mit Modifikationen gepaarten Instandhaltung verändert. Sie kombinieren die technische Instandhaltung von Flugzeugen mit individuellem Bauzustand mit der Durchführung von Modifikationen am Flugzeug selbst, wie z. B. dem Einbau von Zusatztanks [HO13].

Der hohe Bedarf der MRO-Unternehmen nach entlastender Produktivitätssteigerung macht die Ausnutzung von Automatisierungspotenzialen im Instandhaltungsprozess unabdingbar. Kleinste Losgrößen und viele Bauteilvarianten sind charakteristisch für die Prozesse im MRO. Die Automatisierungstechnik stößt hier jedoch an ihre Grenzen. Eine ökonomisch sinnvolle Automatisierung, beispielsweise unter Einsatz eines Robotersystems, verlangt im Allgemeinen eine klare Bauteilkenntnis, wiederholgenaue Bauteile und eine lagegerechte Bauteilübergabe. Diese Anforderungen werden im Instandhaltungsprozess nicht erfüllt, bei dem der Anteil an manuellen Tätigkeiten überwiegt. Der Mensch wird in diesem Zusammenhang auf der einen Seite als kostspielig und auf der anderen Seite als System-schwäche für das Unternehmen aufgefasst. Letztere Einschätzung basiert auf der Tatsache, dass der Mensch zufällige, nicht berechenbare Fehler macht. Dies sollte jedoch nicht seine Leistung in Frage stellen. Vielmehr wird sowohl in einer fortschrittlichen Gesellschaft als auch Unternehmung die Frage gestellt, inwiefern der Mensch unterstützt werden kann, um seine Leistung optimal abzurufen. Die Unternehmen müssen zukünftig „eine neue Balance zwischen den sich verstärkenden Flexibilitätserfordernissen auf der einen und den sich gleichzeitig verstärkenden produktions- und arbeitsökonomischen Erfordernissen auf der anderen Seite suchen und herstellen. In einem Hochlohnland wie Deutschland gilt dies sogar in einer besonderen Weise: Die im internationalen Vergleich zweifellos überdurchschnittlichen Arbeitskosten zwingen die Unternehmen, nicht nur auf die Karte der Flexibilität und Kreativität, sondern gleichermaßen auf die Karte der Standardisierung und Routinebildung zu setzen, um die auch dort schlummernden Leistungs- und Produktivitätsreserven zu mobilisieren“ [Spr05, S. 11].

1.2. Zielsetzung

In dieser Arbeit wird ein Gesamtkonzept zur Automatisierung von Instandhaltungsprozessen mit kleinen Losgrößen vorgestellt. Dessen Grundlage soll eine fundierte Beschreibung des Instandhaltungsprozesses bilden. Das Konzept soll Methodiken beinhalten mit dem Ziel, die Instandhaltungsprozesse so intelligent zu gestalten, dass diese zu einer Effizienzsteigerung für das MRO-Unternehmen beitragen. Der beobachtbare Trend zur Nachfrage in der Automatisierungstechnik nach mehr Flexibilität soll im erarbeiteten Konzept aufgegriffen und Lösungskonzepte sollen entwickelt werden, die den unterschiedlichen Ansprüchen im Instandhaltungsprozess genügen ([TKR08], [WPG14]). Eine Vollautomatisierung wird daher nicht verfolgt. Vielmehr eröffnet eine Automation neue Möglichkeiten der Arbeitsgestaltung. Eine durchgängige, digital unterstützte Prozessdurchführung soll vor allem die Interaktionen des Facharbeiters mit den prozessbeteiligten Ressourcen homogenisieren. Des Weiteren soll auf diese Weise dessen Unterstützung durch die Bereitstellung von Prozess- und Erfahrungswissen für die zustandsabhängige Bearbeitung kleinster Losgrößen ermöglicht werden.

1.3. Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.1 skizziert. Im nachfolgenden Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen zum Verständnis einer Prozessautomatisierung im MRO vorgestellt. Es wird neben den Ansätzen zur Prozessmodellierung auch auf den Stand der

Technik und den Stand der Forschung eingegangen. Abschließend erfolgt die Einordnung der Arbeit.

Das Kapitel 3 erläutert die Architektur des Gesamtkonzeptes für eine Automatisierung des Instandhaltungsprozesses. Aufbauend auf Automatisierungspotenzialen werden die wesentlichen Aspekte beim Entwurf eines Automatisierungskonzeptes herausgearbeitet.

Die primären Gesichtspunkte zur Optimierung eines Instandhaltungsprozesses werden in den nächsten Kapiteln näher beschrieben. Das Kapitel 4 geht auf den Aspekt der Wiederverwendung ein, das Kapitel 5 auf den Entwurf eines Systems zur Verifikation der Bauteilpositionierung in einem konkreten Instandhaltungsprozess. In Kapitel 6 wird der Aspekt der Informatisierung aufgegriffen.

Das siebte Kapitel beschreibt die Durchführung einer experimentellen Validierung des Gesamtkonzeptes anhand zweier praktischer Fallbeispiele im MRO.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit werden zum Abschluss in Kapitel 8 zusammengefasst, und es erfolgt ein Ausblick auf mögliche Themen und Anwendungen weiterer Forschungsarbeiten.

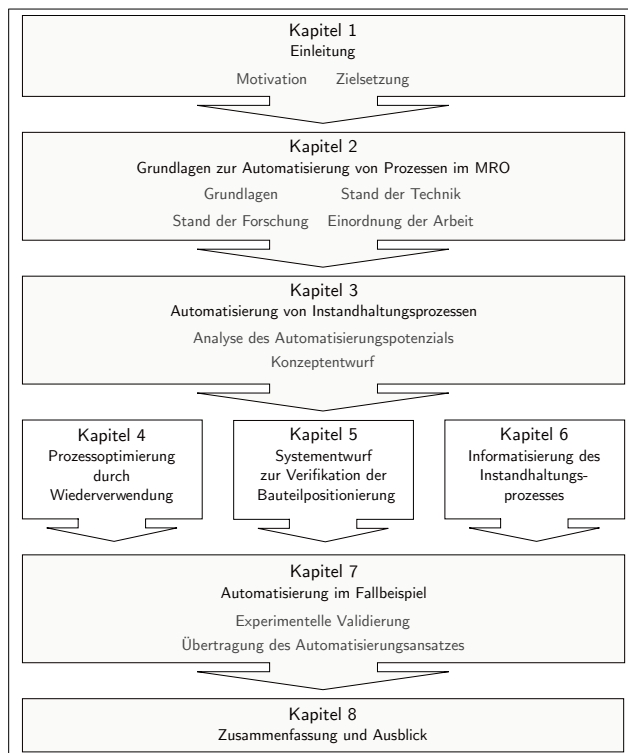


Abbildung 1.1.: Struktureller Aufbau der Arbeit nach Kapiteln

2. Grundlagen zur Automatisierung von Prozessen in der Instandhaltung

In diesem Kapitel werden zum einen die Grundlagen und der Stand der Technik zur Wartung, Reparatur und Überholung von Luftfahrzeugen erörtert. Zum anderen werden die Anforderungen und Defizite der dafür erforderlichen Produktionsprozesse identifiziert. Das Kapitel gliedert sich nach der in Abbildung 2.1 dargestellten Struktur.

In den ersten vier Abschnitten werden zunächst die erforderlichen Grundlagen zur Automatisierungstechnik dargestellt. Dazu zählen die IT-Systeme im klassischen Produktionsumfeld, die Charakterisierung von Produktionsprozessen, die Modellierung von Prozessen und der Stand der Technik. Diese Grundlagen werden ergänzt durch die Erörterung der Rahmenbedingungen, des Marktes und der Vorgehensweise zur Instandhaltung von Luftfahrzeugen.

Auf Basis dieser Grundlagen erfolgt in den folgenden drei Unterkapiteln die Analyse von Strukturen, Prozessen und Defiziten im MRO. Dazu werden anhand der Analyse einer MRO-Organisation einerseits die erarbeiteten Grundlagen verifiziert und andererseits Defizite der Produktionsprozesse identifiziert. Eine Auswertung der Ergebnisse zweier wissenschaftlicher Studien, in Abschnitt 2.6, erlaubt schließlich die Verallgemeinerung der gewonnenen Erkenntnisse. Ergänzt wird die Analyse durch den Stand der Forschung zur Automatisierung im MRO.

Abschließend wird in den verbleibenden beiden Abschnitten dieses Kapitels die Einordnung der Arbeit sowie die Ableitung von Anforderungen zur Automatisierung von MRO-Prozessen vorgenommen.

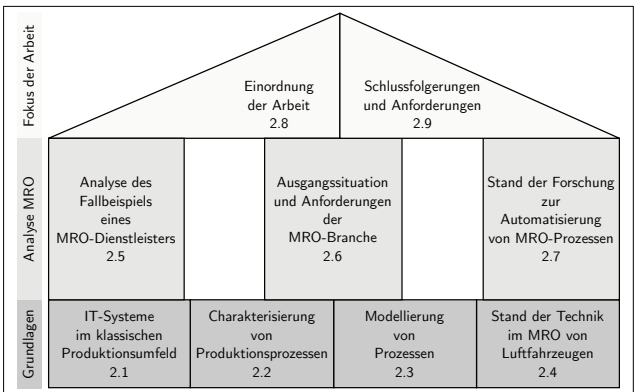


Abbildung 2.1.: Struktur dieses Kapitels

2.1. Informationstechnische Systeme im klassischen Produktionsumfeld

Mit dem Computer-Integrated-Manufacturing (CIM) kam bereits in den 1980er Jahren das Bestreben der Industrie zur Geltung, die Produktion durch Integration von Informationstechnologie zu automatisieren. Es begann eine Phase der Hochautomatisierung mit dem Bestreben, die bis heute primären Ziele der Automatisierung

- Erhöhung der Produktivität,
- Verkürzung der Fertigungszeiten,
- Erleichterung der menschlichen Arbeit,
- Senkung der Kosten und
- Erhöhung der Qualität

bestmöglich zu erreichen. Die rechnerintegrierte Produktion schien dafür und für alle Probleme der produzierenden Unternehmen die ideale Lösung [HLG15]. Die Ansätze des CIM scheiterten jedoch „maßgeblich aufgrund der mangelnden Flexibilität im Verhältnis zur Produktion“ [Lou09, S. 2]¹ und „die erhofften Produktionssteigerungen blieben [...] oft aus oder wurden zu teuer erkaufte“ [HLG15, S. 6].

Mittlerweile wurde eine Vielzahl von IT-Systemen für das klassische Produktionsumfeld entwickelt. Diese lassen sich anschaulich gut anhand des in der DIN ISO 62264 [DIN14b][#] definierten Schichtenmodells klassifizieren, die auf dem von der „Instrumentations, Systems, and Automation Society“ (ISA) definierten S95 Standard basiert.² In der Literatur ist zur Veranschaulichung der Bereiche der industriellen Automatisierung häufig die klassische hierarchisch gestaltete Automatisierungspyramide, nach Abbildung 2.2, zu finden ([Noa95], [Haa13], [Mah14], [HLG15]).

Die Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide setzen sich aus der *Unternehmensleitebene*, der *Betriebsleitebene*, den *Steuerungsebenen* und der *Prozessebene* zusammen. Die Steuerungsebenen lassen sich weiter in die Feldebene, die Steuerungsebene und die Prozessleitebene unterteilen. Auf den einzelnen Ebenen laufen unterschiedliche Daten zur Erfüllung der jeweiligen Aufgaben zusammen [HLG15]:

- Auf der *Unternehmensleitebene* laufen alle Prozesse ab, die dem Unternehmen die Existenz am Markt sichern. Dazu zählen Prozesse wie die Marktanalyse, strategische Personal-, Investitions- und Produktionsplanung oder die Bestellabwicklung. Häufig werden zu diesem Zweck spezielle ERP-Software-Systeme, z. B. der Hersteller SAP [SAP][®] oder Microsoft [Micb][®], eingesetzt.
- Auf der *Betriebsleitebene* laufen alle Prozesse ab, die den täglichen Betrieb des Unternehmens absichern. Auf dieser Ebene finden feingranulare Planungen statt, wie die Produktionsplanung, die Kostenanalyse oder das Material- und Qualitätsmanagement. Dazu werden häufig Softwarelösungen in Form von Produktionsleitsystemen (engl.: Manufacturing Execution System (MES)) eingesetzt [Lou09].

¹[Lou09] verweist auf [Kat01, S. 36].

²Der S95 Standard basiert wiederum auf dem Purdue Reference Model von Williams [Wil91], das ein Unternehmen hierarchisch in sechs Ebenen unterteilt.

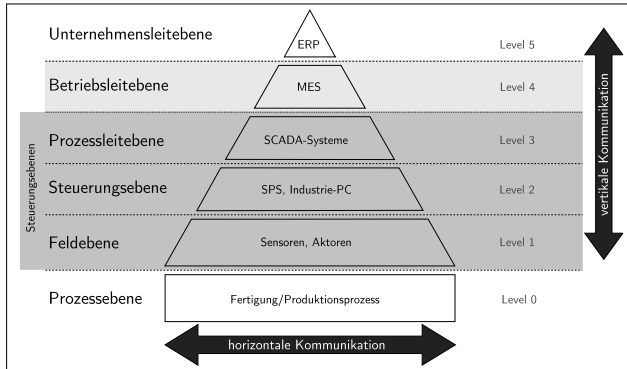


Abbildung 2.2.: Hierarchisch gestaltete Automatisierungspyramide in Anlehnung an ([DIN14b])[#], [Krä02]

- Auf der *Prozesselebene* erfolgt die kurzfristige Produktionsplanung. Zu diesem Zweck laufen hier die Daten der oberen Schichten und die Messwerte der unteren Schichten zusammen. Es erfolgt beispielsweise die Einsatzplanung von Maschinen und Anlagen oder des Personals. Ebenso können bei Bedarf von dieser Ebene aus auch Kommandos abgesetzt werden, um die angeschlossenen Maschinen zu steuern und auf außergewöhnliche Situationen zu reagieren [Bau14]. Dazu werden sogenannte Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systeme eingesetzt.
- Auf der *Steuerungsebene* erfolgt die „prozeßnahe höhere Informationsverarbeitung im Sinne der halbautomatischen oder automatischen Steuerung/Regelung von mehreren oder umfangreichen Prozessen auf Basis fester Zielwerte unter Mitwirkung des Menschen“ [Krä02, S. 40]. Je nach Größe der Anlage kann sie weiter – von der Anlagen- über die Gruppen- bis hin zur Einzelebene – untergliedert werden [HLG15]. Zur Regelung, Steuerung und Überwachung der Produktionsprozesse und -maschinen kommen häufig speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) oder Industrie-PCs zum Einsatz.
- Die *Feldebene* bildet die technische Schnittstelle zwischen dem Produktionsprozess und den übergeordneten Steuerungen. Dazu werden Daten erfasst, aufbereitet und die Reaktionen entsprechend der ausgewerteten Informationen ausgeführt. Auf dieser Ebene befinden sich sowohl die Aktorik und Sensorik als auch die Anzeigegeräte.
- Auf der *Prozessebene* befinden sich „meist die mechanischen Grundgeräte zur Erfüllung der verfahrens-/fertigungs- oder materialflusstechnischen Prozesse. Auf dieser Ebene kann prinzipiell rein manuell gesteuert werden“ [Krä02, S. 40].

Eine Kommunikation kann sowohl innerhalb der Hierarchieebenen horizontal, als auch vertikal zwischen ihnen erfolgen. Ersteres ist, aufgrund vorhandener einheitlicher Protokolle und Bussysteme, unproblematisch. Anders verhält sich in diesem Zusammenhang die vertikale Kommunikation. Ursache ist der Mangel an Schnittstellen zwischen den einzelnen Ebenen des Schichtenmodells. Die „mit den Ebenen verbundene Betrachtungsweise

und die damit verbundene Steuerung der Ebenen erfolgt daher heute in aller Regel noch isoliert“ [Bau14, S. 544]. Gerade in den vergangenen Jahren ist jedoch eine Vermischung dieser zu beobachten. Daraus resultierend kann häufig keine eindeutige Zuordnung von Automatisierungskomponenten zu einer bestimmten Hierarchieebene vorgenommen werden, da „mehr und mehr ‘Mischgeräte’ eingesetzt [werden], die Funktionen verschiedener Ebenen in sich vereinen“ [Wei13, S. 8]. Dieses Ziel wird auch durch die, seitens der Industrie als vierte industrielle Revolution proklamierte, Idee mit der Bezeichnung *Industrie 4.0* verfolgt ([KWH13], [Bau14]). So gilt es, die Informationsprozesse immer weiter, und insbesondere in vertikaler Richtung, zu verknüpfen, sodass „mit Hilfe von Verfahren der Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration, Selbstdiagnose, d. h. dem Einsatz lernender Systeme die Produktion intelligenter wird“ [HLG15, S. 7]. Die technologischen Grundlagen sollen die cyber-physischen Systeme (CPS) bilden, in denen verschiedene Ebenen der Automatisierungspyramide direkt an die Datenströme der Feldebene gekoppelt werden können. Sie bilden das *Internet der Dinge* [Bau14]. Die cyber-physischen Systeme, zu denen alle „Objekte, Geräte, Gebäude, Verkehrsmittel, aber auch Produktionsanlagen, Logistikkomponenten etc. [gezählt werden], die eingebettete Systeme enthalten, die kommunikationsfähig gemacht werden“ [Bau14, S. 16], sollen die nächste Stufe einer Dezentralität der Produktion ermöglichen.

2.2. Charakterisierung von Produktionsprozessen

In der industriellen Umgebung findet sich mittlerweile eine Vielzahl diverser Erscheinungsformen von Produktionssystemen. Zu ihrer umfassenden qualitativen Charakterisierung, mit dem Ziel einer Ordnung, wird in der Literatur häufig die wissenschaftliche Methode der Typologisierung angewendet ([Sch80], [Drä89], [Kau96], [DS10], [Lou09]). Die auf diese Weise klassifizierbaren Produktionstypen können beispielsweise eine Basis für die Formulierung von Entscheidungsmodellen darstellen oder eine Grundlage für die fundierte Anwendung von Konzepten zur spezifischen Auswahl von Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen (PPS) bilden.

Im Folgenden soll unter der *Produktion* ein Transformationsprozess [Sch97] bzw. ein Wertschöpfungsprozess [GT11b] verstanden werden. Durch einen solchen werden materielle und nichtmaterielle Einsatzgüter und Betriebsmittel in Ausbringungen, Erzeugnisse oder Produkte überführt, die nachfolgend auf materielle Sachgüter beschränkt werden sollen. Mit dem Begriff der *Fertigung*, beziehungsweise der *Herstellung*, wird hingegen die unmittelbare materielle Veränderung der Einsatzgüter bezeichnet [Sch97]. Der Produktionsprozess in der industriellen Umgebung besteht in der Regel aus einzelnen Abschnitten. Die kleinste organisatorische Einheit, in der ein einzelner Abschnitt ausgeführt wird, bezeichnet man als *Arbeitssystem*. Ein solches wird durch das Zusammenwirken von Arbeitskräften und Betriebsmitteln gebildet [Gün07].

Die Entwicklung einer Typologie zur Unterscheidung von Produktionssystemen folgt häufig dem grundlegenden Konzept der Produktion. Sie orientiert sich an den einsatzbezogenen (Input), den ausbringungsbezogenen (Output) und den prozessbezogenen Kriterien (Throughput) der Systeme [DS10]. Zu den einsatzbezogenen lassen sich Merkmale wie der Anteil der Einsatzgüterarten oder die Konstanz der Güterqualität zählen. Merkmale zur Differenzierung von Produktionssystemen hinsichtlich der prozessbezogenen Kriterien sind beispielsweise die organisatorische Anordnung der Arbeitssysteme oder die Struktur

der Produktionsprozesse. Ausbringungsbezogene Kriterien bilden die Produkteigenschaften oder die Charakteristiken eines Produktionsprogramms, das definiert welche Leistungen in einer Periode zu produzieren sind [Cam11]. Nachfolgend sollen die für den Kontext dieser Arbeit bedeutenden Kriterien zur Charakterisierung von Produktionsprozessen vorgestellt werden. Ziel ist die Differenzierung und Einordnung der Produktionssysteme im MRO anhand ihrer signifikanten Merkmale.

2.2.1. Repetitionstypen der Fertigung

Repetitionstypen der Fertigung lassen sich hinsichtlich der Häufigkeit unterscheiden, mit der eine spezielle Produktart in einem gegebenen Planungszeitraum produziert wird. Dabei wird meist zwischen der Einzel- und der Mehrfachproduktion differenziert.

Bei der *Einzelproduktion* werden individuelle Produkte, meist auf Basis von speziellen Kundenaufträgen, in Form von Einzelstücken produziert. Derartige Produktionsformen sind durch einen hohen Grad an Flexibilität gekennzeichnet. Des Weiteren sind der Einzelfertigung Merkmalsausprägungen wie die Produktion von komplizierten Erzeugnissen mit geringer konstruktiver Ähnlichkeit und von Einmalserzeugnissen, die Produktion in vielen Strukturstufen sowie ein geringer Wiederholungsgrad der Erzeugnisse zuzuschreiben [Kau96]. Von besonderer Bedeutung für den weiteren Verlauf dieser Arbeit ist, dass die Einzelfertigung nicht als Einmaligkeit der Produktion eines Erzeugnisses zu verstehen sein muss. Vielmehr kann die Produktion auch zu einem späteren Zeitpunkt einmalig oder mehrmalig wiederholt werden ([GO72], [Neb11]).

Die *Mehrfachfertigung* lässt sich in die Serien- und Massenproduktion unterteilen. Erstere kennzeichnet sich dadurch, dass eine begrenzte aber größere Anzahl einer Produktart ohne Unterbrechung produziert wird. Die Menge einer Produktart, die „in einer Produktionsstufe als geschlossener Posten (Los) ohne Unterbrechung durch die Produktion anderer Produkte oder Baugruppen gefertigt wird“ [WMR10, S. 1970], bezeichnet man als sogenannte *Losgröße*. Die gesamte Summe der produzierten Erzeugnisse einer Produktart wird hingegen als *Stückzahl* bezeichnet [DS10]. Typische Beispiele für Serienproduktionen findet man in der Automobilindustrie [Bec06].

Erfolgt die Produktion einer Produktart über einen längeren Zeitraum in großen Mengen, so geht die Serienproduktion in die Massenproduktion über. Sie bietet häufig ideale Voraussetzungen für eine effiziente Mechanisierung und Automatisierung der Fertigungsprozesse. Produktionsprozesse, die ihr zuzuordnen sind, sind häufig durch hohe Verrichtungsspezialisierung gekennzeichnet. Eine solche ist meist auch mit großer Inflexibilität der Prozesse hinsichtlich Änderungen der Erzeugniseigenschaften verbunden.

2.2.2. Organisationstypen der Fertigung

Zur Typologisierung von Produktionsprozessen anhand der Organisation der Fertigung muss die Anordnung ihrer verwendeten Betriebsmittel unterschieden werden. Sie erfolgt basierend auf dem Repetitionstyp eines Produktionssegments. Eine übersichtliche Charakterisierung liefert in diesem Zusammenhang [GT11b]. Darin wird die Anordnung der Organisationstypen hinsichtlich des Funktions- und des Objektprinzips gemäß Abbildung 2.3 differenziert.

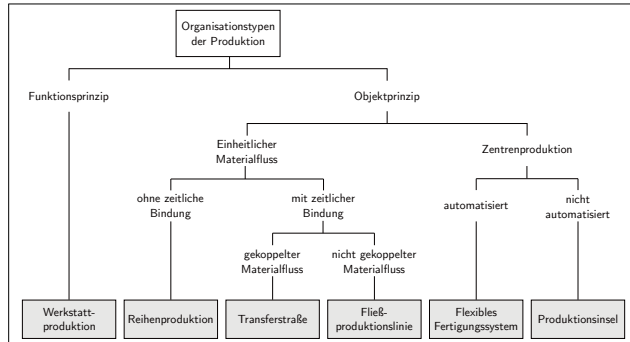


Abbildung 2.3.: Organisationstypen der Fertigung nach [GT11b]

Organisation nach dem Funktionsprinzip Bei Produktionsprozessen, die entsprechend des Funktionsprinzips angeordnet sind, werden Arbeitssysteme, die gleichartige Funktionen durchführen können, räumlich in einer Werkstatt zusammengefasst (z. B. Bohrmaschinen, Fräsmaschinen, Drehbänke). Diese Form der, in Abbildung 2.4 (a) skizzierten, Anordnung hat zur Folge, dass ein Fertigungsauftrag mehrere Werkstätten in einer technisch deterministischen Reihenfolge zu durchlaufen hat. Der Materialfluss ist im Allgemeinen stark vernetzt. Dabei kann es beispielsweise auch vorkommen, dass ein Auftrag mehrfach dieselbe Werkstatt durchlaufen muss oder einige nicht. Typische Beispiele für Prozesse, die gemäß dieser sogenannten *Werkstattfertigung* organisiert sind, sind die Teilefertigung im Maschinenbau oder die diskontinuierliche Produktion in Rührkesselreaktoren der chemischen Industrie [DS10]. Prozesse nach dem Prinzip der Werkstattfertigung sind durch ein hohes Maß an Transport-, Warte- und Handhabungsvorgängen gekennzeichnet. Solche Transport- und Wartevorgänge können wiederum zu Zwischenlagerbeständen, gleichzeitig aber auch zu Maschinenleerständen führen. Die Vorteile der Werkstattfertigung, aufgrund des nicht starr vorgegebenen Fertigungsablaufs, kommen insbesondere in der Einzel- und Kleinserienfertigung zum Tragen.

Organisation nach dem Objektprinzip Bei Produktionsprozessen, die entsprechend des Objektprinzips angeordnet sind, werden Arbeitssysteme gemäß der Arbeitspläne der zu bearbeitenden Erzeugnisse angeordnet. Hierbei unterscheidet [Gün07] zwischen Produktionsprozessen mit einheitlichem Materialfluss und der Zentrenproduktion.

- Bei Prozessen mit *einheitlichem Materialfluss* werden die Arbeitssysteme entsprechend ihrer Position in den Arbeitsplänen der zu produzierenden Erzeugnisse positioniert. Die Vorteile einer hohen Produktivität und eines transparenten Materialflusses müssen jedoch durch Nachteile im Hinblick hoher Anlageninvestitionen und geringer Flexibilität bei der Produktvielfalt erkauft werden [DS10]. Je nach zeitlicher Bindung der Produktion kann zwischen
 - der *Reihenproduktion* (ohne zeitliche Bindung),
 - der *Fließproduktionslinie* (zeitliche Bindung, nicht gekoppelter Materialfluss) und

- der *Transferstraße* (zeitliche Bindung, gekoppelter Materialfluss) differenziert werden.
- Die Organisationsform der *Zentrenproduktion* beabsichtigt, die Vorteile der flexiblen Werkstattfertigung mit denen der Produktionsprozesse mit einheitlichem Materialfluss zu kombinieren. Die in der Industrie vorkommenden Varianten der Zentrenproduktion lassen sich anhand ihres Automatisierungsgrads unterscheiden.
 - Ein *Flexibles Fertigungssystem* (FFS) kennzeichnet sich durch eine weitgehend automatisierte Produktion. Hierzu werden Systeme zusammengefasst, die Produkte mit ähnlichen Fertigungsprozessen bearbeiten [Sch97]. Oft können derartige Systeme, wie z. B. numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, schnell durch die Verwendung von Werkzeugwechselsystemen umgerüstet werden. Häufig werden sie auch durch automatische Materialflusssysteme miteinander verbunden. Flexible Fertigungssysteme, die aus lediglich einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine (NC-Maschine) bestehen, bezeichnet man auch als *Flexible Fertigungszelle* [Sch97].
 - Teilautonome Arbeitsgruppen, in Form nicht vollständig automatisierter Produktionszentren, werden als *Produktionsinsel* bezeichnet. Bei Verzicht auf die Integration disponierender und kontrollierender Aufgaben spricht man auch von einer *Gruppenfertigung* [GT11b]. Die Produktionsinseln werden als wesentlicher Bestandteil schlanker Produktionsstrukturen angesehen [DS10].

2.2.3. Ablauftypen der Fertigung

Eine weitere Möglichkeit zur Charakterisierung von Produktionssystemen bietet die Unterscheidung bezüglich des Ablauftyps der Fertigung. „Die Ablauftypen charakterisieren den (innerprozessualen) Ablauf der Fertigungsprozesse“ [Sch97, S. 14] und können grob in kontinuierliche und diskontinuierliche Prozesse unterschieden werden.

Kontinuierliche Prozesse Prozesse, die kontinuierlich ablaufen, sind sowohl bei Stück- als auch bei Fließgütern zu finden und hauptsächlich in der chemischen Industrie vorzufinden. Bei der natürlichen Fließproduktion werden beispielsweise die produzierten Fließgüter mittels entsprechender Rohrleitungssysteme kontinuierlich weitergeleitet. Ein Spezialfall dieser ist die sogenannte *Batchproduktion* (oder auch Chargenproduktion). Dabei wird einem Arbeitssystem eine begrenzte Wertstoffmenge als Ganzes zugeführt und nach Abschluss des Produktionsprozesses als Ganzes entnommen [GT11b].

Diskontinuierliche Prozesse Von besonderer Bedeutung für den weiteren Verlauf dieser Arbeit sind die diskontinuierlichen oder zeitdiskreten Prozesse, die in der verarbeitenden Industrie dominieren. Wichtig an dieser Stelle ist die Unterscheidung zweier Ablauftypen – der *Jobshop-Fertigung* und der *Flowshop-Fertigung* – die folgend nach [Sch97] definiert und in Abbildung 2.4 visualisiert werden.

- Die *Jobshop-Fertigung* ist dadurch charakterisiert, dass die Reihenfolge der zu durchlaufenden Arbeitsstationen nicht notwendiger Weise identisch ist, was auch für gleiche Erzeugnisse Gültigkeit haben kann. Häufig kommt es bei der Jobshop-Fertigung

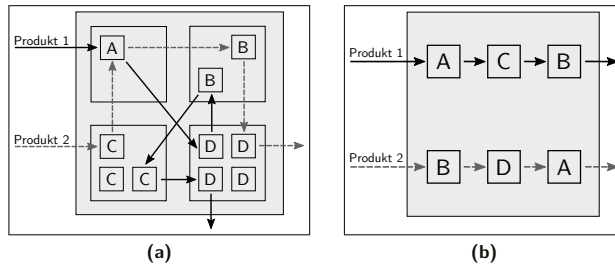


Abbildung 2.4.: Diskontinuierliche Fertigungsprozesse: (a) Jobshop-Fertigung in der Organisationsform der Werkstattfertigung; (b) Flowshop-Fertigung

zu Wartezeiten vor Arbeitsstationen (auch gemeinsam mit anderen Arbeitsaufträgen), für die häufig Pufferlager in die Produktionsumgebung integriert werden. Da die Reihenfolge dieses Ablauftyps höchst variabel sein kann, muss die Bearbeitung wartender Aufträge nicht zwangsläufig nach dem first in first out Prinzip (FIFO) erfolgen. Oft wird die Bearbeitung auch gemäß anderer Kriterien, wie z. B. Auslieferungsprioritäten, Materialverfügbarkeit oder Personalverfügbarkeit, priorisiert. Die Jobshop-Fertigung ist folglich durch einen hohen Handlingaufwand, unstrukturierte Arbeitsabläufe, qualifizierte Humanressourcen und eine Vielzahl an Transportwegen gekennzeichnet, bietet aber auch eine hohe Flexibilität. Die Arbeitsstationen für die Jobshop-Fertigung sind in der Regel nach dem Funktionsprinzip angeordnet. Eine Anordnung kann jedoch auch in Form von Gruppenfertigungen oder Mischformen von Anordnungen erfolgen [GT11b].

- Die *Flowshop-Fertigung* kennzeichnet sich dadurch, dass alle Fertigungsaufträge die Arbeitsstationen in derselben Reihenfolge durchlaufen. Die Stationen selbst können dabei sowohl gemäß dem Funktionsprinzip, als auch dem Objektprinzip angeordnet werden. Auch bei der Flowshop-Fertigung kann auf die Integration von Pufferlagern zurückgegriffen werden, die eine Änderung der Auftragsreihenfolge erlauben. Flowshop-Fertigungen zeichnen sich gegenüber Jobshop-Fertigungen durch strukturierte Arbeitsabläufe, einen geringeren Handlingaufwand und häufig kürzere Produktionsdurchlaufzeiten aus. Sie weisen aber auch eine im Vergleich geringere Flexibilität auf.

2.2.4. Auftragsstypen der Fertigung

Betrachtet man die Auftragsstypen der Fertigung, so kann zwischen der *auftragsgebundenen* Produktion (Bestellproduktion, engl.: make-to-order) und der *nicht-auftragsgebundenen* Produktion (Lagerproduktion, engl.: make-to-stock) unterschieden werden. Beispielsweise werden die Standarderzeugnisse häufig in Form der nicht-auftragsgebundenen Fertigung auf Lager produziert und bis zum Eingang von Kundenaufträgen auf Vorrat gehalten. Kundenindividuelle Erzeugnisse hingegen werden in Form der auftragsgebundenen Fertigung produziert [DS10].

Tätigkeiten	Substitutionsgrade				
	1 Hand- arbeit	2 Mechani- sierung	3 Maschini- sierung	4 Teilauto- matisierung	5 Vollauto- matisierung
Werkstück- bewegung					
Werkzeug- bewegung					
Werkstück- wechsel					
Werkzeug- Wechsel					
Teile- weitergabe					
Maschinen- steuerung					
Kontrolle und Überwachung					
Instand- haltung					
Beispiele für die Grade	Schmieden, Töpfern, Schustern	Drechseln, Töpfern mit An- triebsgerät	Drehen an Leit- u. Zugspindel- drehmaschine	Bearbeitungs- zentrum	Erzeugnisherstel- lung in starrer Fließfertigung

Abbildung 2.5.: Substitution menschlicher Arbeitskraft durch Maschinenarbeit nach [Neb11]

2.2.5. Automatisierungsgrad der Fertigung

Bereits 1972 wurde der Begriff *Automatisierung* in der Norm DIN V 19233 [DIN98][#] als „das Ausrüsten einer Einrichtung, so daß sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet“ [DIN98, S. 3][#] definiert. Als Automatisierungsgrad wird gemäß dieser Norm der „Anteil der automatisierten Funktionen an der Gesamtfunktion einer Anlage“ [DIN98, S. 3][#] bezeichnet. Der Grad der Automatisierung wird in den beiden Abstufungen *teilautomatisiert* und *vollautomatisiert* definiert.

In [Neb11] wird der Grad der Automatisierung über die Substitutionsgrade menschlicher Arbeitskraft differenziert, die verdeutlichen „auf welche Art Arbeitsinhalte, die von den Arbeitskräften ausgeführt werden, [...] auf das Betriebsmittel übergehen können“ [Neb11, S. 57]. Beispiele der Substitutionsgrade, in Form der Handarbeit, Mechanisierung, Maschinisierung, Teilautomatisierung und Vollautomatisierung, zeigt Abbildung 2.5.

Für den weiteren Verlauf dieser Dissertation ist eine Abstufung der Automatisierungsgrade hinsichtlich *nicht-automatisiert*, *teilautomatisiert* und *vollautomatisiert* ausreichend. So kennzeichnen die ausschließliche Nutzung menschlicher Arbeitskraft und die Nutzung von Werkzeugen die nicht-automatisierten Produktionsprozesse. Teilautomatisierte Produktionsprozesse differenzieren sich von manuellen durch die partielle rechnergestützte Ausführung der Steuerungs- und Regelungsfunktionen der Fertigung. Vollautomatisierte Produktionsprozesse unterscheiden sich wiederum von teilautomatisierten durch die vollständige rechnergestützte Ausführung der Funktionen.

2.2.6. Spezialisierungsgrad der Elementarfaktoren

Von besonderer Relevanz für eine Typisierung von Produktionssystemen ist der Spezialisierungsgrad der Elementarfaktoren. Die Produktionsfaktoren lassen sich in Elementar- und dispositive Faktoren unterteilen [Neb11]. Erstere setzen sich aus Arbeitskräften, Betriebs-

mitteln und Werkstoffen zusammen. Zu den dispositiven Faktoren zählen die Leitung, Planung, Organisation und Überwachung/Kontrolle. „Die dispositiven Faktoren verbinden die Elementarfaktoren zu produktiven Faktorkombinationen. Die Art und Weise der Faktorkombination bestimmt die Ergiebigkeit des Produktionsprozesses und somit die Erfüllung produktionswirtschaftlicher Ziele“ [Neb11, S. 9]. Für diese Arbeit sind insbesondere die Spezialisierungen der Arbeitskräfte und eingesetzten Maschinen von besonderem Interesse.

Ein häufig verwendetes Kriterium für die Beurteilung der Spezialisierung einer Arbeitskraft stellt die Qualifikation dar. Diese lässt sich nach [Neb11] in hoch qualifiziert, gelernt, angelernt und ungelernt unterteilen. Die Qualifikation bildet aber kein ausschließliches Kriterium zur Typisierung des Spezialisierungsgrades. Eine hoch spezialisierte Arbeitskraft, die eine oder sehr wenige Tätigkeiten ausführt, kann einerseits ein Ingenieur, andererseits auch eine gering qualifizierte Arbeitskraft sein, die für spezielle Tätigkeiten angelernt wurde. Es empfiehlt sich daher, Arbeitskräfte, unabhängig vom Qualifikationsgrad, auch bezüglich ihres Spezialisierungsgrades zu unterscheiden. Für dieses Kriterium differenziert [Lou09] zwischen hoch spezialisierten Arbeitskräften sowie solchen mit mittelstarker und niedriger Spezialisierung. Mittelstark spezialisierte Kräfte, die häufig über eine abgeschlossene Berufsausbildung verfügen, können „verschiedene Tätigkeiten an unterschiedlichen Betriebsmitteln durchführen“ [Lou09, S. 71]. Ungelernte Hilfsarbeiter, die einfache Tätigkeiten an verschiedenen Maschinen ausführen können, bilden die Gruppe niedrig spezialisierter Kräfte. Zu dieser werden, abhängig von den Tätigkeiten, potenziell auch Arbeitskräfte mit einer sehr breiten Berufsausbildung gezählt, die jedoch vielfältig einsetzbar sind [Lou09].

Der Spezialisierungsgrad eingesetzter Maschinen wird in der Literatur meist grob zwischen Spezialmaschinen, die nur für wenige Arbeitsvorgänge verwendbar sind, und Universalmaschinen, die für eine Vielzahl unterschiedlicher Arbeitsvorgänge einsetzbar sind, unterschieden ([Neb11], [GO72]).

2.2.7. Zusammenfassung und Überblick der Typologisierung

Die im Rahmen der vorangehenden Unterabschnitte vorgestellten Merkmale ermöglichen nachfolgend sowohl die Einordnung der in dieser Arbeit betrachteten Produktionssysteme der MRO-Branche, als auch die Einordnung der Arbeit selbst. Abbildung 2.6 liefert zusammenfassend eine übersichtliche Darstellung der Typologierungsmerkmale sowie deren Differenzierungsformen. Mittels dieser bereits in [GO72] zu findenden Darstellungsform können übersichtlich zwei typische Verbundtypen von Produktionssystemen klassifiziert werden. Der sogenannte Linkstyp, bei dem alle in der Tabelle links befindlichen Differenzierungsformen ausgeprägt sind, charakterisiert den klassischen Massenfertiger [Lou09]. Die gegensätzliche extreme Ausprägung, in Form aller Differenzierungsmerkmale rechts in der Tabelle, kennzeichnet den klassischen Einzelfertiger. Sie kann auch als Rechtstyp bezeichnet werden. Eine ergänzende Visualisierung der wesentlichen Produktionssysteme sowie ihrer typischen Einsatzform, anhand wesentlicher Merkmale der Typologisierung, liefert die in Abbildung 2.7 dargestellte Matrix nach ([KGJ09], [GT11b]).

Repetitionstyp der Fertigung	Massenfertigung	Mehrfachfertigung	Einzelproduktion
Organisationstyp der Fertigung	einheitlicher Materialfluss	Zentrenproduktion	Werkstattfertigung
Ablaufstyp der Fertigung	kontinuierlich	Chargenproduktion	diskontinuierlich
Auftragstyp der Fertigung	nicht-auftragsgebunden		auftragsgebunden
Automatisierungsgrad der Fertigung	Voll-Automatisierung	Teil-Automatisierung	Keine Automatisierung
Spezialisierungsgrad der Arbeitskräfte	hoch	mittel	niedrig
Spezialisierungsgrad der Maschinen	Spezialmaschinen		Universalmaschinen

Abbildung 2.6.: Typologisierung der Produktionsprozesse

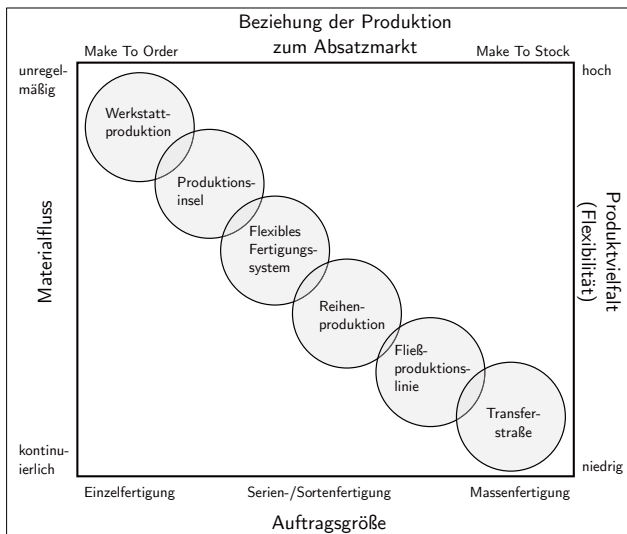


Abbildung 2.7.: Matrix zur Einordnung der Produktionsprozesse nach ([KGJ09], [GT11b])

2.3. Modellierung von Prozessen

Die Notwendigkeit, Prozesse transparent zu beschreiben, hat dazu geführt, dass mittlerweile eine Vielzahl von Methoden, Techniken und Tools existiert, um diese für vielfältige Verwendungszwecke und Nutzergruppen zu modellieren [BKR12]. Nachfolgend sollen die wesentlichen unterschiedlichen Methoden der Modellierung vorgestellt werden.

2.3.1. Fluss- und Prozessablaufdiagramm

Das Flussdiagramm ist eine weit verbreitete Methode zur Beschreibung und Dokumentation von Prozessen. Dazu werden die Symbole des Programmablaufplans nach DIN 66001 [DIN83][#] verwendet. Das Flussdiagramm wurde ursprünglich als Hilfsmittel für die Programmierung konzipiert. Die hohe und weit verbreitete Bekanntheit der in Abbildung 2.8 dargestellten Symbole hat jedoch dazu geführt, dass auch allgemeine Prozesse mit dieser Methode beschrieben werden [Bec05].

Zur Modellierung eines Prozesses wird dieser in logische Teilprozesse unterteilt, die mit einem Rechteck und dem Prozessnamen in Objekt-Verb-Form dokumentiert und mit ein- und ausgehenden Pfeilen miteinander verbunden werden. So werden die Teilprozesse in ihrer logischen und zeitlichen Reihenfolge dargestellt. Die Darstellung des Flussdiagramms erfolgt, aufgrund der gewählten Formen, in der Regel im Hochformat. Die Diagramme sind zwar aufgrund ihrer einfachen Darstellungsform leicht interpretierbar, komplexere Prozesse können jedoch schnell zu unübersichtlichen Darstellungen führen. Die zugrundeliegende lineare Darstellungsform, die eine Parallelisierung von Prozessen nicht gut unterstützt, führt meist zu nacheinander geschalteten Prozessen. Da Flussdiagramme Materialflüsse und Produktionsschritte nicht einfach abbilden können, werden diese im Zuge der Prozessoptimierung in Supply Chain und Produktion primär zur Optimierung der Informationsverarbeitung und zur Betrachtung von Teilprozessschritten eingesetzt [Bec05].

Das Prozessablaufdiagramm stellt eine Erweiterung des Flussdiagramms dar und verfolgt das Ziel, neben der logischen Reihenfolge, auch die Prozessbeteiligten sowie die zeitliche Reihenfolge oder Parallelisierung von Teilprozessschritten zu modellieren. Das Prozessablaufdiagramm bedient sich der Symbole des Flussdiagramms und visualisiert die unterschiedlichen Prozessbeteiligten durch Einteilung des Diagramms in Zeilen. Durch die zusätzliche Berücksichtigung der Rollenverteilung und der Möglichkeit zur Abbildung parallelisierter Aufgaben, eignen sich Prozessablaufdiagramme häufig deutlich besser zur Modellierung komplexer Prozesse als Flussdiagramme. Zu den Prozessbeteiligten können neben Kunden, Lieferanten und Facharbeitern auch Datenverarbeitungssysteme gezählt

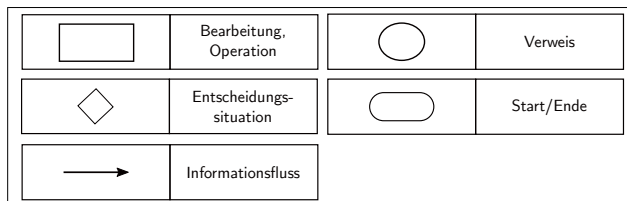


Abbildung 2.8.: Symbole des Flussdiagramms nach [Bec05]

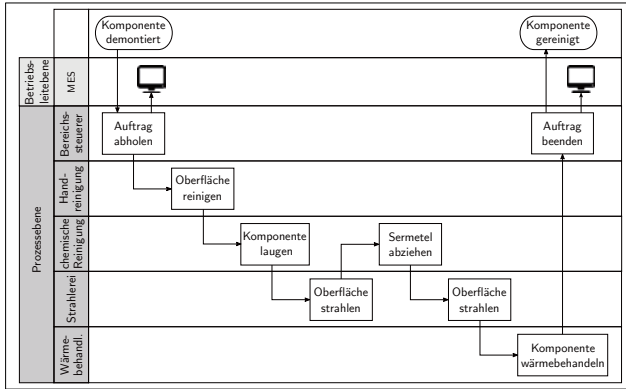


Abbildung 2.9.: Prozessablaufdiagramm des Reinigungsprozesses von Fahrwerkskomponenten

werden. Als Nachteil der Prozessablaufdiagramme kann, analog zu den Flussdiagrammen, eine durch viele Linien stark beeinträchtigte Übersichtlichkeit bei der Modellierung sehr umfangreicher Prozesse mit vielen Beteiligten genannt werden [Bec05].

Abbildung 2.9 zeigt die Modellierung eines Reinigungsprozesses von Flugzeugfahrwerken mittels des Prozessablaufdiagramms. Jeder involvierte Teilbereich wurde als separater Prozessbeteiligter aufgefasst. Zusätzlich wurde im Zuge der Modellierung auch der Zugriff auf ein unternehmensweites MES-System berücksichtigt und in die Darstellung aufgenommen.

2.3.2. Ereignisgesteuerte Prozesskette

Die Ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK) stellt eine Variante der Bedingungs-Ereignisnetze aus der Petri-Netz-Theorie dar und ist Bestandteil der grafischen Sprache der architekturintegrierten Informationssysteme (ARIS) [SJ13]. Diese weit verbreitete Notation zur Darstellung von Prozessen ist auch von Modellnutzern ohne fundiertes modellierungstechnisches Vorwissen interpretierbar und realisierbar. Sie wurde 2002 entwickelt, um Geschäftsprozesse und die zugehörigen Informationssysteme zu modellieren [BKR12]. Während die EPK die Darstellung der Beziehungen auf Funktionen und Ereignisse beschränkt, berücksichtigt die erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette (eEPK) Elemente aller Sichten (Organisationen, Funktionen und Daten) bei der Modellierung. Basis der Prozessmodellierung sind aktive Komponenten (Funktionen), die Aktivitäten durchführen, und passive Komponenten (Ereignisse), die Aktivitäten auslösen und, im Gegensatz zu den Funktionen, weder Zeit noch Ressourcen erfordern. Beide Typen von Komponenten werden durch die logischen Operationen UND, ODER und XOR miteinander verknüpft [Bec05]. Die Modellierung der EPKs erfolgt in Form gerichteter Graphen und die Darstellung in der Regel in Form eines Prozesskettendiagramms oder Vorgangskettendiagramms.

Ereignisgesteuerte Prozessketten werden häufig von Herstellern von Software für die Unternehmensleitebene zur Modellierung der Geschäftsprozesse eingesetzt. Da die Ereignisse der EPK nur verbal beschrieben werden und Verzweigungen nicht interpretiert werden können, sind Ereignisgesteuerte Prozessketten nicht rechnerbasiert interpretierbar, eignen

sich nicht für die Ablaufsteuerung und nur sehr eingeschränkt für Simulationen [Bec05]. Darüber hinaus sind für Materialflüsse keine Darstellungen definiert die Besonderheiten abbilden, sodass sich diese Modellierungsmethode „stärker für Informationsverarbeitungsprozesse zur Auftragsabwicklung als zur Abbildung der Produktionsprozesse“ [Bec05, S. 116] auf Fachebene eignet.

Die Modellierung des Reinigungsprozesses anhand der Ereignisgesteuerten Prozessketten visualisiert Abbildung 2.10 (a). Zur Verdeutlichung der Vorteile dieser Darstellungsform, insbesondere hinsichtlich ereignisbasiert ausgelöster Funktionen, wurde nach der Funktion des *Strahlens der Oberfläche* ein Entscheidungspunkt eingefügt. An diesem wird zwischen den Ereignissen einer *ordnungsgemäß gereinigten Oberfläche* und einer *verunreinigten Oberfläche* differenziert. Hierbei führt das erstgenannte Ereignis zum Abschluss des Prozesses, das zweitgenannte zur erneuten Ausführung vorheriger Teilprozessschritte.

2.3.3. Die Wertstromanalyse

Die Wertstromanalyse entstammt ursprünglich der Lean-Production-Bewegung und wird als betriebswirtschaftliche Methode für die Optimierung von Abläufen in der Produktion eingesetzt. Durch ihre Verwendung soll ein übersichtlicher und umfassender Überblick über den gesamten Produktionsprozess erlangt und darauf basierend Verschwendung identifiziert werden. Als Darstellungsform wird das Wertstromdiagramm verwendet, das den gesamten Material- und Informationsfluss in allen internen Bearbeitungs- und Produktionsschritten darstellt. Jeder Prozessschritt wird hierbei durch entsprechende Symbole mit definiertem Inhalt repräsentiert, deren zeitliche und logische Anordnung wiederum die Ablaufreihenfolge modelliert. Neben der symbolhaften Darstellung können die einzelnen Prozessschritte zusätzlich mit einem Namen versehen und kurz beschrieben werden. Darüber hinaus können die Schritte mit weiteren Kennzahlen, wie Zyklus- oder Rüstzeiten, Losgröße, Auftragsmengen oder Ausfallraten, versehen werden. Abbildung 2.10 (b) zeigt das Wertstromdiagramm des Reinigungsprozesses. Exemplarisch wurde der Wertstrom für zwei verschiedene Fahrwerkskomponenten visualisiert und die entsprechenden Bearbeitungszeiten als Parameter der Prozessschritte vermerkt.

2.3.4. Die Formalisierte Prozessbeschreibung

Anders als die nicht-formalisierte verbale Beschreibung eines Prozesses, durch Fluss- und Prozessablaufdiagramme oder EPKs, bietet die Formalisierte Prozessbeschreibung (FPB) eine Möglichkeit der rechnerbasierten Interpretation. Die aus den 1980er Jahren stammende Idee der einheitlichen und gewerkübergreifenden Darstellung und Modellierung von technischen Anlagen, wurde in Form eines Beschreibungsmittels zur formalisierten Beschreibung von Prozessen konkretisiert. 2005 mündete die Idee in der VDI/VDE Richtlinie 3682 zur Formalisierten Prozessbeschreibung [VDI14]#.

Ziel ist die Bereitstellung eines einfachen, branchenneutralen, für alle Fachgebiete leicht verständlichen Beschreibungsmittels, das über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage einsetzbar ist [Ulr09]. Dazu bedient sich die Formalisierte Prozessbeschreibung einer fest definierten Menge von Symbolen, Regeln und Operatoren. Diese lassen sich in Prozesse und technische Ressourcen unterteilen und durch Relationen miteinander verbinden. Man unterscheidet die Zustände hinsichtlich Produkt (Kreis) und Energie (Raute); die Operatoren zwischen Funktionen (Rechteck) und deren Realisierung (Rechteck mit abgerundeten

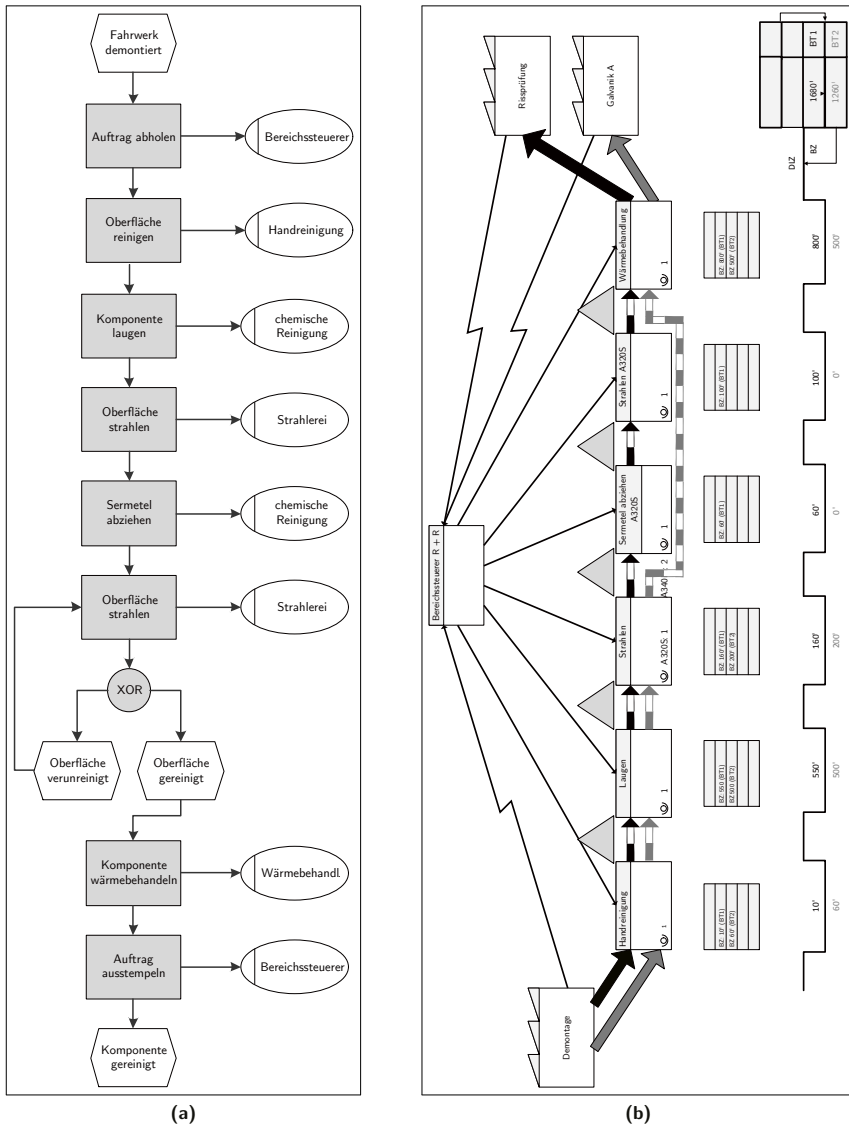


Abbildung 2.10.: Modellierung des Reinigungsprozesses von Fahrwerkskomponenten: (a) Ereignisgesteuerte Prozesskette; (b) Wertstromanalyse

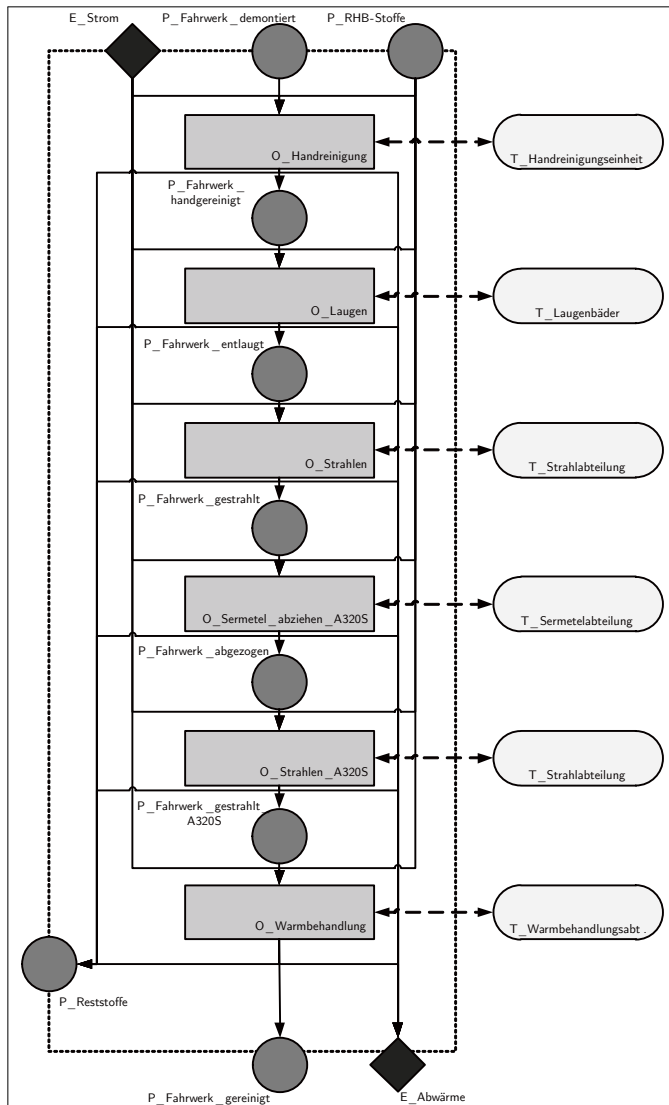


Abbildung 2.11.: Modellierung des Reinigungsprozesses von Fahrwerkskomponenten mittels der Formalisierten Prozessbeschreibung

Ecken). Durch eine Prozessoperation wird jedes Produkt bzw. jede Energie aus einem Zustand vor der Operation in einen nach einer solchen überführt. Aufgrund der potenziellen Komplexität der Prozessoperationen, können diese im Rahmen der Formalisierten Prozessbeschreibung auch weiter zerlegt und damit durch weitere Prozessoperatoren detaillierter beschrieben werden. Da ein System durch eine gestrichelte Bilanzgrenze, wie in der exemplarischen Modellierung des Reinigungsprozesses in Abbildung 2.11 dargestellt, gekennzeichnet wird, ist auch jegliche Art statistischer Bilanzierung möglich. Neben der visuellen Darstellung nutzt die FPB den Ansatz der Objektorientierung und liefert ein Informationsmodell zur Speicherung beliebig vieler Attribute der einzelnen Objekte [Ulr09].

2.3.5. Zusammenfassung

Alle zuvor vorgestellten Prozessbeschreibungsmittel sind für ihren jeweiligen Aufgabenbereich spezialisiert und weisen für diesen entsprechende Vorteile auf. Dies verdeutlicht auch die Modellierung des exemplarischen Prozesses der Reinigung von Fahrwerkskomponenten anhand der verschiedenen vorgestellten Methoden. So eignet sich das Prozessablaufdiagramm als Erweiterung des leicht interpretierbaren Flussdiagramms vor allem zur Analyse von Prozessen, bei denen der Fokus auf der Interaktion mehrerer Prozessbeteiligter liegt. Die Beschreibung mittels der Ereignisgesteuerten Prozesskette, für die ein hoher Schulungs- und Lernaufwand erforderlich ist, „der auf den vielen unterschiedlichen Symbolen, Bedeutungen, aufwändigen Regeln und Sonderformen beruht“ [Bec05, S. 114], hat ihre Stärken vor allem in der Gesamtdarstellung abteilungsübergreifender Prozessketten. Bei der Modellierung von Prozessen auf lediglich einer Hierarchieebene der Automatisierungspyramide mit vielen Beteiligten sowie vielen Handling- und Materialtransportvorgängen kommen die Vorteile der EPKs weniger zur Geltung. Die Wertstromanalyse kombiniert eine leicht interpretierbare Prozessvisualisierung mit einer quantitativen Analyse relevanter Kennzahlen und eignet sich dementsprechend vor allem zur Identifikation von Verschwendungen innerhalb eines Prozesses. Das veranschaulicht auch die Modellierung des Reinigungsprozesses in Abbildung 2.10 (b), in der die verschiedenen Beteiligten visuell schwer differenzierbar sind, im Gegenzug aber wichtige Kennzahlen, wie die Bearbeitungszeiten und Durchlaufzeiten verschiedener Komponenten für die Teilprozessschritte, dargestellt werden können. Die Vorteile der Formalisierten Prozessbeschreibung liegen insbesondere in der branchenübergreifend leicht interpretierbaren Visualisierung von Produktionsprozessen sowie der Existenz eines zugehörigen objektorientierten Informationsmodells. Dementsprechend eignet sich diese rechnerinterpretierbare Kombination vor allem für die Unterstützung der ganzheitlichen Planung und Realisierung von Produktionsanlagen.

2.4. Stand der Technik zur Instandhaltung von Luftfahrzeugen

Dieses Unterkapitel befasst sich mit den Grundlagen zur Instandhaltung von Luftfahrzeugen. Dazu sollen in Abschnitt 2.4.1 wichtige Definitionen und Rahmenbedingungen der Instandhaltung dargestellt werden. Nach einem Überblick über den globalen MRO-Markt in Abschnitt 2.4.2 wird schließlich in Abschnitt 2.4.3 auf die notwendigen Prozesse zur Instandhaltung von Flugzeugkomponenten eingegangen.

2.4.1. Definitionen und Rahmenbedingungen der Instandhaltung

Nach der DIN 31051 [DIN12][#] wird die Instandhaltung allgemein definiert als die „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“ [DIN12, S. 4][#]. Sie lässt sich vollständig in die Grundmaßnahmen

- *Wartung*: Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats,
- *Inspektion*: Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Einheit,
- *Instandsetzung*: physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion einer fehlerhaften Einheit wiederherzustellen und
- *Verbesserung*: Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen zur Steigerung der Zuverlässigkeit und/oder Instandhaltbarkeit und/oder Sicherheit einer Einheit

unterteilen [DIN12][#]. Die zu instandhaltende Einheit wird als ein „Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, Funktionseinheit, Betriebsmittel oder System, das/die für sich allein beschrieben und betrachtet werden kann“ [DIN12, S. 7][#] definiert.

Für die zivile Luftfahrt in der Bundesrepublik Deutschland wurde der Begriff der Instandhaltung 1970 in der Betriebsordnung für Luftfahrtgerät (LuftBO) definiert³. Die Instandhaltung wird unterteilt in die Wartung einschließlich kleinerer Reparaturen (engl. Maintenance), die sogenannte große Reparatur (engl. Repair) und die Überholung (engl. Overhaul), die folgend erläutert werden.

Wartung Die Wartung umfasst gemäß der LuftBO „planmäßige Kontrollen und Arbeiten, die zur Aufrechterhaltung und Überwachung der Lufttüchtigkeit erforderlich sind; nichtplanmäßige zusätzliche Arbeiten und kleine Reparaturen, die zur Behebung angezeigter Beanstandungen oder festgestellter Mängel erforderlich sind und mit einfachen Mitteln ausgeführt werden können“. Sie dient folglich gemäß der Definition nach DIN 31051 zur Bewahrung des Sollzustands eines Flugzeugs. Dieser Zustand wird im Luftfahrtbereich auch als Lufttüchtigkeit (engl. Airworthiness) bezeichnet und unterliegt weitgehend multinationalen, strengen Reglementierungen und staatlichen luftverkehrsrechtlichen Vorschriften [Men13]. Lufttüchtigkeit wird für ein Luftfahrzeug oder Luftfahrzeugteil definiert als „das Innehaben der notwendigen Forderungen, um innerhalb zulässiger Grenzen in einem sicheren Zustand zu fliegen“ [DF10, S. 3].

Ein spezifisches Merkmal der Wartung ist, dass die dazu notwendigen Tätigkeiten stets am „Flugzeug als Ganzes“ ausgeführt werden und das Flugzeug in seinem planmäßigen Umlauf verbleibt [Men13].

³Die Definition dieser Begriffe in §6-§8 der LuftBO wurde am 01.03.2013, im Zuge der Angleichung an die (EG) Nr. 2042/2003, aufgehoben.

Große Reparatur Die große Reparatur eines Flugzeugs wird nach der LuftBO wie folgt definiert: „Hat ein Luftfahrtgerät einen Schaden erlitten, der im Rahmen der Wartung nach §6 nicht einwandfrei behoben werden kann, ist eine große Reparatur durchzuführen“. Folglich dient die große Reparatur der Wiederherstellung der Lufttüchtigkeit und ist der Instandsetzung nach DIN 31051 zuzuordnen.

Überholung Die Überholung eines Flugzeugs im Rahmen der Flugzeuginstandhaltung wird in der LuftBO wie folgt definiert: „Hat ein Luftfahrtgerät die zulässige Betriebszeit nach §4 erreicht oder sind bei seinem Betrieb Mängel festgestellt worden, die im Rahmen der Wartung nach §6 nicht behoben werden können, ist das Gerät ganz oder teilweise zu überholen (Grund- oder Teilüberholung)“. Die Überholung entspricht somit ebenfalls der Instandsetzung nach DIN 31051, um die Lufttüchtigkeit eines Luftfahrgerätes wiederherzustellen. Eine genaue Abgrenzung zwischen großer Reparatur und Überholung ist schwierig. Beide erfordern jedoch die teilweise oder komplette Zerlegung eines technischen Systems und sind somit meist mit längeren Ausfallzeiten eines Flugzeugs verbunden [Men13].

Rahmenbedingungen der Instandhaltung Nachfolgend soll im Zusammenhang mit der Wartung, Überholung und großen Reparatur von Flugzeugen allgemein von *Instandhaltung* gesprochen werden. Die Gesamtheit aller Prozesse, die dazu von einem Bauteil durchlaufen werden müssen, wird im weiteren Verlauf als *Instandhaltung* bezeichnet; ein einzelner Prozess als *Instandhaltungsprozess*.

Neben der kapazitiven, räumlichen und zeitlichen Organisationsflexibilität bedarf es für die Instandhaltung insbesondere der sachlichen Organisationsflexibilität [Ras00]. Diese ist erforderlich, weil „es sich bei Instandhaltungsleistungen ihrem Charakter nach häufig um heterogene, arbeitsintensive und komplexe Einzelfertigungen handelt, die besonders qualifiziertes Personal erfordern“ [Ras00, S. 28]. Darüber hinaus sind die durchzuführenden Tätigkeiten „überwiegend handwerklich geprägt und erfordern ein hohes technisches Know-how sowie eine ausgeprägte Improvisationsfähigkeit seitens der Mitarbeiter“ [Ras00, S. 28]. Abschließend stellt [Ras00] in Bezug auf die sachliche Organisationsflexibilität fest, dass „die hohen Anforderungen hinsichtlich der einzelnen Tätigkeiten [...] zusammen mit deren geringem Wirkungsgrad dazu [führen], dass im Instandhaltungsbereich eine Substitution menschlicher Arbeitsleistung durch Maschinen in der Praxis kaum möglich ist“ [Ras00, S. 28] und „die Dominanz des Faktors menschliche Arbeit gegenüber anderen Produktionsfaktoren ein wichtiges Kennzeichen für den Bereich der Instandhaltung ist“ [Ras00, S. 28]⁴.

Der konstruktive Aufbau eines Flugzeuges lässt sich, gemäß Abbildung 2.12, in drei Konstruktionshauptgruppen sowie 13 Konstruktionsgruppen unterteilen. Aufgrund der Komplexität ist eine „Vielzahl an verschiedenen und zum Teil sehr komplexen Instandhaltungsmaßnahmen“ [Men13, S. 1353] für den Erhalt oder die Wiederherstellung des lufttüchtigen Zustands eines Luftfahrzeugs erforderlich. Zu den wichtigsten deutschen Gesetzen und Verordnungen bezüglich der Instandhaltung von Flugzeugen zählen das Luftverkehrsgesetz (LuftVG), die Betriebsordnung für Luftfahrtgerät (LuftBO) und die Verordnung zur Prüfung von Luftfahrtgerät (LuftGerPV) [Men13]. Darüber hinaus gelten diverse Joint Aviation Requirements (JAR's), die von einer Arbeitsgruppe der europäischen Luftfahrtbehörden, der Joint Aviation Authorities (JAA), ausgearbeitet und veröffentlicht werden.

⁴ Rasch fußt seine Erkenntnisse auf [Her75], [RFW90] und [Rei77].

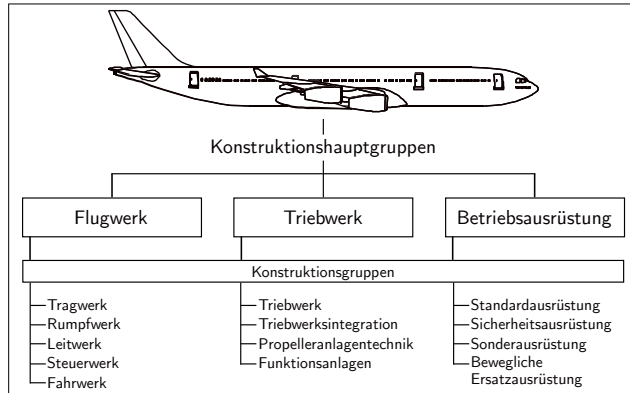


Abbildung 2.12.: Konstruktionsgruppen Flugzeug nach [Men13]

Diese Vielzahl an nationalen und europäischen Reglementierungen gewährleistet einerseits einen hohen nachhaltigen Sicherheitsstandard in der europäischen Luftfahrt. Andererseits ist die Gewährleistung und Erhaltung des hohen Standards für die Halter der Luftfahrtgeräte mit enormem Aufwand verbunden. Die zu diesem Zweck vom Halter zu veranlassenden Instandhaltungsmaßnahmen seiner Luftfahrtgeräte sind streng reglementiert und dürfen ausschließlich von dafür gemäß der EASA Part 145 [Eur14][#] zugelassenen Instandhaltungsbetrieben durchgeführt werden.

Die Festlegung der Mindestanforderungen für die Aufrechterhaltung der Lufttüchtigkeit erfolgt vor der Inbetriebnahme eines neuen Flugzeugmusters im Rahmen eines sogenannten Maintenance-Review-Board-Reportes (MRB-Report). Dieser wird von einer Arbeitsgruppe, der sogenannten Maintenance Steering Group (MSG), die sich aus Vertretern der Luftverkehrsgesellschaft, des Flugzeugherstellers und der zulassenden Behörden zusammensetzt, sehr detailliert erarbeitet. Der MRB-Report basiert seit 1980 auf der Maintenance Steering Group 3 Analyse (MSG-3), die sowohl eine allgemein anerkannte Entscheidungslogik zur Bestimmung grundlegender Instandhaltungsmaßnahmen als auch den organisatorischen Rahmen und die zugehörigen Prozesse beinhaltet [Hin15][®]. „Der MRB-Report gilt unter den Luftfahrtbehörden und luftfahrttechnischen Betrieben als zentrales Basisdokument für die Instandhaltung eines Flugzeugmusters“ [Hin15, S. 2][®] und ist im Laufe der Betriebszeit häufigen Änderungen seitens der Luftfahrtbehörden oder des Herstellers unterworfen. „Dadurch entsteht ein Regelkreis, der sicherstellt, dass neue Erkenntnisse und Erfahrungen die sich aus dem Betrieb des Luftfahrtgeräts ergeben in das Instandhaltungsprogramm eingehen“ [Men13, S. 1356]. Die Grundlage für die durchzuführenden Instandhaltungsmaßnahmen selbst sowie die entsprechenden Intervalle, um den Anforderungen des MRB-Reports gerecht zu werden, bilden in der Regel luftverkehrsgesellschaftsspezifische Instandhaltungsprogramme mit den Component Operation Storage Limits (COSL), dem Maintenance Schedule (MS) und den Instandhaltungsanleitungen der Komponentenhersteller, den sogenannten Component Maintenance Manuals (CMM) [Men13]. Zur Veranschaulichung der Komplexität skizziert Abbildung 2.13 den Dokumentenfluss mit dem sich ein MRO-Unternehmen konfrontiert sieht.

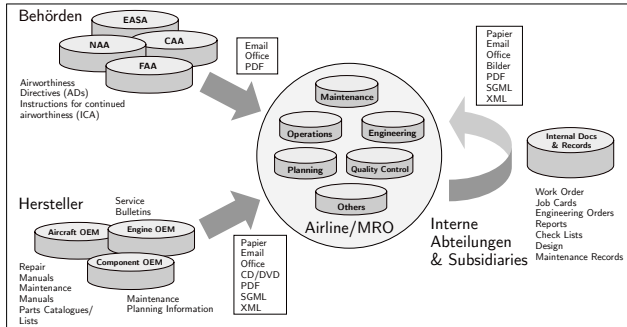


Abbildung 2.13.: Dokumentenfluss der Technischen Dokumentation in der Luftfahrtindustrie nach [H013]

2.4.2. Wettbewerber im MRO

Nach [Men13] lassen sich drei verschiedene Anbieter von MRO-Dienstleistungen unterscheiden. Die MRO-Unternehmen des deutschen Marktes verteilen sich, gemäß der zwischen 2010 und 2011 vom Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik durchgeführten Studie, etwa gleichmäßig auf die drei Anbieterformen [URBVD11], auf die nachfolgend kurz eingegangen wird.

MRO-Dienstleister der Luftverkehrsgesellschaften Als mit der zunehmenden Kommerzialisierung der Luftfahrt und der damit einhergehenden gesetzlichen Regulierung die Verantwortlichkeit für die Lufttüchtigkeit zunehmend in den Verantwortungsbereich der Airlines rückte, begannen diese, eigenständig Instandhaltungsmaßnahmen an ihren Flugzeugen durchzuführen. Zu diesem Zweck wurden nach und nach gut ausgerüstete technische Abteilungen innerhalb der Unternehmen aufgebaut. Indem die Luftverkehrsgesellschaften ihre Dienstleistungen auch Drittkunden anboten, um ungenutzte Kapazitäten ihrer MRO-Abteilungen zu monetarisieren, entwickelte sich schnell ein eigenständiger Markt an Anbietern von MRO-Dienstleistungen. Basierend auf diesem Geschäftsmodell transformierten im Laufe der Zeit viele Fluggesellschaften ihre technischen Abteilungen zu eigenständigen Tochtergesellschaften, wie beispielsweise Lufthansa Technik, Air France Industries, Air Canada Technical oder British Airways Engineering [Men13]. Ein Vorteil dieser großen MRO-Dienstleister ist, dass diese ein sehr breites Spektrum an Dienstleistungen für verschiedene Flugzeugtypen und -komponenten anbieten können. Dadurch sind sie oftmals in der Lage, auch die komplette Überholung eines Flugzeugs anzubieten.

Original Equipment Manufacturer (OEM) Neben den Luftfahrtgesellschaften, die überwiegend in Form ihrer Tochtergesellschaften MRO-Dienstleistungen anbieten, spielen auch die Hersteller der Flugzeuge und der Flugzeugkomponenten eine wichtige Rolle auf dem MRO-Markt. Instandhaltungsdienstleistungen bieten sie jedoch folglich nur für ihre eigenen Produkte an. Insbesondere die rückläufigen Umsätze durch Ersatzteilbestellungen, aufgrund der steigenden Zuverlässigkeit der Komponenten und Systeme, führen zu einer

stärkeren Fokussierung der OEM-Unternehmen auf den MRO-Markt [Men13]. Die OEM-Anbieter von Maintenance-Dienstleistungen verfügen zwar einerseits über ein reichhaltiges technisches Wissen über ihre eigenen Produkte und damit über die Fähigkeit zur Entwicklung kostengünstiger Instandhaltungsmethoden, sind andererseits aber hochgradig spezialisiert und können keine umfassenden Dienstleistungen für komplette Flugzeuge anbieten. Zu den bedeutenden OEM-Anbietern von MRO-Dienstleistungen zählen vor allem die Hersteller von Triebwerken wie GE Engine Services, Rolls Royce oder Pratt & Whitney.

Unabhängige Anbieter Auch die unabhängigen Anbieter von MRO-Dienstleistungen sind mittlerweile nicht zu vernachlässigen. Häufig haben sich diese auf spezielle Technologien für die Instandhaltung spezifischer Komponenten spezialisiert, um gegenüber den Tochtergesellschaften der großen Airlines und den OEM-Dienstleistern konkurrenzfähig sein zu können. Namhafte Anbieter sind beispielsweise EADS Sogerma oder AAR Corporation [Men13].

2.4.3. Organisation und Durchführung der Instandhaltung

Trotz der strengen Reglementierung der Luftfahrzeuginstandhaltung selbst gibt es in der JAR-145 keine unmittelbaren Vorgaben in Bezug auf die Organisation eines Instandhaltungsbetriebs. Dennoch weisen „insbesondere die Produktionsbereiche von Maintenance Organisationen in der Praxis eine frappierende Ähnlichkeit auf“ [Hin13, S. 196]. Der Aufbau eines typischen mittelgroßen oder großen Instandhaltungsbetriebs ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Die Produktion eines solchen Betriebs setzt sich aus der Flugzeuginstandhaltung, die in Line-Maintenance und Base-Maintenance unterteilt ist, und den Instandhaltungswerkstätten zusammen. Line-Maintenance und Base-Maintenance liegen unterschiedliche Genehmigungsvoraussetzungen zugrunde. Erstgenannte ist charakterisiert als „Instandhaltung, die weder einen umfangreichen Zerlegungsgrad noch eine komplexe Funktionsprüfung beinhaltet. Line-Maintenance muss mit einfachen Mitteln erfolgen“ [Hin13, S. 202] und umfasst nur kurze Instandhaltungsereignisse. Base-Maintenance liegt definitorisch immer dann vor, „wenn die Line-Maintenance Kriterien des EASA Part 145 nicht erfüllt sind“ [Hin13, S. 206]. Während das Flugzeug für die Durchführung eines Line-Maintenance in der Regel nicht aus dem Betrieb bzw. Flugplan genommen wird, ist ein Base-Maintenance gekennzeichnet durch einen umfangreichen Zerlegungsgrad und längere Liegezeiten von oftmals mehreren Wochen.

Die Instandhaltungswerkstätten sind häufig in Triebwerk-, Fahrwerk- und Bauteil-Instandhaltung untergliedert, da die Triebwerk-Instandhaltung ein eigenes luftfahrtrechtliches Rating (B-Rating) darstellt, welches komplexer Instandhaltungsvorgänge bedarf, und das Fahrwerk die größte Einzelkomponente darstellt. Einen eigenen Bereich innerhalb der Werkstätten bildet meist die zerstörungsfreie Materialprüfung (Non-Destructive Testing - NDT), deren Durchführung umfassende Erfahrung erfordert und häufig von den Produktionsabteilungen gemeinsam genutzt wird. Die Produktionsbereiche mittelgroßer und großer Instandhaltungsbetriebe werden durch Abteilungen für den Engineering-Support und für die Material- und Leistungsversorgung unterstützt.

Abbildung 2.15 visualisiert exemplarisch die elementaren Teilprozesse der Triebwerkinstandhaltung. Der erste Schritt einer solchen ist die Demontage der Triebwerke vom Luftfahrzeug. Anschließend werden diese in die entsprechende Instandhaltungswerkstatt transportiert, die sich aus einzelnen Fachwerkstätten zusammensetzt. Diese sind aufgrund der

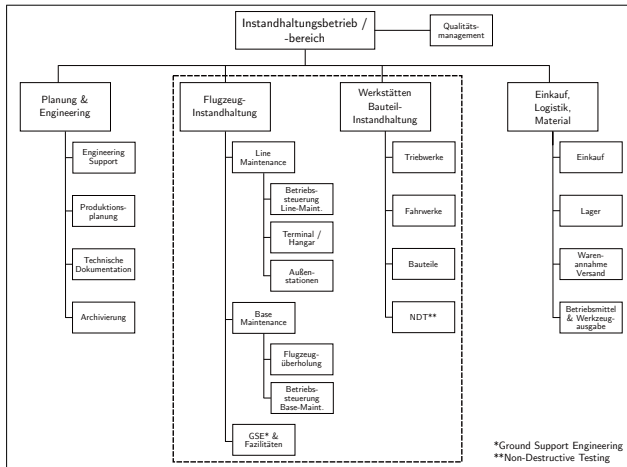


Abbildung 2.14.: Aufbau eines typischen Instandhaltungsbetriebs nach [Hin13]

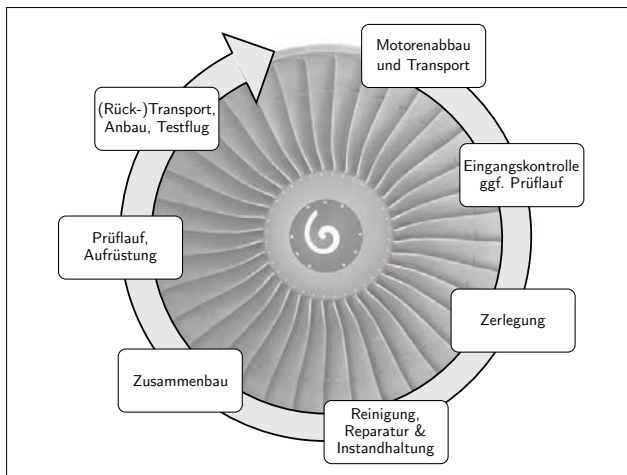


Abbildung 2.15.: Exemplarischer Ablauf einer Triebwerksinstandhaltung nach [Hin13]

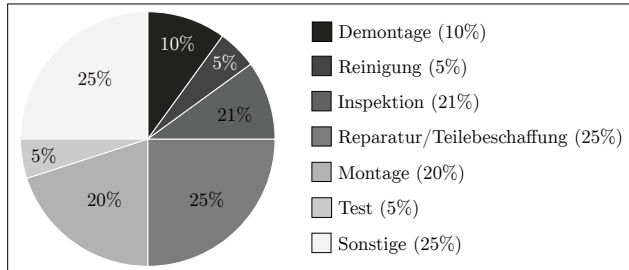


Abbildung 2.16.: Durchschnittliche Verteilung der Durchlaufzeiten der Flugzeugkomponenten auf die klassischen MRO-Teilprozesse im Zuge der Wartung und Instandhaltung nach [RS11]

Anforderungen hinsichtlich der sachlichen Organisationsflexibilität, nach Abschnitt 2.4.1, in der Regel nach dem Funktionsprinzip in Abschnitt 2.2.2 organisiert. Nach Ankunft der Komponenten und einer ersten Sichtprüfung beginnt die Zerlegung auf Modul- oder Baugruppenebene, die ebenfalls weiter zerlegt werden. Anschließend erfolgen für alle Teilkomponenten die Reinigung und die „Durchführung von Instandhaltungs- und Überholungsmaßnahmen, wie Sichtprüfungen, befundbedingte Instandhaltung, Austausch einzelner lebenszeitbegrenzter Teile oder Generalüberholungen“ [Hin13, S. 218]. Alle im Rahmen der Instandhaltung durchzuführenden Tätigkeiten müssen, zwecks einer transparenten und nachvollziehbaren Unterteilung und Definition aller notwendigen Arbeitsschritte und gemäß der EASA Part 145 [Eur14][#], auf Basis sogenannter Arbeitskarten durchgeführt werden. Diese werden „entweder durch den Kunden mitgeliefert, gekauft oder selbst erstellt“ [Hin13, S. 198]. Nach der Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen folgt schließlich der Zusammenbau (Assembly) einzelner Module sowie der Hauptkomponente gemäß den Vorgaben der Hersteller und die Durchführung diverser Test- und Prüfscenarien.

Die durchschnittliche Verteilung der Durchlaufzeiten von Flugzeugkomponenten im Zuge der Instandhaltung auf die einzelnen klassischen Teilprozesse zeigt Abbildung 2.16. Die aufgeführten Werte wurden in einer Befragung von Unternehmen der MRO-Branche, im Rahmen einer zwischen 2010 und 2011 durchgeführten Studie des Instituts für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart, ermittelt [RS11]. So hat die Reparatur und Teilebeschaffung mit 25% den größten Anteil an der Gesamtdurchlaufzeit der Komponenten, dicht gefolgt von der Montage ersetzter und reparierter Einzelkomponenten zu einer Hauptkomponente mit 20%. Weitere Anteile an der Gesamtdurchlaufzeit haben die Demontage und Inspektion mit jeweils 10% sowie die Reinigung und abschließende Funktionstests mit jeweils 5%. Von der Gesamtdurchlaufzeit entfallen 25% auf sonstige Tätigkeiten wie die Planung, Organisation und Verpackung der überholten Komponenten.

2.5. Analyse des Fallbeispiels eines MRO-Dienstleisters

Dieser Abschnitt soll die zuvor in der Literatur erarbeiteten Gegebenheiten der Instandhaltung von Luftfahrzeugen anhand eines Fallbeispiels belegen. Darüber hinaus sollen durch die praxisnahe Analyse repräsentativer Instandhaltungsprozesse die Defizite der Prozesse sowie der Bedarf hinsichtlich einer Automatisierung herausgearbeitet werden.

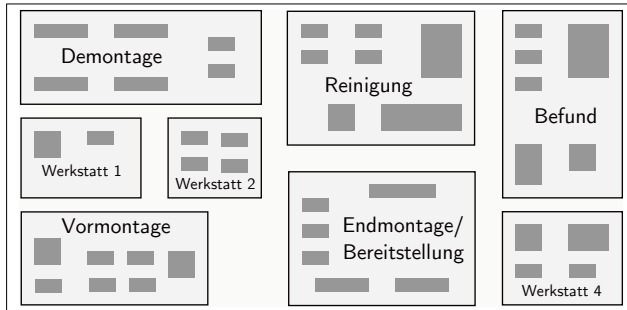


Abbildung 2.17.: Prinzipskizze des Hallenlayouts zur Fahrwerksüberholung der Lufthansa Technik AG am Standort Hamburg

Hierzu soll die Lufthansa Technik AG (LHT) betrachtet werden, die zu den international führenden herstellerunabhängigen Anbietern für die Instandhaltung von Flugzeugen in der zivilen Luftfahrtindustrie gehört. Das Unternehmen verfügt über die sechs Geschäftsfelder: Wartung, Überholung, Geräteversorgung, Triebwerke, Fahrwerke und VIP Services. Von 1954 an entwickelte sich die Lufthansa Technik AG, von einer Wartungsabteilung innerhalb der Deutschen Lufthansa AG, zu einem eigenständigen MRO-Unternehmen, das am 17. Oktober 1994 gegründet wurde. Mit seinen – nach eigenen Angaben – rund 30 operativen Tochtergesellschaften, 750 Kunden und über 20.000 beschäftigten Mitarbeitern an weltweit etwa 60 Standorten zählt das Unternehmen zu den großen MRO-Dienstleistern der Luftverkehrsgesellschaften nach Abschnitt 2.4.2 [Luf15][®].

2.5.1. Beschreibung der Prozess- und Organisationsstruktur

Die Organisation der Lufthansa Technik AG entspricht dem in Abschnitt 2.4.3 und in Abbildung 2.14 skizzierten Aufbau eines typischen Instandhaltungsbetriebs. Die Organisationsstruktur der Produktionsbereiche für die Instandhaltung entspricht erwartungsgemäß dem Funktionsprinzip. Abbildung 2.17 zeigt die exemplarische Skizze des historisch gewachsenen Hallenlayouts für die Fahrwerksüberholung bei der Lufthansa Technik AG am Standort Hamburg. Deutlich erkennbar ist, dass für jeden Teilprozess der Komponentenüberholung, wie in Abschnitt 2.4.3 aufgezeigt, klar abgegrenzte Bereiche in Form der typischen Werkstattfertigung vorzufinden sind. Über Arbeitsaufträge in Papierform, die jede Komponente durch die Prozesse begleiten, werden die Art und die Reihenfolge der zu durchlaufenden Werkstätten sowie die auszuführenden Tätigkeiten definiert.

2.5.2. Einsatz von IT-Systemen in der Produktion

Die Einordnung der eingesetzten IT-Systeme der Lufthansa Technik AG in die Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide erfolgt in Abbildung 2.18. So findet man auf Unternehmensleitebene die häufig von Großunternehmen und dementsprechend auch von vielen MRO-Dienstleistern eingesetzte ERP-Software SAP R/3 des Herstellers SAP [SAP][®] [HG07]. Diese wird ergänzt durch das Modul „SAP for Aerospace & Defence“. Aufgrund des

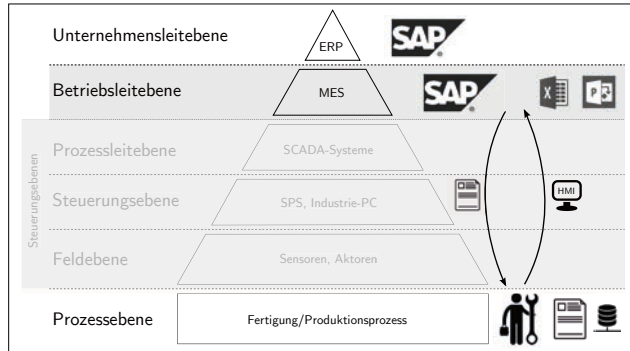


Abbildung 2.18.: IT-Systeme in den Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide bei der Luftansa Technik AG am Standort Hamburg

Konkurrenzdrucks im MRO-Softwarebereich zwischen Herstellern wie IBM [IBM][®], ORACLE [ORA][®] und Boeing [MIR][®], wurde das Modul seit Anfang des 21. Jahrhunderts speziell für die Bedürfnisse der MRO-Branche entwickelt [Sah12]. Die Funktionsvielfalt und Mächtigkeit der Software erlaubt, vor allem durch das MRO-spezifische Ergänzungspaket, auch den Einsatz auf Betriebsleitebene.

Zusätzlich werden auf dieser Ebene für detailliertere Planungen individuell entwickelte Lösungen eingesetzt. Dies resultiert aus der Hochpreisigkeit der etwaigen Anpassung der Standardsoftware und den speziellen Anforderungen der MRO-spezifischen organisations-internen Prozesse, die nicht standardmäßig mit der Software des Herstellers SAP abbildbar sind. So werden die ergänzenden Planungsinstrumente mit Hilfe von Produkten aus der Microsoft-Produktreihe, wie MS-Project und MS-Excel [Mica][®], oder proprietären Datenbanken entwickelt und an die besonderen Anforderungen der Instandhaltungsprozesse angepasst. Sowohl die Existenz dieser proprietären Planungs- und Steuerungshilfsmittel als auch das Bestreben, diese Lösungen in die IT-Systemstrategie zu integrieren, sind gängige Praxis bei allen Unternehmen im MRO mit gewachsenen Produktionsbereichen [BWW03].

Die strengen Reglementierungen im Luftfahrtbereich erfordern, dass „alle im Rahmen der Herstellung und Instandhaltung durchzuführenden Arbeiten [...] strukturiert anzuweisen [sind], d. h. in klare Arbeitsschritte zu untergliedern [sind]“ [Hin13, S. 139]. Daher werden die Aufgaben der einzelnen Teilprozesse in Form von sogenannten Arbeitskarten abgebildet und ablauforganisatorisch zugeordnet. Sie stellen „unmittelbare Arbeitsanweisungen auf der untersten operativen Hierarchieebene dar, weil sie im Normalfall eine (Grob-)Beschreibung bzw. Inhaltsangabe der durchzuführenden Arbeitsschritte“ [Hin13, S. 139] und die herstellereigenen Informationen, wie das Prozessergebnis und die Rahmenbedingungen der Bearbeitung aus dem CMM, beinhalten. Anhand der Arbeitsaufträge, die jede Komponente durch die Instandhaltung begleiten und in denen die einzelnen durchzuführenden Instandhaltungsprozesse definiert werden, wird der Ablauf der Instandhaltung definiert. Diese werden auf Betriebsleitebene erstellt, verwaltet und überwacht. Basierend auf den Ergebnissen einzelner Prozesse, wie beispielsweise der Inspektion, können automatisiert die erforderlichen Arbeitsaufträge für nachfolgende Schritte generiert und die

Ablauffolge modifiziert werden.

Die Steuerungsebenen sind typischerweise für die von manuellen Tätigkeiten dominierte Werkstattfertigung nicht ausgeprägt und softwaretechnisch realisiert. Die Kommunikation zwischen der Prozessebene und den beiden obersten Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide erfolgt durch manuelle Eingaben des auf Prozessebene tätigen Personals in die Software auf MES-Ebene und den manuellen Abruf von Arbeitsanweisungen. Beispiele sind die Ein- und Ausstempelung von Arbeitsaufträgen sowie die händische Eingabe prozessspezifischer Ereignisse, wie die Ergebnisse der Befundung. Dementsprechend sind auf Prozessebene neben den Arbeitsaufträgen und zugehörigen Arbeitskarten, die in einem revisionssicheren Dokumentenmanagementsystem verwaltet werden, keine weiteren Werkzeuge zur Steuerung oder Standardisierung vorhanden [HO13]. Ausnahmen bilden vereinzelte proprietäre, werkstattinterne Datenbanken mit Bearbeitungsvorgaben oder Sammlungen dieser in Papierform.

Neben den aufgeführten IT-Systemen in der Produktion der LHT existiert ein umfangreiches prozessbasiertes Qualitätsmanagementsystem. Ein solches ist aufgrund der besonderen Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen an luftfahrttechnische Betriebe von besonderer Bedeutung [Hin13]. Mittels dieses Systems ist die Planung, Umsetzung und Kontrolle der Prozesse über die gesamte Wertschöpfungskette, unter Einbezug der Unternehmenshierarchie, verankert. Die oberste Hierarchieebene bildet in diesem Zusammenhang das Managementhandbuch, das einen Gesamtüberblick über das Unternehmen gibt. Nachgeordnet finden sich auf den darunter liegenden Hierarchieebenen „Verfahrensanweisungen oder Prozessbeschreibungen, in denen die Abläufe detailliert mit den zugehörigen Verantwortlichkeiten festgelegt sind“ [Hin13, S. 285]. Dabei nimmt der Detaillierungsgrad der Anweisungen und Beschreibungen in absteigender Richtung zu. „Die unterste Dokumentationsebene bilden Formblätter, Prüfanweisungen, Checklisten oder sonstige Hilfsdokumente, die spezifisch das Vorgehen für einzelne Tätigkeiten, Aufgaben oder Arbeitsplätze regeln“ [Hin13, S. 285]. Sie kommen „dort zum Einsatz, wo standardisierte Vorgänge durchzuführen sind, die aber aufgrund der Durchführungskomplexität ohne zusätzliche Dokumentation nicht durch den Wissensstand des Mitarbeiters bewältigt werden können“ [Hin13, S. 291].

2.5.3. Analyse des Bauteilspektrums

Die Komplexität und die Vielfältigkeit des Bauteilspektrums, mit dem sich ein Unternehmen der MRO-Branche in der Regel konfrontiert sieht, soll nachfolgend anhand der größten Einzelkomponente eines Flugzeugs – dem Fahrwerk – aufgezeigt werden.

Bauteilvielfalt, Bauteilgröße und Bauteilgeometrie Für die Anordnung der Fahrwerke bei Passagierflugzeugen hat sich die Dreipunktanordnung durchgesetzt, sodass sich ein Fahrwerkssatz in seiner klassischen Variante aus zwei Hauptfahrwerken, wie in Abbildung 2.19 (a) dargestellt, und einem Bugfahrwerk, wie in Abbildung 2.19 (b) dargestellt, zusammensetzt. Die Hauptfahrwerke, die kurz hinter dem Schwerpunkt des Flugzeugs etwa auf Tragflächenhöhe angeordnet sind, müssen den Großteil der wirkenden Kräfte bei der Landung aufnehmen. Das im vorderen Bereich des Flugzeugs platzierte Bugfahrwerk dient vornehmlich zum Manövrieren des Flugzeugs auf dem Grund.

Ein einzelnes Fahrwerk besteht aus über 200 verschiedenen herstellerspezifischen Einzelkomponenten, die im Laufe der Fahrwerksüberholung eine Vielzahl an Instandhaltungsprozessen durchlaufen müssen. Eine Auswahl der Komponenten zeigt Abbildung 2.20. Ab-

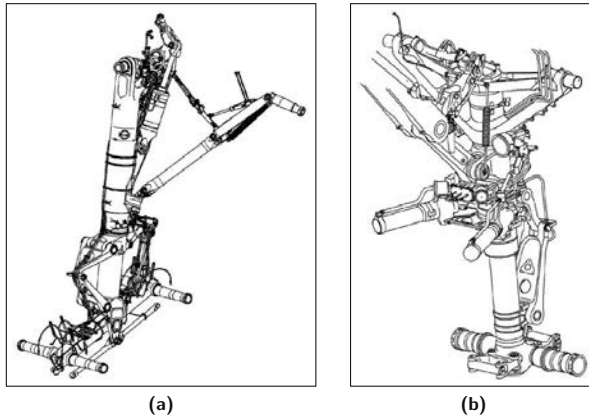


Abbildung 2.19.: Airbus A340 Fahrwerke des Herstellers Messier-Dowty [MD02]: (a) Main Landing Gear; (b) Nose Landing Gear



Abbildung 2.20.: Beispielhafte Auswahl von Bauteilen eines Flugzeugfahrwerks

gebildet ist mit dem sogenannten Mainfitting (unten rechts) unter anderem die größte Hauptkomponente eines Fahrwerks. Das Mainfitting eines Airbus A340 weist eine Länge von 3.150 mm, einen Rotationsdurchmesser von 2.500 mm und ein Gewicht von etwa 760 kg auf. Erkennbar in der beispielhaften Bauteilauswahl ist zum einen die häufige Existenz mindestens einer Symmetrieebene der Bauteile, die darüber hinaus meist über einen zylindrischen Grundkörper verfügen. Zum anderen veranschaulicht die Darstellung der Komponenten die komplexe Geometrie vieler Bauteile, in Form vieler Ösen, Bohrungen, Laschen und Hinterscheidungen. Festgehalten werden muss, dass digitale Konstruktionsdaten aller Bauteile lediglich deren Herstellern zur Verfügung stehen.

Oberflächeneigenschaften Die Oberflächen der Fahrwerksbauteile bestehen aus mehreren Schichten verschiedener Materialien, deren Aufbau abhängig vom Grundmaterial variiert. Nur durch eine solche aufwändige Beschichtung kann die Widerstandsfähigkeit gegenüber den extremen Witterungsbedingungen sichergestellt werden, denen die Bauteile während ihrer Betriebszeit ausgesetzt sind. Abbildung 2.21 zeigt den Aufbau der Oberflächenbeschichtung eines Mainfittings mit einem Grundmaterial aus HHT-Stahl. Für die



Abbildung 2.21.: Aufbau der Oberflächenbeschichtung des Mainfitting eines Fahrwerks mit einem Grundmaterial aus HHT-Stahl

einzelnen Schichten verwendet jeder Flugzeug- und Fahrwerkhersteller und jeder MRO-Dienstleister Materialien unterschiedlicher Hersteller.

Auch die Schichtdicken und -farben werden nicht einheitlich aufgetragen und verwendet. Darüber hinaus können sich über die Lebenszeit der Bauteile auch verschiedene Mischfarben der Oberflächenbeschichtungen bilden. In der Summe kann bei der Instandhaltung dieser Komponenten nicht von einer standardisierten Oberflächenbeschaffenheit ausgegangen werden. Hinzu kommen während des Betriebs auftretende Verschmutzungen, lokale Beschädigungen oder Ausbesserungen, die zu einem stark schwankenden Zustand der Bauteiloberflächen führen.

2.5.4. Analyse repräsentativer Instandhaltungsprozesse

Nachfolgend sollen die spezifischen Charakteristiken der Instandhaltungsprozesse auf Werkstattebene dargestellt und herausgearbeitet werden. Dies erfolgt anhand der Analyse zweier repräsentativer Prozesse, die elementar für die Instandhaltung aller Fahrwerkskomponenten sind. Bei den Prozessen handelt es sich um einen manuellen Bearbeitungsprozess zur Reparatur kleiner und mittlerer Bauteile von Flugzeugfahrwerken und um einen teilautomatisierten Bearbeitungsprozess für Großbauteile. Aus Gründen der Geheimhaltung wird nur ein Ausschnitt der realen Produktionsdaten betrachtet. Die Auswertung dieser Daten genügt jedoch, um die Charakteristiken der Prozesse unterschiedlicher Automatisierungsgrade herauszuarbeiten und die Defizite manueller und teilautomatisierter MRO-Prozesse aufzuzeigen.

Beide Bearbeitungsprozesse befassen sich mit der Zerspanung mittels Fräsmaschinen, um lokale Beschädigungen in Bohrungen und an den Planflächen der Bauteile aufzuarbeiten. Einen Einblick in die praktische Vorgehensweise gibt Abbildung 2.22. Falls bei der Befundung behebbare Beschädigungen, beispielsweise in Form von Korrosion, identifiziert werden, so werden diese auf dem Bauteil und in den mitzuführenden Instandhaltungsdokumenten markiert. Anschließend werden diese händisch über ein HMI (human machine interface) in die Prozessplanungssoftware eingetragen, in der daraufhin automatisiert ein Arbeitsauftrag für die Behebung der Beschädigungen generiert wird. Zur Ausarbeitung der Beschädigungen werden die Bauteile samt Arbeitsauftrag in die Fräselei transportiert.

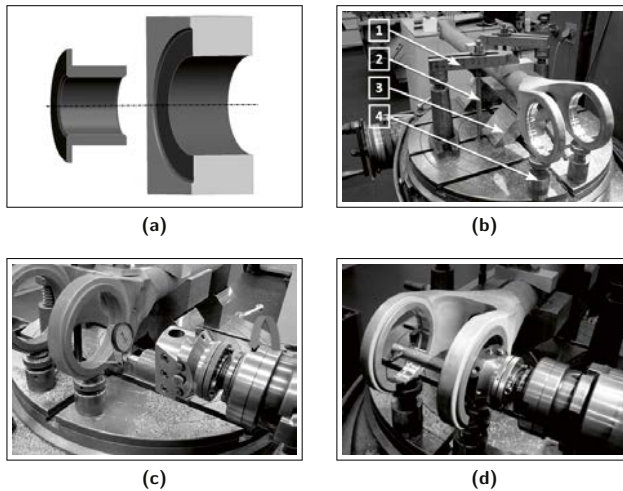


Abbildung 2.22.: Ausarbeitung lokaler Beschädigungen an Bohrungen und deren Planflächen aus [Zin14]: (a) Flächen des Grundmaterials (mit einzusetzender Buchse), die bei Beanstandungen bearbeitet werden müssen; (b) Fixierung der Komponente gegenüber einer Universalfräsmaschine mit Spannutensilien (1-4); (c) Rundlaufprüfung einer positionierten und fixierten Komponente mittels eines Fühlhebelmessgerätes; (d) Hinterschnittbearbeitung der Bohrung einer Fahrwerkskomponente

Diese zustandsabhängige Folge von Teilprozessschritten spiegelt die Charakteristiken der Jobshop-Fertigung aus Abschnitt 2.2.3 wieder.

Ausgehend vom Arbeitsauftrag kann der Facharbeiter in der Fräseerei die Arbeitskarte aus dem Dokumentenmanagementsystem aufrufen. Basierend auf Arbeitsauftrag und -karte ist es Aufgabe des Facharbeiters, die Bearbeitung entsprechend der Anforderungen durchzuführen und die lokalen Beschädigungen aufzuarbeiten. Für die Zerspanung kleiner und mittelgroßer Bauteile stehen drei-achsige manuell geführte Universalfräsmaschinen zur Verfügung. Für die Zerspanung von Großbauteilen kann eine fünf-achsige CNC-Fräsmaschine verwendet werden. Der Facharbeiter verfügt in der Regel über eine Berufsausbildung als Zerspanungsmechaniker und ggf. weitere MRO-spezifische Qualifikationen. Sein Spezialisierungsgrad kann, je nach Komplexität der durchzuführenden Tätigkeit, auf niedrig bis mittel eingestuft werden. Ausnahmen bilden die CNC-Fräsmaschinen, die durch Facharbeiter der Spezialisierungsgrade mittel bis hoch bedient und programmiert werden.

Beiden Bearbeitungsprozessen ist gemeinsam, dass das zu bearbeitende Bauteil vor der eigentlichen Bearbeitung in einer bestimmten Lage ausgerichtet und fixiert werden muss [WB05]. Die Fixierung wird auch als Spannen bezeichnet und bezieht sich auf das „vorübergehende [...] Festhalten (Sichern) eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position unter Beteiligung von Kräften“ [Hes00, S. 183], wobei sich „Spannkräfte und Spannungsmomente bzw. die durch sie erzeugten Haltekräfte [...] unter Beachtung von Sicherheitsfaktoren mit den Bearbeitungskräften und -momenten im statischen Gleichgewicht befinden“

[Hes00, S. 183] müssen. Für das Spannen und Ausrichten der Fahrwerksbauteile, wie in Abbildung 2.22 (b) dargestellt, kann der Facharbeiter auf ein umfangreiches Sortiment verschiedenster Betriebsmittel nach dem T-Nutsystem zurückgreifen. Ein solches eignet sich vor allem, um große Spann- und Bearbeitungskräfte aufzunehmen, und ermöglicht die stufenlose Positionierung aller Elemente in Richtung der Nuten [TW13]. Diese setzen sich primär aus einer Vielzahl genormter Spannelemente und partiell aus individuell gefertigten Spezialelementen zusammen. Ein solches umfangreiches Sortiment ermöglicht zwar die benötigte Flexibilität, deren Einsatz ist aber üblicherweise auch mit erheblichem manuellem Aufwand verbunden [WB05]. Konkrete Instruktionen zur Ausrichtung und Spannung der Bauteile existieren nicht; abgesehen von Vorgaben des Herstellers zur zerstörungsfreien Positionierung. Die Spannung und Ausrichtung der vielzähligen unterschiedlichen Bauteile erfolgt dementsprechend für jeden Arbeitsauftrag individuell und basiert primär auf dem Best-Practice-Erfahrungsschatz eines Facharbeiters. Die korrekte Positionierung wird vor dem eigentlichen Bearbeitungsstart bei Universalfräsmaschinen mittels eines Fühlhelbmessgerätes [DIN85][#] geprüft und muss häufig korrigiert werden. Dies führt meist zu einer iterativen Durchführung der Arbeitsschritte *Positionieren* und *Messen*. Die Bearbeitung kann daher für beide Prozesse als nicht-standardisiert klassifiziert werden. Da bei Verwendung einer manuell geführten Universalfräsmaschine ausschließlich menschliche Arbeitskraft und Werkzeuge genutzt werden, kann der Automatisierungsgrad als nicht-automatisiert bezeichnet werden. Gemäß der Kategorisierung nach [Neb11] handelt es sich um eine maschinisierte Bearbeitung. Der Prozess zur Zerspanung von Großbauteilen mittels einer CNC-Fräsmaschine kann, aufgrund automatisiert ausführbarer Programme, als teilautomatisiert klassifiziert werden. Darüber hinaus kann hierbei das Bearbeitungsprogramm, nach der automatisierten Lagemessung des Bauteils, an dessen aktuelle Position und Lage adaptiert werden.

Betrachtet man die Produktionsdaten der beiden beschriebenen Prozesse über den Zeitraum eines Jahres, so lassen sich klar die Charakteristiken und Defizite der MRO-Prozesse auf Werkstattebene identifizieren. Dazu wird in den Abbildungen 2.23 und 2.24, jeweils für alle bearbeiteten Bauteile i , im unteren Diagramm die Anzahl der Bearbeitungen s_i des gleichen Bauteils dargestellt. Das mittlere Diagramm visualisiert, in Form eines Fehlerbalkendiagramms, die reale mittlere Bearbeitungszeit \bar{t}_i sowie den zugehörigen Variationskoeffizienten

$$\text{VarK}(\bar{t}_i) = \frac{\sigma_{\bar{t}_i}}{\bar{t}_i},$$

mit der Standardabweichung der mittleren Bearbeitungszeit $\sigma_{\bar{t}_i}$. Im oberen Fehlerbalkendiagramm sind die mittlere Abweichung der realen gegenüber der geplanten Bearbeitungszeit t^{PLAN} gemäß

$$\overline{\Delta t}_i = \bar{t}_i^{PLAN} - \bar{t}_i$$

dargestellt sowie die zugehörigen Variationskoeffizienten

$$\text{VarK}(\overline{\Delta t}_i) = \frac{\sigma_{\overline{\Delta t}_i}}{|\overline{\Delta t}_i|},$$

mit der Standardabweichung, in Form der mittleren Abweichung der Bearbeitungszeit $\sigma_{\overline{\Delta t}_i}$. Positive Werte der mittleren Abweichung der Bearbeitungszeit $\overline{\Delta t}_i$ bedeuten demzufolge eine kürzere reale Prozessdauer. Negative Werte zeigen eine längere reale Prozessdauer als ursprünglich geplant. Die Zeiteinheit der Daten ist in willkürlicher Einheit a. u. (engl. arbitrary units) angegeben.

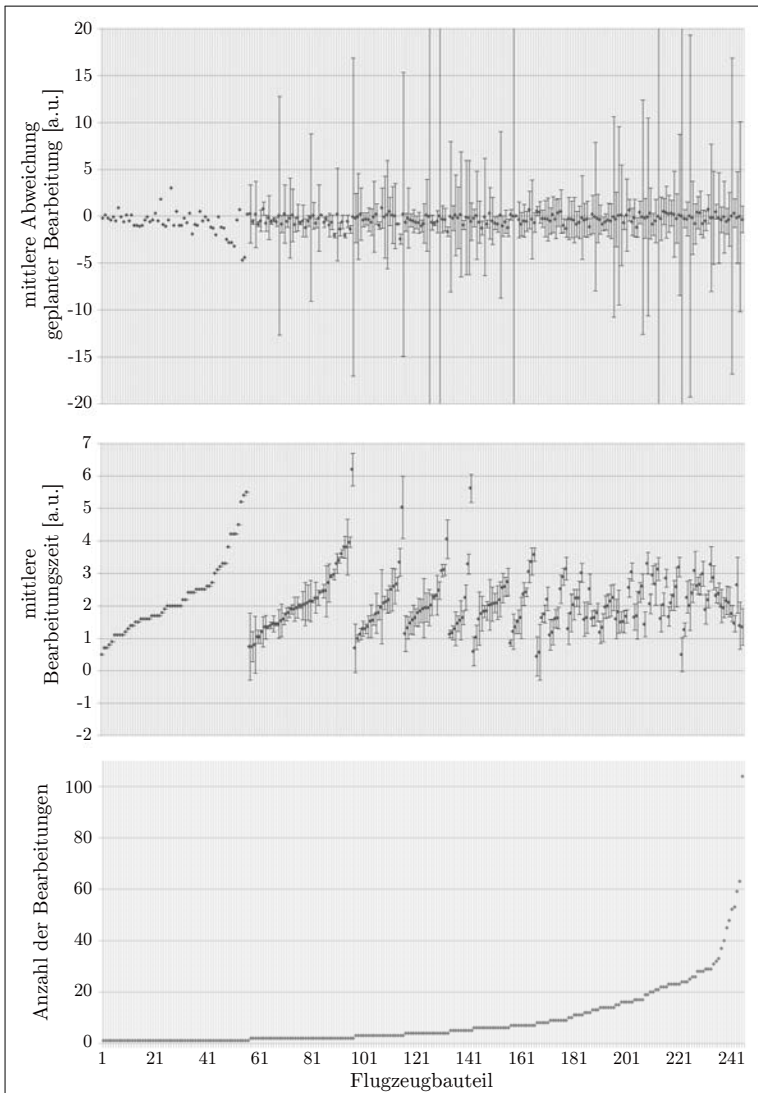


Abbildung 2.23.: Prozessdaten eines nicht-automatisierten Instandhaltungsprozesses: (unten) Anzahl der Bearbeitungen des gleichen Bauteils; (Mitte) mittlere Bearbeitungszeit mit Variationskoeffizienten; (oben) mittlere Abweichung der realen von der geplanten Bearbeitungszeit mit Variationskoeffizienten

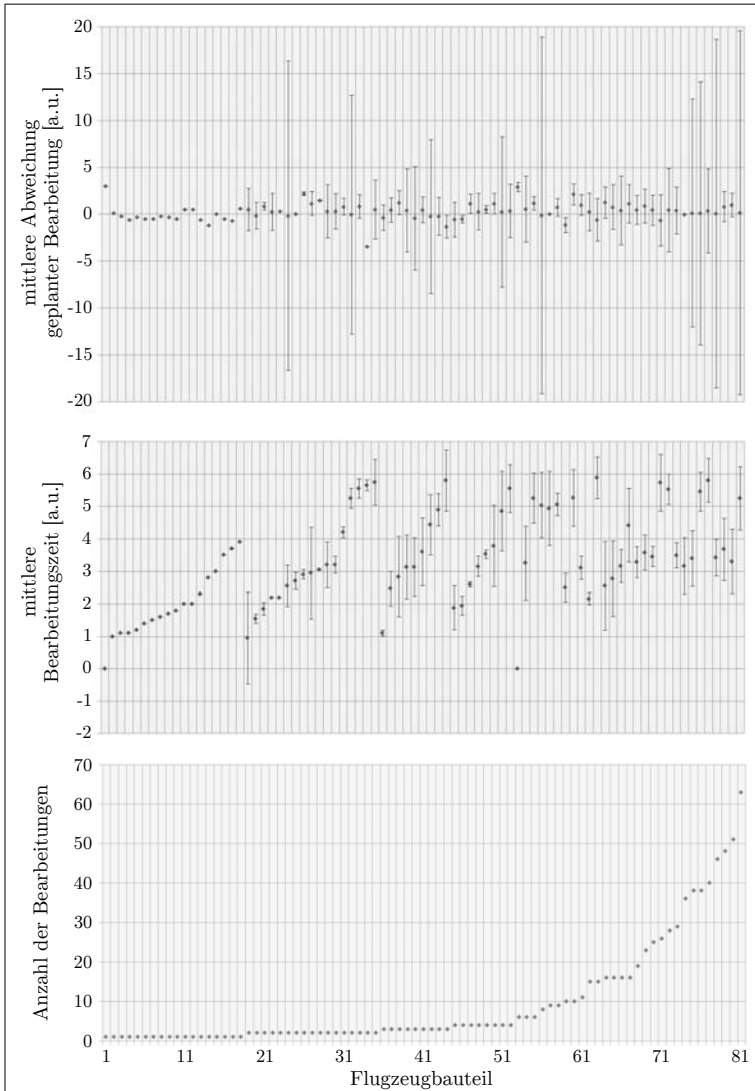


Abbildung 2.24.: Prozessdaten eines teilautomatisierten Instandhaltungsprozesses: (unten) Anzahl der Bearbeitungen des gleichen Bauteils; (Mitte) mittlere Bearbeitungszeit mit Variationskoeffizienten; (oben) mittlere Abweichung der realen von der geplanten Bearbeitungszeit mit Variationskoeffizienten

Tabelle 2.1.: Numerische Werte der Prozessdaten des nicht-automatisierten Prozesses

Bauteil i	57	58	59	60	61	240	241	242	243	244
s_i	2	2	2	2	2	52	53	59	63	104
$\text{VarK}(\bar{t}_i)$	1,04	0,47	0,88	0,20	0,22	0,25	0,26	0,86	0,73	0,56
$\text{VarK}(\Delta \bar{t}_i)$	3,11	0,24	33,54	0,25	1,13	16,86	1,51	4,90	10,16	1,41

Tabelle 2.2.: Numerische Werte der Prozessdaten des teilautomatisierten Prozesses

Bauteil i	19	20	21	22	23	77	78	79	80	81
s_i	2	2	2	2	2	40	46	48	51	63
$\text{VarK}(\bar{t}_i)$	1,41	0,13	0,19	0	0	0,67	0,56	0,95	0,99	0,98
$\text{VarK}(\Delta \bar{t}_i)$	2,26	1,41	0,42	1,98	0	4,48	18,59	1,62	1,26	19,41

Charakteristiken der wiederkehrenden Einzelproduktion Den Instandhaltungsprozess zur Reparatur kleiner und mittlerer Fahrwerksbauteile durchlaufen deutlich mehr verschiedene Komponenten (244) als den Prozess zur Reparatur großer Bauteile (81). Die geringe Anzahl der Bearbeitung gleicher Bauteile zeigt, bezogen auf den langen Beobachtungszeitraum von einem Jahr, den Repetitionstyp der Produktion in Form der Einzelfertigung in Losgröße-1. Sie liegt für den manuellen Prozess im Mittel bei 8,8 und für den teilautomatisierten bei 9,5. Lediglich wenige Bauteile zeigen deutliche Ausreißer nach oben, deren Häufigkeit, bezogen auf die Länge des betrachteten Zeitraums, ebenfalls als Losgröße-1 aufgefasst werden kann.

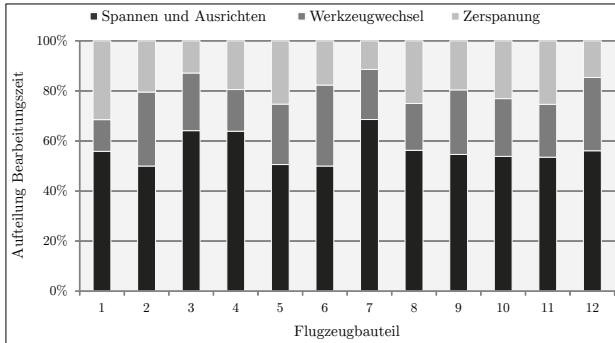
Die Produktionsdaten zeigen zudem, dass 77% der Bauteile des manuellen und 78% der Bauteile des teilautomatisierten Prozesses im betrachteten Zeitraum mehr als einmal bearbeitet werden. Dies verdeutlicht den hohen Anteil der wiederkehrenden Bearbeitung für beide Prozesse. Des Weiteren lässt sich den Produktionsdaten entnehmen, dass die Potenziale, die eine wiederkehrende Bearbeitung grundsätzlich bietet, nicht effektiv genutzt werden. Wäre dies der Fall, so müsste der Variationskoeffizient der mittleren Bearbeitungszeit $\text{VarK}(\bar{t}_i)$ für Bauteile mit einer hohen Anzahl wiederkehrender Bearbeitungen s_i gegenüber denen mit geringer Anzahl signifikant kleiner ausfallen. Die in den Tabellen 2.1 und 2.2 angegebenen numerischen Werte beider Prozesse für die 5 jeweils am geringsten und am häufigsten wiederkehrend bearbeiteten Bauteile zeigen jedoch, dass der Variationskoeffizient nicht mit der Anzahl wiederkehrender Bearbeitungen korreliert.

Schwankungen der Bearbeitungszeit Die in den Fehlerbalkendiagrammen der mittleren Bearbeitungszeiten dargestellten Variationskoeffizienten für alle Komponenten, haben eine für beide Prozesse signifikante Größenordnung. Sie beträgt im Mittel für den Prozess zur Reparatur kleiner und mittlerer Bauteile nach Abbildung 2.23

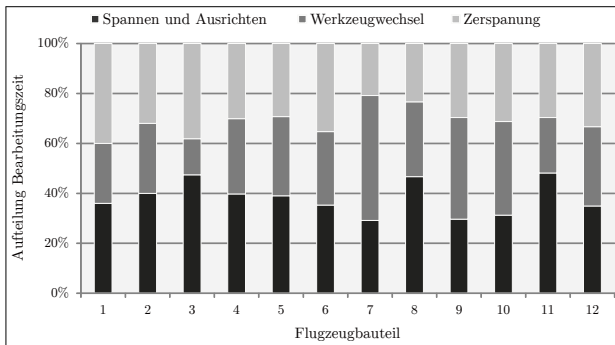
$$M_{\text{VarK}(\bar{t}_i)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{VarK}(\bar{t}_i) = 0,29$$

und für den zur Reparatur großer Bauteile nach Abbildung 2.24

$$M_{\text{VarK}(\bar{t}_i)} = 0,48.$$



(a)



(b)

Abbildung 2.25.: Aufteilung der Gesamtbearbeitungszeit der Fräsprozesse für 12 exemplarisch gewählte Flugzeugkomponenten: (a) manueller nicht-standardisierter Prozess; (b) teilautomatisierter nicht-standardisierter Prozess

Darüber hinaus weisen 15% aller Variationskoeffizienten des Prozesses zur Reparatur kleiner und mittlerer Bauteile Werte größer 1 auf. Für den Prozess zur Reparatur großer Bauteile nehmen knapp 9% aller Variationskoeffizienten Werte größer 10 an. Die Daten bestätigen den Eindruck, dass die Bearbeitungsdauer eines Bauteils stets großen Schwankungen unterliegt. Ursache dafür sind einerseits der variierende Zustand der Bauteile und der daraus resultierende variierende Umfang durchzuführender Reparaturarbeiten. Andererseits hat insbesondere die nicht-standardisierte manuelle Positionierung und Fixierung der Komponenten einen großen Einfluss auf die Bearbeitungszeit beider Prozesse. Dies zeigt die folgende detaillierte Betrachtung der beiden MRO-Prozesse.

Die Abbildungen 2.25(a) und 2.25(b) zeigen in diesem Zusammenhang für beide Instandhaltungsprozesse die Aufteilung der Gesamtbearbeitungszeit in die Teilprozesse *Spannen und Ausrichten*, *Werkzeugwechsel* und *Zerspanung* für 12 repräsentativ gewählte

Bauteile. Die dargestellten Werte wurden im Zuge einer Prozessanalyse sowie der gezielten Durchführung von Experimenten in der Produktionsumgebung akquiriert. Beide Prozesse haben gemeinsam, dass der Vorgang *Spannen und Ausrichten*, wie eingangs beschrieben, manuell von einem Facharbeiter durchgeführt werden muss. Der *Werkzeugwechsel* wird beim teilautomatisierten Fräsprozess automatisiert ausgeführt, beim manuellen Fräsprozess ebenfalls durch den Facharbeiter. Erkennbar ist, dass der Anteil des Teilprozesses *Spannen und Ausrichten* beim manuellen Fräsprozess über 50% der Gesamtbearbeitungszeit beträgt. Für einige Bauteile beträgt dieser Anteil gar über 60%. Dieser überwiegende Anteil an der Gesamtbearbeitungszeit resultiert aus der mehrfach notwendigen Umpositionierung eines Bauteils während der Bearbeitung. Die eigentliche Bearbeitung der Fahrwerkskomponenten, in Form der Zerspanung, weist lediglich einen Anteil von 15% – 25% auf. Beim teilautomatisierten Reparaturprozess kann, aufgrund der adaptiven Anpassung der Maschinenprogramme an die Positionierung eines Bauteils und des größeren Arbeitsraumes der Maschine, auf eine Umpositionierung verzichtet werden. Auch die Teilprozesse *Werkzeugwechsel* und *Zerspanung* können, nach der erfolgten einmaligen Positionierung und Ausrichtung eines Bauteils, automatisiert ausgeführt werden. Dennoch weist der teilautomatisierte Reparaturprozess mit Werten von etwa 40% immer noch einen signifikanten Anteil an manuellen, nicht-standardisierten Handling-Tätigkeit auf. Die Gesamtbearbeitungszeit ist daher, neben dem Zustand eines Bauteils und dem Umfang notwendiger Reparaturmaßnahmen, stark von seiner Komplexität und der Vorgehensweise des Facharbeiters zur Ausrichtung und Fixierung abhängig.

Planbarkeit der Bearbeitungszeit Betrachtet man die mittleren Abweichungen der Bearbeitungszeiten $\overline{\Delta t_i}$ sowie die zugehörigen Variationskoeffizienten in den Abbildungen 2.23 und 2.24, so ist ebenfalls die Komplexität und hohe Varianz der MRO-Prozesse auf Werkstattebene erkennbar. Die hohen Variationskoeffizienten in der Abweichung der Planungszeit beider Prozesse resultieren aus dem höchst volatilen Bauteilzustand und dem schwer abschätzbaren Umfang der iterativen Reparaturprozesse, die sich aus Fräsbearbeitung und Sichtprüfung zusammensetzen. Weiterer Einflussfaktor ist bei dem hohen Anteil an manuell auszuführenden, nicht-standardisierten Tätigkeiten ebenfalls der Facharbeiter samt seiner Erfahrung, Vorgehens- und Herangehensweise.

Bei detaillierterer Betrachtung der Daten lässt sich qualitativ festhalten, dass die mittleren Abweichungen der Bearbeitungszeiten für den manuellen Bearbeitungsprozess überwiegend im negativen Wertebereich liegen. Die reale Bearbeitungszeit überschreitet folglich häufig die veranschlagte Dauer. Der Mittelwert der mittleren Abweichungen

$$M_{\overline{\Delta t}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overline{\Delta t_i} = -0,4$$

bestätigt diesen Eindruck. Der zugehörige mittlere Variationskoeffizient beträgt

$$M_{\text{VarK}(\overline{\Delta t_i})} = 3,49.$$

Die Planung des teilautomatisierten Instandhaltungsprozesses, bei dem die mittlere Abweichung der Bearbeitungszeit mit einem Mittelwert

$$M_{\overline{\Delta t}} = 0,26$$

überwiegend im positiven Wertebereich angesiedelt ist, lässt eine bessere Planbarkeit vermuten. Der mittlere Variationskoeffizient von

$$M_{\text{VarK}(\overline{\Delta t_i})} = 2,71$$

liegt jedoch in ähnlicher Größenordnung wie der des nicht-automatisierten Prozesses und widerlegt diese Vermutung. Beide Werte zeigen die immensen Schwankungen und die entsprechende hohe Ungenauigkeit der Planung der Bearbeitungszeiten.

Die Betrachtung der numerischen Werte der Produktionsdaten beider Prozesse in den Tabellen 2.1 und 2.2 zeigt, dass der Variationskoeffizient der mittleren Abweichungen der Bearbeitungszeiten $\text{VarK}(\overline{\Delta t_i})$ nicht mit der Anzahl der Bearbeitungen s_i korreliert. Eine größere Anzahl wiederkehrender Bearbeitungen führt folglich nicht zu einer besseren Planbarkeit dieser.

2.5.5. Zusammenfassung

Die Analyse der Produktions- und Prozessstruktur der Instandhaltung anhand des Fallbeispiels bestätigt die mittels der Literaturrecherche in Abschnitt 2.4 identifizierten Charakteristiken der MRO-Branche. So erfolgt die Organisation der Produktionsprozesse nach dem Funktionsprinzip der Werkstattfertigung. Der Repetitionstyp der Fertigung kann als Einzelproduktion in Losgröße-1 aufgefasst werden. Erwartungsgemäß kann der Ablauftyp der auftragsgebundenen Fertigung der Jobshop-Fertigung zugeordnet werden. Die detaillierte Auswertung zweier exemplarischer Instandhaltungsprozesse zeigt, dass diese auf einem großen Anteil manueller Tätigkeiten basieren, für die Arbeitskräfte überwiegend in mittlerem und niedrigem Spezialisierungsgrad erforderlich sind. Die verwendeten Betriebsmittel können als Universalmaschinen klassifiziert werden, die überwiegend als nicht-automatisiert und partiell als teilautomatisiert charakterisiert werden können.

Darüber hinaus zeigt die Analyse von Struktur und Prozessen auf Werkstattebene die generell existenten Defizite der Instandhaltungsprozesse und die Herausforderungen, mit denen sich die in der MRO-Branche tätigen Unternehmen konfrontiert sehen. Moderne Softwareprodukte innerhalb des Unternehmens werden erfolgreich für die oberen Ebenen der Automatisierungspyramide eingesetzt und partiell durch proprietäre Lösungen unter Verwendung von Standardsoftware ergänzt. Unterhalb der Betriebsleitebene können jedoch unternehmensweit keine prozessübergreifend eingesetzten Softwareprodukte mehr ausgemacht werden. Dies betrifft alle Steuerungsebenen in der Automatisierungspyramide. Im Gegensatz zu Produktionsprozessen im Bereich der Massenproduktion, bei denen über die Steuerungsebenen vollautomatisierte Maschinen und Anlagen auf Prozessebene gesteuert werden, kann die Durchführung der Instandhaltungsprozesse nicht zentral gesteuert werden. Unter Verwendung von Universalmaschinen erfolgt so die stark auftrags-, komponenten- und zustandsabhängige Bearbeitung aller Flugzeugkomponenten primär in Losgröße-1. Dabei obliegt es dem Facharbeiter einerseits, manuell mit den Softwaresystemen auf Betriebsleitebene zu kommunizieren. Andererseits fällt aber auch die Steuerung und Durchführung auf Prozessebene gänzlich in seinen Aufgabenbereich und ist überwiegend von dessen Fach-, Prozess- und Erfahrungswissen abhängig. Rahmenbedingungen für die Bearbeitung werden einzig durch das zu erzielende Prozessergebnis und einzuhaltende Prozessparameter spezifiziert. Eine standardisierte Durchführung der Instandhaltungsprozesse, deren Teilprozesse oder partieller Arbeitsschritte, konnte ebenso wenig identifiziert

werden wie IT-basierte Systeme zur Konservierung und Verwaltung von Best-Practice-Erfahrung. Systeme zur Unterstützung der Facharbeiter bei der Prozessdurchführung sind nicht vorhanden. Die Auswertung der Prozessdaten zeigt die aus diesen Umständen resultierenden, starken Schwankungen der Bearbeitungszeit und die Schwierigkeit der Planung realistischer Zeiten.

2.6. Ausgangssituation und Anforderungen der MRO-Branche

Die im Zuge der Literaturrecherche und durch die Analyse des Fallbeispiels identifizierten Charakteristiken und Defizite der Instandhaltungsprozesse sollen in diesem Unterkapitel zusammengefasst sowie anhand der Ergebnisse zweier wissenschaftlicher Studien untermauert werden. Dazu zählt zum einen die vom Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) in Form eines Onlinefragebogens durchgeführte Studie [URBVD11]. Zum anderen die Studie des Instituts für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart (ILA) [RS11]. Beide wurden zwischen 2010 und 2011 unter den MRO-Unternehmen des deutschen Marktes durchgeführt.

In die Studie des Fraunhofer-Instituts wurden 309 Unternehmen einbezogen. Sie setzen sich sowohl aus kleinen als auch mittelgroßen und großen Unternehmen zusammen, die sich ungefähr zu gleichen Teilen in unternehmenseigene MRO-Dienstleister, OEM MRO-Dienstleister und Drittanbieter differenzieren. „Insgesamt kann festgehalten werden, dass die befragten Unternehmen im Hinblick auf das eigene sowie das Tätigkeitsfeld der Kunden sämtliche für den MRO-Bereich entscheidende Industrien widerspiegeln. Zudem sind alle Unternehmensklassen, sowohl nach Umsatz als auch nach Mitarbeiterzahl unterteilt, in einem realitätsnahen Verhältnis vertreten“ [URBVD11, S. 6]. Dies verdeutlicht die Relevanz und Repräsentativität der Umfrageergebnisse, die nachfolgend zusammenfassend – bezogen auf den Kontext dieser Arbeit – dargestellt werden.

Ergänzt werden die Ergebnisse erstgenannter Studie durch die vom Institut für Luftfahrtantriebe veröffentlichte Studie, deren Anzahl der Teilnehmer nicht spezifiziert wurde. Sie lassen sich mit 48% überwiegend dem Segment der kleinen und mittelständischen Unternehmen mit einer Größe von 100 bis 500 Mitarbeitern zuordnen. MRO-Unternehmen mit einer Mitarbeiterzahl von über 1500 machen mit 26% den zweitgrößten Anteil der Teilnehmer aus und Unternehmen mit einer Mitarbeiterzahl zwischen 500 bis 1500 Mitarbeitern bilden mit 17% die dritte Gruppe der Befragten. Den kleinsten Anteil bilden mit 9% die MRO-Dienstleister, die dem Segment kleiner Unternehmen zuzuordnen sind. „Von den befragten Unternehmen agieren 74% global, 17% sind im europäischen Markt aktiv und 9% beschränken sich auf regionale Märkte“ [RS11, S. 243].

2.6.1. Prozess- und Organisationsstruktur der MRO-Unternehmen

Die wesentlichen Charakteristiken der MRO-Prozesse, die bereits in den vorangehenden Abschnitten dieses Kapitels herausgearbeitet werden konnten, können auch durch die Ergebnisse beider Umfragen bekräftigt werden. Dazu zählen die starke Reglementierung, die Flexibilität der Teilprozesse, Repetitionstyp und Organisationsstruktur der Produktion sowie die Durchführung der Instandhaltungsarbeiten.

Reglementierung der MRO-Betriebe Die Ergebnisse der ILA-Umfrage belegen die starke Reglementierung der Instandhaltung von Flugzeugkomponenten. So bearbeiten 77% der Unternehmen die Produkte nach den Vorgaben des Herstellers, bei 58% dieser sind die Richtlinien des Betreibers (Operator) und bei 54% behördliche Verordnungen entscheidend für den Wartungsablauf. Lediglich 27% der befragten Unternehmen arbeiten der Studie zufolge unabhängig und nach eigenen Richtlinien [RS11].

Flexibilität Die hohe erforderliche Flexibilität der Instandhaltungsprozesse wird auch in den Ergebnissen der Studie des ILA deutlich: „Hinsichtlich der Arbeitsinhalte der Aufträge fallen bei 47% der befragten Unternehmen durchschnittlich schwankende Arbeitsinhalte (40%–59% Abweichung der Arbeitsinhalte) an und 21% müssen mit jeweils eher stark (60%–80% Abweichung der Arbeitsinhalte) bis stark (> 80% Abweichung der Arbeitsinhalte) unterschiedlichen Arbeitsinhalten umgehen“ [RS11, S. 243].

Repetitionstyp und Organisationsstruktur der Produktion Der im Zuge der Literaturrecherche identifizierte und in der Analyse des Fallbeispiels erwartungsgemäß vorgefundene Repetitionstyp der Produktion wird ebenfalls durch die Umfrageergebnisse der Studie des ILA bestätigt. So produzieren 53% der Unternehmen in Form der Einzel- und Kleinserienfertigung und „41% sind in Form einer Einmalproduktion mit kleinen Losen < 10 und einer Wiederholhäufigkeit gleich 1 strukturiert“ [RS11, S. 243]. Auch bzgl. der Organisation der Fertigung herrscht große Übereinstimmung zwischen den befragten Unternehmen. Die Verfasser der Studie fassen ihre Ergebnisse hinsichtlich der Organisationsstruktur wie folgt zusammen: „Die überwiegend verwendete Organisationsform als Werkstattfertigung zeigt, dass – bedingt durch die unterschiedlichen Auftragsvolumina und -inhalte – eine serielle Organisation der Fertigung schwer umzusetzen ist“ [RS11, S. 247].

Durchführung der Instandhaltungsarbeiten Bezeichnend für den in Theorie und Praxis identifizierten hohen Anteil an manueller Arbeit ist, dass 45% der Umfrageteilnehmer der Fraunhofer-Studie die direkten Personalkosten als größten Kostentreiber von MRO-Leistungen identifizieren. So werden den Autoren zufolge beispielsweise die Reparaturleistungen „bisher zu etwa zwei Dritteln manuell und nur zu einem Drittel maschinell durchgeführt“ [URBVD11, S. 30].

2.6.2. Defizite der MRO-Prozesse

Die Analyse des Fallbeispiels, im Hinblick auf die eingesetzten IT-Systeme in der Produktion, zeigte die Existenz von Planungssystemen in den beiden obersten Hierarchieebenen, in Form von Standardsoftware und partiell eingesetzten proprietären Lösungen. Die Planung, Durchführung und Steuerung der eigentlichen Instandhaltungsprozesse liegt gänzlich in der Hand des Facharbeiters. Außer den Auftragsdokumenten in Papierform sowie der Möglichkeit, einzuhaltende Rahmenbedingungen des Prozesses in Form von Arbeitskarten abzurufen, erhält dieser keine weitere IT-seitige Unterstützung.

Die Ergebnisse der Studie des ILA, die in Abbildung 2.26 aufgeführt sind, zeigen, dass diese Vorgehensweise in vielen MRO-Unternehmen gängige Praxis ist. Demnach werden, bezüglich der Planung und digitalen Unterstützung von MRO-Maßnahmen, die Problemfelder in der Überschneidung der eingesetzten Softwaresysteme (81%), der redundanten

Datenhaltung (81%), nicht gut vernetzten IT-Systemen (78%) und unvollständigen oder nicht aktuellen Daten (73%) gesehen. Diese Aspekte fassen die Autoren der Studie wie folgt zusammen: „Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Hauptnutzen der Planung und digitalen Unterstützung von MRO-Maßnahmen in der Zeit- und Kostenersparnis sowie einer höheren Transparenz liegt. Allerdings mangelt es häufig an einer guten Vernetzung der IT-Systeme und der Überschneidungsfreiheit“ [URBVD11, S. 28].

Die Betrachtung exemplarischer Instandhaltungsprozesse eines MRO-Dienstleisters im vorherigen Abschnitt verdeutlichte, dass eine Standardisierung der Prozesse auf Werkstattebene nicht gegeben ist. Ursache ist vor allem die erforderliche Flexibilität der zustandsabhängigen Bearbeitung eines großen Spektrums komplexer hochpreisiger Bauteile in Losgröße-1. Die eingesetzten Maschinen sind vor allem manuell bediente und partiell teilautomatisierte Universalmaschinen. Auch diesen Eindruck bestätigen die Umfrageergebnisse der IPK-Studie. Bezogen auf die Reinigungsprozesse werden von knapp einem Drittel der Unternehmen eine fehlende anwendungsgerechte Anlagentechnik (32%) neben einer schlechten Zugänglichkeit (46%) und zu hohen Kosten (23%) als Problemfelder genannt. Hinsichtlich der Reparaturprozesse beurteilen mehr als die Hälfte aller befragten Unternehmen die maschinelle Reparatur technisch als nicht realisierbar (55%) und nennen zu hohe Kosten (29%) sowie eine geringe Flexibilität der maschinellen Bearbeitung (29%) als weitere Problemfelder.

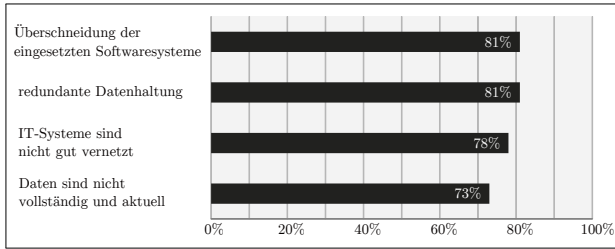
2.6.3. Potenziale der MRO-Prozesse zur Effizienzsteigerung

Neben der Benennung von Defiziten haben die befragten Unternehmen im Rahmen der Studie des Fraunhofer-Instituts auch Verbesserungspotenziale bewertet. Anhand dieser lassen sich einerseits ebenfalls die Bereiche großer Defizite aus Sicht der Umfrageteilnehmer lokalisieren und andererseits Ansatzpunkte für erfolgversprechende Lösungskonzepte ausmachen.

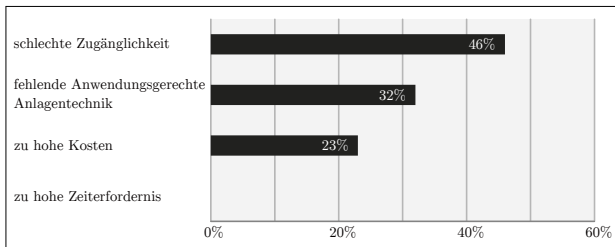
Potenziale quantitativer Einsparungen Zukünftig sehen die befragten Unternehmen das größte Einsparpotenzial hinsichtlich der Kosten für MRO-Dienstleistungen in der Senkung direkter Personalkosten (33%) sowie der Senkung von Materialkosten (29%) und Fehlerfolgekosten (23%). Diese Aussagen zeigen sowohl das Bestreben der in der MRO-Branche tätigen Unternehmen, als auch die offensichtlich vorhandenen Potenziale die MRO-Prozesse kosteneffizienter zu gestalten. Die größten Optimierungspotenziale im Angebotsspektrum werden in der Erhöhung der Flexibilität (46%) und der Erweiterung des Produktportfolios (42%) gesehen. Dies zeigt die „zunehmende Bedeutung von flexiblen MRO-Maßnahmen“ [URBVD11, S. 13], bewerten die Verfasser der Studie ihre Ergebnisse.

Die Betrachtung der beiden dominierenden Aussagen in Bezug auf Einspar- und Optimierungspotenziale, verdeutlicht die konträren Anforderungen, denen eine Lösung zur Effizienzsteigerung gerecht werden muss: Einerseits sollen die direkten Personalkosten zukünftig gesenkt werden, gleichzeitig soll aber auch die Flexibilität der Prozesse, die vor allem durch deren manuelle Ausführung erzielt werden kann, gesteigert werden.

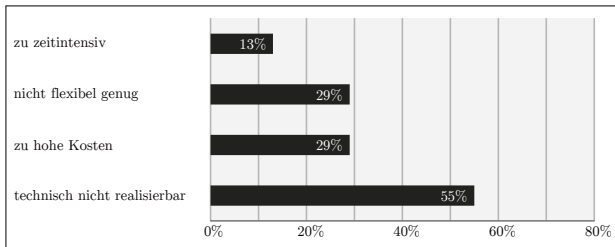
Potenziale qualitativer Verbesserungen Verbesserungspotenziale bezüglich der Planung und digitalen Unterstützung von MRO-Maßnahmen, die in Abbildung 2.27 (a) dargestellt sind, zeigen, dass diese von den Umfrageteilnehmern primär im Informations- und



(a)



(b)

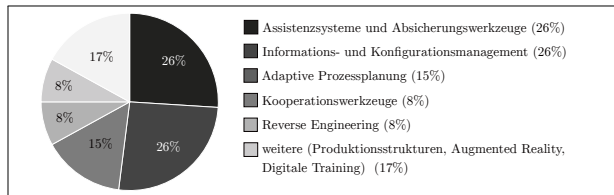


(c)

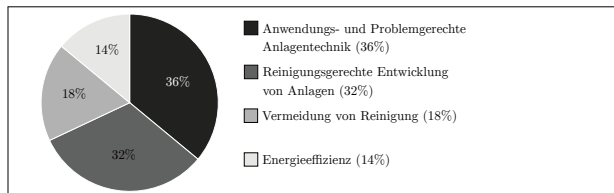
Abbildung 2.26.: Problemfelder der Instandhaltung nach [URBVD11]: (a) Planung; (b) Reinigung; (c) Reparatur

Konfigurationsmanagement (26%) und in Assistenzsystemen und Absicherungswerkzeugen (26%) gesehen werden. Die Aussagen konkretisieren einerseits das bereits identifizierte Defizit der IT-Unterstützung, insbesondere auf Prozessebene der Automatisierungspyramide. Andererseits werden auch vielversprechende Ansätze benannt, Effizienzsteigerungen zu realisieren. Die Angaben der Unternehmen zu ihren zukünftigen Handlungsabsichten bekräftigen zudem die Bemühungen der MRO-Dienstleister, den Defiziten im Bereich der Planung und digitalen Unterstützung entgegenzuwirken. Fast die Hälfte der Befragten gab an, bei Instandhaltungs-, Planungs- und Steuerungssystemen größere Änderungen zu planen (49%). Darüber hinaus sieht ein Fünftel der Umfrageteilnehmer zukünftig eine hohe Relevanz in der Automatisierung der Reparaturprozesse.

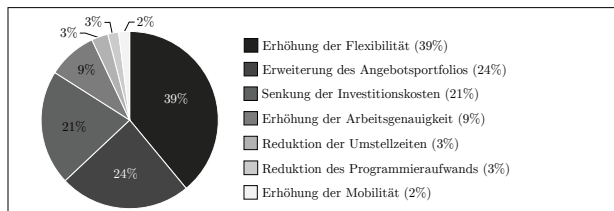
Die benannten Potenziale, im Hinblick auf die eingesetzten Betriebsmittel, resultieren aus den Charakteristiken und Defiziten, die mit dem Einsatz von Universalmaschinen einhergehen. Bezogen auf die Reinigung sehen die vom IPK befragten Teilnehmer Verbesserungspotenziale schwerpunktmäßig in einer Anwendungs- und problemgerechten Anlagentechnik (36%) und einer reinigungsgerechten Entwicklung von Anlagen (32%). Abbildung 2.27 (b) visualisiert diese Ergebnisse. Für die Reparaturmaßnahmen werden von der Branche Verbesserungspotenziale, gemäß Abbildung 2.27 (c), in den klassischen Bereichen, in Form der Erhöhung der Flexibilität (39%), der Erweiterung des Angebotsportfolios (24%) und der Senkung der Investitionskosten (21%), gesehen. Die Ursache für diese Aussagen kann laut den Autoren der Studie in dem Aspekt gesehen werden, dass die maschinelle Durchführung eines größeren Teils der Reparaturtätigkeiten daran scheitert, „dass dies bislang technisch nicht realisierbar, nicht flexibel genug und zu teuer ist“ [URBVD11, S. 31].



(a)



(b)



(c)

Abbildung 2.27.: Verbesserungspotenziale der Instandhaltung nach [URBVD11]: (a) Planung und digitale Unterstützung; (b) Reinigung; (c) Reparatur

2.7. Stand der Forschung zur Automatisierung von Prozessen im MRO

Die Automatisierung von Instandhaltungsprozessen stellt die Industrie und Forschung vor große Herausforderungen. Dazu zählen die kleinen Losgrößen zu bearbeitender Flugzeugbauteile, deren komplexe Geometrie sowie deren zustandsabhängige Bearbeitung. So erfordert beispielsweise die Verformung und Veränderung von Turbinenschaufeln während der Betriebszeit, trotz deren Existenz in größeren Losen, eine individuelle Reparatur beanstandeter Defekte in Losgröße-1 [UHR13]. Der stark gestiegene Wettbewerbsdruck innerhalb der MRO-Branche veranlasst Anbieter von MRO-Dienstleistungen, ihre Instandhaltungsprozesse zu optimieren und effizienter zu gestalten. Potenziale dazu werden einerseits durch die zunehmende Einsetzbarkeit hochtechnisierter Fertigungsmaschinen für adaptive Bearbeitungsprozesse und kleine Losgrößen eröffnet. Andererseits begünstigen die Fortschritte im Bereich der Erforschung kognitiver Robotersysteme, „die auch in unstrukturierten Umgebungen und für Losgröße-1-Produktion wirtschaftlich einsetzbar sind“ [Bau14, S. 518], deren Integration in Instandhaltungsprozesse. Als Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten, bezogen auf die Automatisierung von Instandhaltungsprozessen, können zum einen die Maschinisierung und Automatisierung einzelner Inspektions- und Bearbeitungsprozesse selbst und zum anderen die Planung, Organisation und digitale Unterstützung der Instandhaltungsprozesskette identifiziert werden.

2.7.1. Automatisierung eines Instandhaltungsprozesses

Untersucht man die Instandhaltungsprozesse von Flugzeugkomponenten hinsichtlich ihres Potenzials zur Automatisierung, so rückt vor allem die Hauptkomponente Triebwerk in den Fokus. Interessant für Forschungstätigkeiten zur Automatisierung von Instandhaltungsprozessen ist dabei insbesondere die Instandhaltung der Turbinenschaufeln, die in Abbildung 2.28 exemplarisch dargestellt sind. Sie sind zum einen aufgrund ihrer geringen Größe sehr gut handhabbar und in (verhältnismäßig kleinen) Bearbeitungsmaschinen und mit Industrierobotern bearbeitbar. Zum anderen treten die Turbinenschaufeln bei der Instandhaltung eines Triebwerks in größeren Losen auf und sind herstellerübergreifend ähnlich dimensioniert und gestaltet. Dieser Aspekt, verbunden mit der Hochpreisigkeit der Bauteile, aufgrund sehr geringer Fertigungstoleranzen und hochwertiger Materialzusammensetzung, führen in der Summe zu einem grundsätzlich vorhandenen Potenzial für eine ökonomisch sinnvolle Automatisierung. Dementsprechend haben sich in den vergangenen Jahren einige Forschungstätigkeiten mit der Vollautomatisierung der Instandhaltungsprozesse von Turbinenschaufeln befasst.

Die Komplexität der Bauteile, die individuelle Bearbeitung und deren erforderliche Genauigkeit führt dazu, dass viele der nach dem Stand der Technik manuell durchgeführten Instandhaltungsprozesse nicht durch die bloße Substitution mit herkömmlichen Werkzeugmaschinen automatisiert werden können. Die eingangs benannten Anforderungen der Prozesse erfordern häufig ein hohes Maß an Erfahrung, Expertenwissen und Flexibilität. Dies kann von den, auf große Losgrößen und fertigende Prozesse konzipierten, Werkzeugmaschinen allein nicht aufgebracht werden [USR⁺15]. Dementsprechend beschäftigen sich viele Forschungstätigkeiten im Bereich der Triebwerksüberholung sowohl mit der Entwicklung adaptiver und flexibler Werkzeugmaschinen [Bre06][®] als auch mit dem Einsatz von



Abbildung 2.28.: Turbinenschaufeln eines Triebwerks aus [Bre06][®]

Industrierobotern für die automatisierte adaptive Bearbeitung. Industrieroboter zeichnen sich neben dem höheren Maß an Flexibilität insbesondere durch eine leichtere Integration von Sensorik und Aktorik und niedrigere Anschaffungskosten aus [HZCG03]. Folglich wurden die Roboter, deren Hauptanwendungsgebiet bislang primär in der Durchführung von Handling- und Messaufgaben lag, in den vergangenen Jahren immer häufiger für anspruchsvolle Fertigungs- und Instandhaltungsprozesse im industriellen Umfeld eingesetzt [SKS14]. Die primär im Bereich der Robotik anzuesiedelnden Forschungsaspekte lassen sich unterteilen in Mensch-Roboter-Kooperationen zur Durchführung von Bearbeitungstätigkeiten auf der einen Seite und die Substitution manueller Prozesse durch Industrieroboter auf der anderen [USR⁺15].

Zur Substitution manueller Fertigungsprozesse durch Industrieroboter sind neben der Erforschung der robotergestützten Bearbeitungstätigkeiten selbst, wie z.B. Schleifen ([KKS05], [SGK09], [UHMR13]), Schweißen [Bre06][®] oder Fräsen [USR⁺15], vor allem Forschungsaktivitäten erkennbar, die den Einsatz der Industrieroboter für die anspruchsvolle Instandhaltung erst ermöglichen. Dazu zählen zum einen die (robotergestützte) 3D-Digitalisierung ([Bre06][®], [GT11a]) und Inspektion [DSO13] instandzusetzender Bauteile. Zum anderen sind auch die adaptive Berechnung von Roboterbearbeitungsprogrammen, basierend auf digitalisierten Daten ([WY11], [SKS14]), die Kalibrierung von Roboter und Werkstück ([WYS08], [SGK09]) sowie die Steigerung der Positionierungsgenauigkeit der verwendeten Industrieroboter Gegenstand aktueller Forschungstätigkeiten.

Neben der Automatisierung von Instandhaltungsprozessen für kleine bis mittelgroße Flugzeugbauteile wird auch die Instandhaltung großer Bauteile erforscht. So befassen sich [DSO13] und [SKS14] mit der Automatisierung der Instandhaltung der Brennkammern von Flugzeugtriebwerken. Diese sind trotz Existenz verschiedener Varianten und Ausprägungen, aufgrund ihrer rotationssymmetrischen Eigenschaften, gut mit einer Kombination aus Industrieroboter und Rundtisch handhabbar. Fokus der Forschungsarbeiten ist die Entwicklung adaptiver robotergestützter Reparaturverfahren für Risse, Korrosionsstellen und kleine Deformationen. Diese sollen automatisiert in ebenfalls automatisiert gewonnenen 3D-Messdaten detektiert und lokalisiert werden. Zwar kann die adaptive Bearbeitung der Brennkammern als Losgröße-1-Problematik klassifiziert werden; die Hersteller- und Flugzeugtyp-übergreifende ähnliche Größe und Geometrie ermöglicht jedoch den Einsatz der erforschten Technologie für ein großes Spektrum an Bauteilen. Daher soll das innovative Verfahren nicht als klassisches Verfahren für die Bearbeitung von Bauteilen in Losgröße-1 klassifiziert werden.

Hinsichtlich der automatisierten Inspektion und Reparatur von Großstrukturen wurden in den vergangenen Jahren ebenfalls Forschungstätigkeiten, speziell im Hinblick auf die MRO-Branche, durchgeführt. Fokus dieser ist insbesondere die Entwicklung mobiler Lösungen zur automatisierten Detektion, Klassifikation und Reparatur lokaler Defekte der Großstrukturen. Hierzu wird in [Bre12] der teilautomatisierte Einsatz einer mobilen Lösung vorgeschlagen. Mittels dieser soll die 3D-Erfassung einer kleinen lokalen Region eines CFRP-Flugzeugrumpfes erfolgen. Anschließend soll die Reparatur der defekten Struktur mit einer ebenfalls mobilen fünf-achsigen Fräsmaschine erfolgen. Zur vollautomatisierten thermografischen Rissprüfung für Flugzeuge mit einem Aluminiumrumpf wird in [SS14] der Einsatz eines mobilen Roboters vorgeschlagen. Dieser soll sich zukünftig automatisiert auf dem Flugzeugrumpf fortbewegen und sowohl die Inspektion als auch die Reparatur durch mitgeführte Sensorik und Aktorik automatisiert durchführen.

Des Weiteren existieren insbesondere im Bereich der Montage von Flugzeuggroßstrukturen Forschungsaktivitäten, die sich mit der Mensch-Roboter-Kooperation in diesem Anwendungskontext beschäftigen. Sie lassen sich auch auf Instandhaltungsprozesse übertragen. Die beiden dominierenden Ansätze befassen sich sowohl mit der zeitlich oder räumlich getrennten Kooperation als auch der räumlich und zeitlich gekoppelten zwischen Mensch und Roboter. Der Ansatz räumlich oder zeitlich getrennter Kooperation fokussiert den Einsatz von Mensch und Roboter innerhalb einer Fertigungszelle [OJ13] und wird bereits seit vielen Jahren für vielfältige Montage- und Fertigungsprozesse erforscht ([Mor88], [Thi05], [KEH⁺05], [KLV09]). Der darüber hinausgehende Ansatz, mit dem Ziel einer „zeitliche[n] und räumliche[n] Kopplung von Mensch, technischen Systemen, Werkzeugen und weiteren Funktionalitäten in einem passiven und/oder aktiven hybriden System“ [WW14, S. 175–176], zielt vor allem auf die Unterstützung des Menschen während der Durchführung von physisch anspruchsvollen Tätigkeiten ab. Durch den Einsatz entsprechender Unterstützungssysteme, den sogenannten Human Hybrid Robots (HHR), soll der Mensch durch technische passive und/oder aktive Funktionalitäten unterstützt werden. Auf diese Weise soll die Lücke zwischen den geforderten und den vorhandenen Fähigkeiten und Fertigkeiten für die Bearbeitung von Großstrukturen geschlossen werden ([WKW13], [WW14]).

2.7.2. Optimierung der Instandhaltungsprozesskette

Historisch bedingt entwickelten sich viele der heutigen MRO-Unternehmen, wie in Abschnitt 2.4.2 dargestellt, erst im Laufe vieler Jahre von technischen Abteilungen der Fluggesellschaften zu eigenständigen Tochtergesellschaften und Unternehmen. Dementsprechend spürbar ist auch heute noch der Einfluss damaliger Organisations- und Planungsformen der Instandhaltungsprozesse. Diese sind zwar im Laufe der Umstrukturierungen mitgewachsen und wurden entsprechend optimiert. Selten wurden sie aber gänzlich neu konzipiert und den heutzutage etablierten effizienten Produktions- und Organisationsformen unterworfen. Hinzu kommt, dass Organisations- und Produktionsmethoden, die sich insbesondere im Bereich der Massenproduktion und der kundenindividuellen Massenproduktion etabliert haben, nur schwer auf die von manueller und zustandsabhängiger Bearbeitung dominierten Instandhaltungsprozesse übertragen lassen [Haq03].

Die Optimierungsansätze der Instandhaltungsprozesskette sollen nachfolgend differenziert nach der Anwendung von Lean-Prinzipien und der Optimierung der Daten- und Informationsverarbeitung dargelegt werden.

Anwendung von Lean-Prinzipien Heutzutage existieren kaum namhafte produzierende Unternehmen, bei denen keine an die schlanke Produktion angelehnte Methoden zur Anwendung kommen [Dic08]. Diese Methoden, die auf den Prinzipien des „Toyota Produktions-System“ (TPS) nach [Öno88] fußen, erlangten vor allem durch die Arbeit von *Womack, Jones und Roos* [WJR90] große Bekanntheit unter den Oberbegriffen der *Schlanke Produktion* oder der *Lean-Production*. Sie untersuchten, im Rahmen ihrer wissenschaftlichen Arbeit, die Unterschiede in den Entwicklungs- und Produktionsbedingungen in der Automobilindustrie. Dabei erarbeiteten sie die Prinzipien des Entwicklungs- und Produktionssystems des japanischen Automobilherstellers Toyota, das hinsichtlich Effizienz und Qualität der Konkurrenz signifikant überlegen war. Diese Methoden stellen eine „elementare Basis für effizienten, konkurrenzfähigen und modernen Materialfluss dar“ [Dic08, S. 5] und „finden erfolgreich Anwendung im Sondermaschinenbau, der Baubranche, der Medizintechnik, im Handwerk, der Biochemie oder im Großserienherstellprozess und sind gleichermaßen erfolgreich in Hochlohn- wie auch in Niedriglohnländern zu finden“ [Dic08, S. 5]. Da das TPS eine enorme Vielfalt an Vorgehensweisen beinhaltet, sollen an dieser Stelle, in Form der

- Vermeidung jeglicher Verschwendung (*Muda*),
- Strukturierung des Arbeitsumfelds in der Produktion (*5-S*),
- strukturierten Ursachenfindung im Zuge der Fehleranalyse (*5W-Methode*),
- konsequenten Fehlervermeidung durch präventive Prüfprozesse (*Poka Yoke*),
- kontinuierlichen Verbesserung von Produktions- und Arbeitsprozessen (*Kaizen*) und der
- effektiven Nutzung der Arbeitszeit eines Werkers durch *Mehrmaschinenbedienung*,

nur einige wesentliche Prinzipien erwähnt werden [Dic08].

Getrieben durch wachsende Kundenanforderungen in Bezug auf Flexibilität und kürzere Durchlaufzeiten sowie den steigenden Konkurrenzdruck auf dem Weltmarkt, sehen sich die MRO-Unternehmen genötigt, neben der Optimierung einzelner Instandhaltungsprozesse, auch deren Organisations- und Planungsprozesse zu optimieren [ABL11]. Einer der dazu verfolgten Ansätze ist die Übertragung von bewährten und getesteten Produktionsprinzipien aus anderen Branchen auf die eigenen spezifischen Charakteristiken der Instandhaltung. So existieren sowohl viele Forschungsarbeiten, die sich mit der Optimierung der für die Instandhaltungsprozesse charakteristischen Werkstattfertigung und Kleinstserienproduktion im Allgemeinen ([GP88], [Lóp97], [Li99], [SS09], [Gru10]) befassen, als auch einige Arbeiten, die sich mit der Adaption von Lean-Prinzipien auf das Engineering in der Luftfahrtbranche ([JM98], [Haq03]) oder speziell auf die MRO-Branche [Mat05] konzentrieren. Arbeiten wie [TBH08] und [BEC09] zeigen zudem, dass die im Rahmen der Forschungsarbeiten entwickelten Konzepte und Methoden erfolgreich im industriellen Umfeld der Instandhaltung implementiert werden konnten. So befasst sich erstgenannte mit der Adaption des Six-Sigma-Managementsystems zur Prozessverbesserung in Kombination mit den Lean-Prinzipien auf die Instandhaltungsprozesse bei British Airways Avionic Engineering. Die in [BEC09] veröffentlichte Fallstudie, die bei den beiden größten MRO-Organisationen Lufthansa Technik und Singapore Technologies Aerospace (ST Aerospace)

durchgeführt wurde, untersucht und belegt mit der Implementation der Lean-Prinzipien einhergehende Effizienzsteigerungen. Diese können darüber hinaus auch durch die Adaption der Prinzipien auf die Prozesskette zur Instandhaltung in kleineren MRO-Unternehmen, wie der niederländischen JetSupport b.v., nachgewiesen werden [SBW⁺12].

Festgehalten werden kann, dass die Lean-Prinzipien zum einen erfolgreich auf die Anforderungen der Instandhaltung und deren Prozesskette übertragen werden können und zum anderen zu deutlichen Effizienzsteigerungen führen können. Alle benannten Forschungsansätze befassen sich jedoch primär mit der Optimierung der gesamten Instandhaltungsprozesskette und weniger mit der Anwendung der Prinzipien auf einen einzelnen Instandhaltungsprozess auf Werkstattebene.

Optimierung der Daten- und Informationsverarbeitung Ein weiterer zu beachtender Aspekt zur Optimierung und Automatisierung der Instandhaltungsprozesse betrifft die Daten- und Informationsverarbeitung. So wurde in [Bre06][®] ein lücken- und mangelhafter bis nicht existenter Datenaustausch zwischen den einzelnen Prozessen der Instandhaltungsprozesskette identifiziert [Bre06][®]. Die Ursache ist jedoch im einzelnen Prozess zu finden. Sowohl der etablierte Organisationstyp der Werkstattfertigung, in die erst seit Beginn des 21. Jahrhunderts partiell moderne Maschinen und Anlagen integriert werden, als auch der dominierende Anteil manuell auszuführender Tätigkeiten führen zu einer mangelhaften Daten- und Informationsverarbeitung auf Prozessebene. Eine über die in Papierform vorhandenen Arbeitsaufträge und Instandhaltungsdokumente hinausgehende Unterstützung des Facharbeiters durch Daten und Informationen oder IT-Systeme ist eher Ausnahme als Regel. Daher muss im Rahmen von Forschungstätigkeiten zur Daten- und Informationsverarbeitung sowohl der einzelne Instandhaltungsprozess, als auch die Instandhaltungsprozesskette betrachtet werden.

Ansatzpunkt zur Optimierung der Daten- und Informationsverarbeitung innerhalb eines Instandhaltungsprozesses ist die Integration von Informations- und Kommunikationstechnik in die Prozessumgebung. Fokussiert wird diesbezüglich vor allem die Nutzung von tragbaren Geräten. Den Einsatz dieser sogenannten Wearables im MRO untersuchen [NSKW05] und [NSW⁺06], um darauf basierend ein Wissensmanagementsystem auf Prozessebene zu realisieren. In [LSF04] wird deren Einsatz für das Werkzeugmanagement innerhalb eines Instandhaltungsprozesses konzipiert und evaluiert. Vorgeschlagen wird die Transformation der herkömmlich verwendeten Werkzeuge zu intelligenten, indem diese mit Informationstechnologie, wie z. B. RFID-Sendern, ausgestattet werden. Auf diese Weise können alle Werkzeuge durch den Facharbeiter mittels eines tragbaren Geräts, das mit diesen ein Netzwerk bildet, verwaltet und deren Einsatz automatisiert dokumentiert werden. So kann zum einen die Wahrscheinlichkeit von Schäden aufgrund in Luftfahrzeugen zurückgelassener Arbeitsmittel minimiert werden. Zum anderen kann der Facharbeiter bei der Prozessdurchführung gezielt unterstützt werden, indem beispielsweise die Werkzeuge mit der herstellereitigen Dokumentation zur Bauteilbearbeitung oder den Arbeitskarten verknüpft werden. Beide Ansätze wurden bislang nur experimentell evaluiert, sind von einem systematischen Einsatz im MRO daher noch weit entfernt.

Die Optimierung der Daten- und Informationsverarbeitung innerhalb der Instandhaltungsprozesskette wurde im Rahmen des EU-geförderten Forschungsprojektes *AEROSATEC* betrachtet und bildete, neben der Automatisierung einzelner Instandhaltungsprozesse, den Kern der Forschungstätigkeiten [Bre06][®]. Dazu wurde ein neues Datenverarbeitungs-

system entwickelt und implementiert. Des Weiteren wurden XML-basierte Datenmodule konzipiert, sodass verfügbare Informationen sowohl von vorgelagerten Prozessen genutzt, als auch nachgelagerten bereitgestellt werden konnten. Die erzielbare Effizienzsteigerung, durch Kombination der Automatisierung konkreter Instandhaltungsprozesse mit dem implementierten Datenverarbeitungssystem, konnte erfolgreich in der realen Industrieumgebung demonstriert werden. Zu diesem Zweck wurde das Konzept exemplarisch auf die Instandhaltung von Turbinenschaufeln bei einem MRO-Dienstleister angewendet.

2.7.3. Zusammenfassung

Die zwar existenten aber wenigen Veröffentlichungen im Bereich der Automatisierung von MRO-Prozessen verdeutlichen sowohl die Relevanz als auch die Komplexität, für die Instandhaltung ökonomisch sinnvolle Automatisierungslösungen zu entwickeln. Die Ansätze können zwischen der Automatisierung einzelner Instandhaltungsprozesse und der Optimierung der gesamten Instandhaltung differenziert werden.

Die betrachteten Konzepte zur Automatisierung und Effizienzsteigerung von Instandhaltungsprozessen stellen zwar vielversprechende Ansätze dar, insbesondere für Prozesse mit dem Fokus kleiner Bauteile in mittleren bis großen Losgrößen, „können in der Regel [jedoch] nur mit erheblichem Aufwand an andere Teilegeometrien und Bearbeitungsabläufe angepasst werden und sind deshalb nur bei großen Losgrößen wirtschaftlich einsetzbar“ [KKS05, S. 1] und übertragbar. Die immensen Fortschritte, die in den letzten Jahren im Bereich der Robotik erzielt werden konnten, zeigen, dass zukünftig auch deren Verwendung oder die Kooperation mit Robotern für flexible und komplexe Bearbeitungsprozesse möglich ist. Sie eignen sich zukünftig also auch zur Automatisierung vieler Instandhaltungsprozesse für kleine und mittelgroße Bauteile in mittleren und großen Losgrößen. Dennoch müssen die Industrieroboteranwendungen stets speziell für einen bestimmten Instandhaltungsprozess konzipiert und entwickelt werden. Gleiches gilt auch für die Entwicklung hochtechnisierter Werkzeugmaschinen, die bereits partiell in Instandhaltungsprozesse integriert werden. Neben der adaptiven Bearbeitung, basierend auf 3D-Messdaten, können diese gleichzeitig auch Messaufgaben übernehmen und die Daten nachgelagerten Prozessen bereitstellen [UNI14][®]. Beide Ansätze bilden zukünftig insbesondere dann ökonomisch sinnvolle Alternativen zur manuellen maschinisierten Bearbeitung, wenn bestehende Werkzeugmaschinen ersetzt oder ein Instandhaltungsprozess komplett neu konzipiert und realisiert werden soll. Die veröffentlichten Forschungsergebnisse bezüglich der Optimierung der gesamten Instandhaltung zeigen, dass vor allem Prinzipien des Lean erfolgreich auf die Charakteristiken des MRO adaptiert werden konnten. Die implementierten Konzepte tragen bereits nachhaltig zu einer Effizienzsteigerung der Instandhaltungsprozesse, sowohl bei kleinen als auch bei mittleren und großen MRO-Unternehmen, bei. Dies belegt auch die in Abschnitt 2.6 betrachtete Studie des Instituts für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart. In dieser bestätigten die befragten MRO-Unternehmen den Einsatz zuvor benannter Lean-Prinzipien [RS11].

Hinsichtlich des Daten- und Informationsmanagements existieren vielversprechende, aber noch im Forschungsstadium befindliche, Ansätze für die Optimierung des einzelnen Instandhaltungsprozesses durch Integration von Informationstechnik. Des Weiteren demonstrieren Forschungsarbeiten wie [Bre06][®], dass durch ein prozessübergreifendes Informations- und Datenmanagement signifikante Effizienzsteigerungen der gesamten Instandhaltung erzielt werden können. Dieser Ansatz kann zukünftig eine vielversprechende

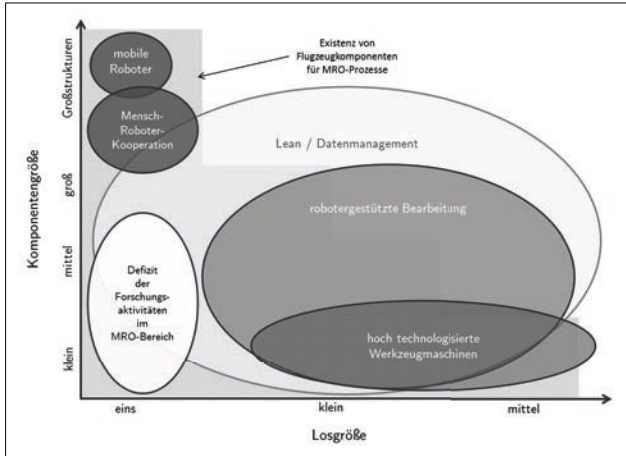


Abbildung 2.29.: Kategorisierung der Forschungsaktivitäten im MRO-Bereich hinsichtlich Losgröße und Komponentengröße der zu bearbeitenden Flugzeugkomponenten

Möglichkeit zur Optimierung der Instandhaltung darstellen. Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementation von prozessübergreifendem Datenmanagement innerhalb eines MRO-Unternehmens ist jedoch sowohl die Existenz digitaler Daten innerhalb der einzelnen Instandhaltungsprozesse, als auch die Existenz entsprechender Schnittstellen zur Kommunikation zwischen diesen. Auch im Rahmen des *AEROSATEC*-Projekts mussten diese Voraussetzungen für ein prozessübergreifendes Datenmanagement, in Form der Automatisierung einzelner zu verknüpfender Instandhaltungsprozesse, erst geschaffen werden.

Die Kategorisierung der Forschungsaktivitäten im MRO-Bereich hinsichtlich Losgröße und Komponentengröße visualisiert Abbildung 2.29. Erkennbar ist, dass vor allem Instandhaltungsprozesse, die sich mit einer Losgröße-1-Problematik konfrontiert sehen und ausschließlich oder überwiegend manuell durchgeführt werden, von Automatisierungsansätzen unberücksichtigt sind. Sie sind bislang nur schwer ökonomisch sinnvoll automatisierbar und standardisierbar. Gelänge es, für diese nicht nur den Automatisierungsgrad zu steigern, sondern auch die Voraussetzungen für ein prozessübergreifendes Datenmanagementsystem zu schaffen, so könnten auch Effizienzsteigerungen der gesamten Instandhaltung erzielt werden.

2.8. Einordnung der Arbeit

Die in den ersten beiden Abschnitten dieses Kapitels dargelegten Grundlagen hinsichtlich der Charakterisierung von IT- und Produktionssystemen bilden die Basis zur fundierten Einordnung und Abgrenzung dieser Arbeit. Dazu werden die in den Abschnitten 2.1 bis 2.7 erarbeiteten und diskutierten Ergebnisse zur Organisationsstruktur von MRO-Unternehmen, die Charakteristiken der Instandhaltung und der Stand der Technik und Forschung herangezogen und zusammengefasst.

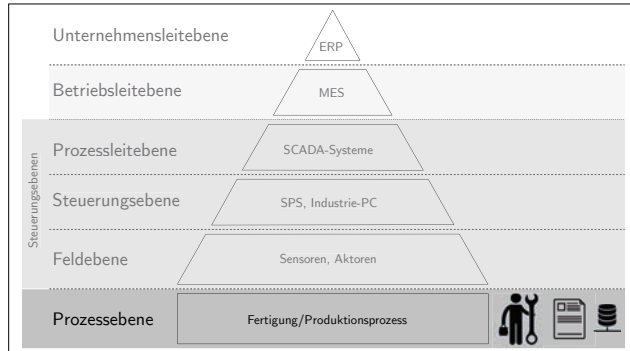


Abbildung 2.30.: Einordnung und Fokus der Arbeit hinsichtlich der IT-Systeme in der Produktion

2.8.1. Einordnung in die IT-Systeme

Für die Erzielung von Effizienzsteigerungen der Instandhaltung bietet sich vor allem die Optimierung der Instandhaltungsprozesse auf Prozessebene der Automatisierungspyramide, wie in Abbildung 2.30 dargestellt. Entsprechend liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Prozessebene. Trotz dieser Fokussierung gilt es, die verbleibenden Ebenen der Pyramide sowie den Trend zur horizontalen und vertikalen Vernetzung von Produktionssystemen nicht gänzlich außer acht zu lassen. Die in der Prozessebene angesiedelten Systeme dürfen für eine nachhaltige Integration in die IT-Landschaft eines Unternehmens keine Insellösungen darstellen. Vielmehr müssen sie über entsprechende Schnittstellen eine horizontale und vertikale Vernetzung erlauben.

2.8.2. Einordnung in die Typologisierung von Produktionsprozessen

Die Ergebnisse der Charakterisierung und Analyse der Instandhaltungsprozesse, auf Basis der zu diesem Zweck in Abschnitt 2.2 erarbeiteten Typologisierung, sollen nachfolgend eingeordnet werden. Folgend werden diese zusammengefasst und gemäß der identifizierten Ausprägungen der typologischen Merkmale der Produktionssysteme in Abbildung 2.31 eingeordnet. Deren Betrachtung am Ende dieses Abschnittes zeigt, dass die Merkmale der Instandhaltung denen des typischen Einzelfertigers entsprechen. Für den weiteren Verlauf der Arbeit sollen lediglich die Prozesse betrachtet werden, deren Charakteristiken den nachfolgend klassifizierten entsprechen.

Repetitionstyp der Instandhaltung Resultierend aus der Fülle von Varianten der Flugzeugbauteile unterschiedlicher Hersteller, die zustandsabhängig zu bearbeiten sind, kann der Repetitionstyp der Instandhaltung der Einzelproduktion zugeordnet werden. Dies bestätigt nicht nur die Literaturrecherche, sondern auch die detaillierte Analyse exemplarischer repräsentativer Instandhaltungsprozesse. Die Analyse zeigt auch die wiederkehrende Bearbeitung gleicher Bauteile, die für den weiteren Verlauf dieser Arbeit von besonderer Bedeutung ist.

Ausnahmen von der Produktion in Losgröße-1 können auftreten, wenn beispielsweise ein OEM-Dienstleister lediglich eigene Produkte überholt und einzelne Prozesse auch in Form der Kleinserienproduktion durchführen kann, und bei Flugzeugkomponenten, die aus gleichen Einzelkomponenten in größeren Losen bestehen. Hier ist als Beispiel die Triebwerksüberholung zu nennen. Diese Sonderfälle sollen folgend nicht betrachtet werden.

Organisation der Instandhaltungsprozesse Die Organisation der Instandhaltungsprozesse erfolgt in MRO-Unternehmen überwiegend nach dem Funktionsprinzip, in Form der Werkstattfertigung. Diese bietet enorme Vorteile hinsichtlich der Flexibilität und ist prädestiniert für die Einzelfertigung. Nur durch diese Organisationsform kann die Flexibilität, trotz starker Reglementierung der Prozesse durch luftfahrtrechtliche Vorschriften und Vorgaben der Komponentenhersteller, gewährleistet werden. Die in der Literatur beschriebenen charakteristischen Merkmale der Werkstattproduktion konnten durch die Analyse einer MRO-Organisation und anhand der Ergebnisse wissenschaftlicher Studien bestätigt werden. Dazu zählen ein hohes Maß an Transport- und Wartevorgängen zwischen und vor Werkstätten und Maschinen sowie ein hoher Anteil manueller Tätigkeiten.

Ablauftypen der Instandhaltung Wie häufig bei Prozessen, deren Ordnung nach dem Funktionsprinzip erfolgt, handelt es sich beim Ablauftyp der Instandhaltung überwiegend um Jobshop-Fertigung. Die Reihenfolge der zu durchlaufenden Arbeitsstationen ist für gleiche Bauteile nicht identisch, sondern von deren Zustand abhängig. Auch während des Durchlaufs der Instandhaltungsprozesskette kann es zu Änderungen der Ablaufreihenfolge kommen. Ein Beispiel ist die notwendige Durchführung weiterer Arbeitsschritte nach einer Befundung, auf die im Rahmen der Jobshop-Fertigung flexibel reagiert werden kann.

Auftragstypen der Instandhaltung Die großen Anbieter von MRO-Dienstleistungen bieten mit dem Geschäftsmodell des Geräte-Poolings den direkten Tausch von instandzuhaltenden Flugzeugbauteilen gegen gleiche, bereits überholte aus einem Pool von Bauteilen an, um Ausfallzeiten von Flugzeugen zu minimieren [Hin13]. Dennoch kann der Auftrags-typ der Instandhaltung eindeutig als auftragsgebundene Produktion klassifiziert werden, da entgegengenommene Bauteile zustands- und auftragsspezifisch bearbeitet werden müssen. Im Rahmen der auftragsgebundenen Instandhaltung gilt es, sowohl langfristig geplante Aufträge, z. B. im Rahmen regulärer Wartungen, als auch kurzfristige Aufträge, z. B. bei ungeplanten Reparaturen von Flugzeugbauteilen, in der Planung zu berücksichtigen.

Automatisierungsgrad der Instandhaltung Der Automatisierungsgrad der Instandhaltung kann für den Großteil der in Form der Werkstattfertigung durchgeführten Prozesse als nichtautomatisiert klassifiziert werden. Dafür spricht vor allem der große Anteil an notwendigen manuellen Tätigkeiten, um den Anforderungen in Bezug auf die Flexibilität gerecht zu werden. Zu diesen nichtautomatisierten Prozessen zählen, gemäß der feingranulareren Differenzierung nach [Neb11], die Substitutionsgrade der Handarbeit, der Mechanisierung und der Maschinisierung. Dabei sind in der Instandhaltung vorwiegend die beiden letztgenannten vorzufinden. Darüber hinaus konnten bei der Analyse des Fallbeispiels partiell auch teilautomatisierte Instandhaltungsprozesse identifiziert werden. Folglich werden die Ausprägungen des typologischen Merkmals in Form des Automatisierungsgrades der Instandhaltung als nichtautomatisiert und teilautomatisiert klassifiziert.

Repetitionstyp der Fertigung	Massenfertigung	Mehrfachfertigung	Einzelproduktion
Organisationstyp der Fertigung	einheitlicher Materialfluss	Zentrenproduktion	Werkstattfertigung
Ablaufstyp der Fertigung	kontinuierlich	Chargenproduktion	diskontinuierlich
Auftragstyp der Fertigung	nicht-auftragsgebunden		auftragsgebunden
Automatisierungsgrad der Fertigung	Voll-Automatisierung	Teil-Automatisierung	Keine Automatisierung
Spezialisierungsgrad der Arbeitskräfte	hoch	mittel	niedrig
Spezialisierungsgrad der Maschinen	Spezialmaschinen		Universalmaschinen

Abbildung 2.31.: Einordnung der Arbeit hinsichtlich Typologisierung der Instandhaltungsprozesse

Spezialisierungsgrad der Arbeitskräfte Der Spezialisierungsgrad der Arbeitskräfte kann abhängig von den auszuführenden Tätigkeiten in allen Ausprägungen auftreten. So existieren Prozesse der Instandhaltung, die keine abgeschlossene Berufsausbildung, wenig Fachkenntnisse und eine geringe Einarbeitungszeit des Facharbeiters erfordern. Ein Beispiel sind Tätigkeiten im Bereich der Reinigung, für die der Spezialisierungsgrad als niedrig klassifiziert werden kann. Die überwiegende Zahl der Tätigkeiten im MRO erfordert jedoch eine abgeschlossene Berufsausbildung und ein hohes Maß an Erfahrung. Die Ausbildung muss häufig durch zusätzliche Weiterbildungen und Prüfungen zur Bearbeitung sicherheitsrelevanter Flugzeugkomponenten ergänzt werden. Der Spezialisierungsgrad des überwiegenden Teils der Arbeitskräfte kann daher als mittel klassifiziert werden. Darüber hinaus existieren selbstverständlich auch Prozesse, die einen hohen Spezialisierungsgrad erfordern. Dazu zählen z. B. die Beurteilung kritischer identifizierter Beschädigungen durch einen Ingenieur oder die Programmierung und Bedienung hochtechnisierter Werkzeugmaschinen und Roboter. Da derartige Prozesse in der Instandhaltung die Minderheit darstellen, soll der Spezialisierungsgrad in der Summe als niedrig bis mittel klassifiziert werden.

Spezialisierungsgrad der Maschinen Die für die Instandhaltung überwiegend verwendeten Betriebsmittel können als Universalmaschinen bezeichnet werden. Diese stehen sowohl manuell geführt als auch automatisiert in den Werkstattfertigungsumgebungen zur Bearbeitung der Bauteile zur Verfügung. In Kombination mit den ausgeprägten kognitiven und sensorischen Fähigkeiten des Menschen kann die flexible zustandsabhängige Bearbeitung gewährleistet werden. Die Analyse des Stands der Forschung zeigt zwar das Bestreben, zukünftig die Universalmaschinen durch hochtechnisierte Werkzeugmaschinen und Industrieroboter zu substituieren. Deren Industrialisierung gelingt nach heutigem Stand jedoch nur für wenige geeignete Prozesse und ist mit hohen Entwicklungs- und Realisierungskosten verbunden.

2.9. Schlussfolgerungen und Anforderungen

Die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass sich die stark reglementierte Instandhaltung von Flugzeugkomponenten aus einer Vielzahl einzelner Instandhaltungsprozesse zusammensetzt. Als bedeutendes Merkmal der Instandhaltung ist die zustandsabhängige Bearbeitung in Losgröße-1 zu nennen, die enorme Anforderungen an die Unternehmen stellt. Demzufolge basieren die verschiedenartigen Instandhaltungsprozesse auf Werkstattebene, deren Automatisierungsgrad als nichtautomatisiert und vereinzelt als teilautomatisiert klassifiziert werden kann, auf einem Großteil an manuellen Tätigkeiten. Diese werden überwiegend unter Verwendung von Universalmaschinen durchgeführt. Die Analyse des Fallbeispiels eines MRO-Unternehmens zeigt, dass die Instandhaltung, trotz wiederkehrender Bearbeitung gleicher Bauteile, als Einzelfertigung erfolgt. Die damit verbundenen hohen und stark schwankenden Gesamtbearbeitungszeiten sind vor allem mit immensen (Personal-)Kosten verbunden. Folglich wurden diese von MRO-Unternehmen im Rahmen wissenschaftlicher Studien als Problemfelder der Instandhaltungsprozesse identifiziert. Ein weiterer Effekt dieser großen Schwankungen über die gesamte Instandhaltung ist die schwierige Planbarkeit einzelner Prozesse sowie der Gesamtbearbeitungszeit. Dies erschwert den Unternehmen, im Vorfeld die eigene Auslastung der Instandhaltung genau zu planen und gegenüber ihren Kunden haltbare Terminzusagen abzugeben. Dieser Problematik geschuldet sind die MRO-Unternehmen gezwungen, ihre Prozesse großzügig zu planen, Leerläufe in Kauf zu nehmen sowie auftretende Terminengpässe durch zusätzliche kostenintensive Schichten auszugleichen. Im Umkehrschluss stellt eine exaktere Planung der innerbetrieblichen Instandhaltungsprozesse einen klaren Wettbewerbsvorteil auf dem hart umkämpften MRO-Markt dar.

Die Untersuchung des Stands der Forschung zeigt einerseits, dass manuelle Arbeitsschritte und Instandhaltungsprozesse zunehmend auch für kleine und mittlere Losgrößen, unter Beibehaltung der Flexibilität, teilautomatisiert werden können. Dazu können zukünftig vermehrt Industrieroboter, Serviceroboter und hochtechnisierte Werkzeugmaschinen in die Prozesse integriert werden. Andererseits zeigt die Analyse auch, dass die im Forschungsstadium befindlichen Ansätze noch weit entfernt von einer effizienten Anwendung auf Instandhaltungsprozesse sind, die sich mit einer Losgröße-1-Problematik konfrontiert sehen. Demnach wird auch zukünftig der Mensch weiterhin als Knowhow-Träger und flexible Resource in die Instandhaltungsprozesse eingebunden werden müssen.

Parallel zu den Anforderungen im Hinblick auf Effizienzsteigerungen der Instandhaltungsprozesse, beispielsweise durch Senkung von Prozesskosten und durch Verbesserung der Planung, existiert auch die konträre Forderung nach einer Steigerung der Flexibilität seitens der MRO-Unternehmen. Die Analyse der Organisationsstruktur, einzelner Instandhaltungsprozesse sowie der Ergebnisse wissenschaftlicher Studien verdeutlicht einen hohen Bedarf hinsichtlich digitaler Unterstützung auf Prozessebene. Diesbezüglich wurden in den Studien auch konkrete Lösungsansätze im Bereich des Informations- und Konfigurationsmanagements und in Form von Assistenzsystemen und Absicherungswerkzeugen durch befragte Unternehmen benannt und als vielversprechend bewertet. Darüber hinaus zeigte die Analyse der Forschungsarbeiten, dass durch die digitale Unterstützung eines Instandhaltungsprozesses sowohl Effizienzsteigerungen für den einzelnen Prozess als auch für die gesamte Instandhaltung erzielt werden können.

Eine ökonomisch sinnvolle und damit industrialisierbare Lösung muss folglich auf viele der einzelnen Instandhaltungsprozesse auf Werkstattebene adaptierbar sein. Dabei muss

die Flexibilität der Prozesse beibehalten oder gar gesteigert werden. Vor dem Hintergrund seines großen Prozesswissens, der Komplexität einer Vollautomatisierung und der Anforderungen bezüglich der Senkung von Investitionskosten seitens der MRO-Unternehmen, wird der Mensch auch zukünftig als flexibles, hoch sensitives und kognitives Prozesselement in die Instandhaltungsprozesse integriert werden müssen. Dabei gilt es, diesen bestmöglich zu unterstützen und die Kooperation mit eingesetzten Werkzeugmaschinen und Betriebsmitteln zu harmonisieren und zu optimieren.

3. Automatisierung von Instandhaltungsprozessen

Der Bedarf im MRO hinsichtlich einer Optimierung der Instandhaltungsprozesse wurde im vorherigen Kapitel anhand der identifizierten Defizite verdeutlicht. Eine Erkenntnis ist, dass ein größeres Augenmerk auf die zentrale Rolle des Menschen im Instandhaltungsprozess gelegt werden muss. Der Optimierungsansatz durch Integration einer automatisierten Maschine (vgl. Abschnitt 2.5) führte nicht zu einer deutlichen Reduktion manueller Tätigkeiten im Prozess. Vielmehr wurde auf diese Weise die Komplexität der Arbeitsschritte für den Facharbeiter gesteigert. Eine Effizienzsteigerung konnte zwar mit der Automatisierung lediglich eines Teilprozesses erzielt werden. Optimierungspotentiale weiterer Teilprozesse konnten auf diese Weise hingegen nicht aufgegriffen werden.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur Automatisierung eines Instandhaltungsprozesses verfolgt daher nicht das Ziel einer Vollautomatisierung. Vielmehr geht es darum, den Prozess ganzheitlich zu optimieren und den Facharbeiter, als integralen Bestandteil eines Gesamtsystems, bei der Prozessdurchführung gezielt zu unterstützen. Diesen Ansatz bewertet auch die Studie zur Produktionsarbeit der Zukunft, im Rahmen der Vision Industrie 4.0 des Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, als zukünftig zielführend: „Die Automatisierung hat gerade in der Flexibilität ihre Grenzen. Wenn wir vollautomatisch hochflexiblen Output erzeugen wollen, überschreitet die Komplexität. Das bringt hohe Investments und begrenzte Verfügbarkeit mit sich. Daher stößt die Automatisierung hier an die wirtschaftlichen Grenzen. Deshalb werden wir besser abgegrenzte, konsequent auf einen Themenbereich zugeschnittene Automatisierung mit flexibler Verknüpfung durch Menschen einsetzen“ [SGG⁺13, S. 54].

Die Lösungsbestandteile des Automatisierungskonzeptes greifen die Automatisierungspotentiale der Instandhaltungsprozesse auf. Für deren Identifikation werden im ersten Abschnitt des Kapitels die repräsentativen Instandhaltungsprozesse nach Abschnitt 2.5 untersucht. Im Anschluss daran erfolgt im zweiten Abschnitt dieses Kapitels die Erläuterung des Konzeptes zur Automatisierung von Instandhaltungsprozessen kleiner Losgrößen im MRO. Das Kapitel schließt mit der Zusammenfassung des Lösungskonzeptes und der darauf fußenden Hypothese dieser Arbeit.

3.1. Analyse des Automatisierungspotentials von Instandhaltungsprozessen

Bereits die Analyse der Produktionsdaten zweier Instandhaltungsprozesse zur Reparatur identifizierter lokaler Defekte von Fahrwerksbauteilen in Abschnitt 2.5.4 verdeutlichte, dass deren Bearbeitungszeiten für gleiche Bauteile enormen Schwankungen unterliegen. Bei der Akquise der Produktionsdaten im industriellen Umfeld des MRO-Unternehmens wurde

deutlich, dass der Facharbeiter für diese manuell auszuführenden Tätigkeiten auf keine Systeme zur Unterstützung zurückgreifen kann. Die Ausführung fußt einzig auf dessen individueller Vorgehensweise und dessen Fach-, Prozess- und insbesondere Erfahrungswissen. Die Ausnutzung der Vorteile einer wiederkehrenden Bearbeitung gleicher Bauteile erfolgt nicht oder nur sporadisch. Eine Modellierung der repräsentativen Instandhaltungsprozesse soll nachfolgend diesen Eindruck bekräftigen und zur Identifikation der Automatisierungspotentiale dienen.

3.1.1. Modellierung repräsentativer Prozesse

Zur Prozessmodellierung wurden in Abschnitt 2.3 wesentliche Methoden und deren individuelle Vorteile vorgestellt. Ziel des Prozessmodells ist, die vielfältigen, manuell dominierten Tätigkeiten eines Prozesses darzustellen. Dazu sollen auch die Interaktionen eines Facharbeiters auf Prozessebene mit allen für die Durchführung relevanten Ressourcen aufgezeigt werden. Zu diesem Zweck eignet sich besonders die Modellierung mittels des Prozessablaufdiagramms, in dem für alle zu modellierenden Prozessressourcen, in Form des Facharbeiters, der Betriebsmittel, der Werkzeugmaschine und dem System auf MES-Ebene, eine separate Darstellungsebene genutzt werden kann. Die Interaktionen zwischen den Ressourcen lassen sich darin durch Pfeile abbilden.

Abbildung 3.1 (a) zeigt das Prozessablaufdiagramm des nicht-automatisierten Instandhaltungsprozesses für kleine und mittelgroße Bauteile von Flugzeugfahrwerken. Abbildung 3.1 (b) zeigt das des teilautomatisierten Prozesses für Großbauteile. Gegenstand beider Prozesse ist, wie in Abschnitt 2.5.4 beschrieben, die Aufarbeitung lokaler Beschädigungen in Bohrungen und an deren Planflächen durch Verwendung von Fräsmaschinen. Bei der Modellierung werden die folgenden Ressourcen berücksichtigt:

- der *Facharbeiter*, dem die Steuerung und Ausführung aller auszuführenden Tätigkeiten auf Prozessebene obliegt,
- die *Betriebsmittel*, die vor allem in vielen Varianten für den Teilprozess *Spannen und Ausrichten* benötigt werden,
- die *Werkzeugmaschine*, zur Durchführung des eigentlichen Bearbeitungsprozesses und
- die *Software auf MES-Ebene*, zur Steuerung der Instandhaltung.

Die einzelnen Arbeitsschritte werden im Prozessablaufdiagramm der jeweiligen Ebene der dominierenden Ressource zugeordnet. Gegenstand der Modellierung ist für beide Prozesse lediglich die Reparatur einer einzigen lokalen Beschädigung. Bei mehreren Beanstandungen an einem Bauteil sind die Teilprozesse *Spannen und Ausrichten* und *Zerspanung* entsprechend oft iterativ durchzuführen.

Die Betrachtung der Instandhaltungsprozesse in Abbildung 3.1 zeigt, dass der Facharbeiter im Zuge der Arbeitsvorbereitung auf das Software-System auf MES-Ebene zugreift. Zur Positionierung und Fixierung des zu bearbeitenden Bauteils gegenüber der Universalmaschine muss er auf entsprechende Betriebsmittel zurückgreifen. Für deren Auswahl und Anordnung existieren keine dokumentierten Arbeitsvorgaben, sodass diese gänzlich auf einer individuellen Vorgehensweise basieren. Bis zu diesem Teilprozess gleichen sich der nicht-automatisierte und der teilautomatisierte Prozess. Einziger Unterschied ist, dass die Ausrichtung der Bauteile gegenüber der Universalmaschine beim nicht-automatisierten

äußerst exakt erfolgen muss. Dementsprechend müssen die zeitaufwändigen Arbeitsschritte der *Ausrichtung und Fixierung* sowie das *Ausmessen der Ausrichtung* meist mehrfach wiederholt werden, bis die Positionierung der geforderten Genauigkeit entspricht. Für den teilautomatisierten Prozess genügt hingegen eine grobe Positionierung, da die eingesetzte moderne CNC-Fräsmaschine über einen Messtaster zur Positionsregelung verfügt. Nach einem Tastvorgang kann ein Bearbeitungsprogramm automatisch an die aktuelle Positionierung adaptiert werden. Dieser Unterschied spiegelt sich auch in ausgewerteten Produktionsdaten beider Prozesse wieder, in denen die manuellen Tätigkeiten des teilautomatisierten Prozesses einen etwa 20% geringeren Anteil an der Gesamtbearbeitungszeit aufweisen.

Nach der Ausrichtung des Bauteils erfolgen die eigentlichen Arbeitsschritte zur Ausarbeitung der lokalen Defekte. Erkennbar in den Prozessablaufdiagrammen sind die ausschließlich manuellen Arbeitsschritte beim nicht-automatisierten Instandhaltungsprozess. Die Arbeitsschritte *Vorb bohren* und *Fertig bohren* benötigen zwar die Werkzeugmaschine, die jedoch bei der Ausführung manuell geführt werden muss. Daher werden auch diese Tätigkeiten bei der Modellierung dem Facharbeiter zugeordnet. Beim teilautomatisierten Prozess erfolgt die Bearbeitung, nach der Programmierung und Parametrierung der Maschine, automatisiert. Im iterativen Bearbeitungsprozess obliegen dem Facharbeiter lediglich die Arbeitsschritte der Kontrolle des Bearbeitungsergebnisses, des finalen Maßes sowie die Entscheidung, die Bearbeitung mit geänderten Parametern zu wiederholen oder zu beenden.

In der Arbeitsnachbereitung werden bei beiden Prozessen die geänderten Bemaßungen des Bauteils in das Software-System auf MES-Ebene eingetragen. Der Auftrag wird als abgeschlossen gekennzeichnet.

Die Prozessablaufdiagramme verdeutlichen, dass sich der Facharbeiter stets im Fokus der Interaktion aller beteiligten Ressourcen befindet. Sein Prozesswissen sowie seine sensitiven und kognitiven Fähigkeiten führen dazu, dass er die ideale Schnittstelle zwischen Werkzeugmaschinen, Betriebsmitteln und Bauteil darstellt. Er ermöglicht die flexible, zustandsabhängige Instandhaltung. Gemäß der VDI-Richtlinie 4006 kann der Mensch, der sich einer Maschine beliebigen Komplexitätsgrads bedient, als Systemglied des so entstandenen Mensch-Maschine-Systems aufgefasst werden [VDI15][#].

3.1.2. Identifikation von Automatisierungspotenzialen

Die zwei Instandhaltungsprozesse nach Abbildung 3.1 repräsentieren, entsprechend ihrem Automatisierungsgrad nach Abschnitt 2.2.5, die beiden vorherrschenden Prozessstypen nicht-automatisierter und teilautomatisierter Prozesse auf Werkstattebene. Nicht-automatisierte Prozesse sind jene, bei denen manuell geführte Maschinen zur Bearbeitung eingesetzt werden. Deutlich wird diese Klassifikation in der Prozessmodellierung, da alle Arbeitsschritte dem Facharbeiter zugeordnet sind. Der teilautomatisierte Prozess repräsentiert alle Instandhaltungsprozesse, bei denen ein Bauteil unter Verwendung automatisierter Maschinen bearbeitet wird. Bei diesen werden auch einzelne Arbeitsschritte ausschließlich durch Maschinen ausgeführt. Dazu werden überwiegend CNC-Universalmaschinen, aber auch Sonderanlagen oder Industrieroboter eingesetzt.

Bei der überwiegenden Anzahl der Instandhaltungsprozesse zur mechanischen Bearbeitung tritt das Werkzeug in direkte Interaktion mit dem zu bearbeitenden Bauteil. Dies führt zum Auftreten von Kontaktkräften. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Automatisierungsansatz soll auch die Prozesse berücksichtigen, bei denen keine direkte Interaktion

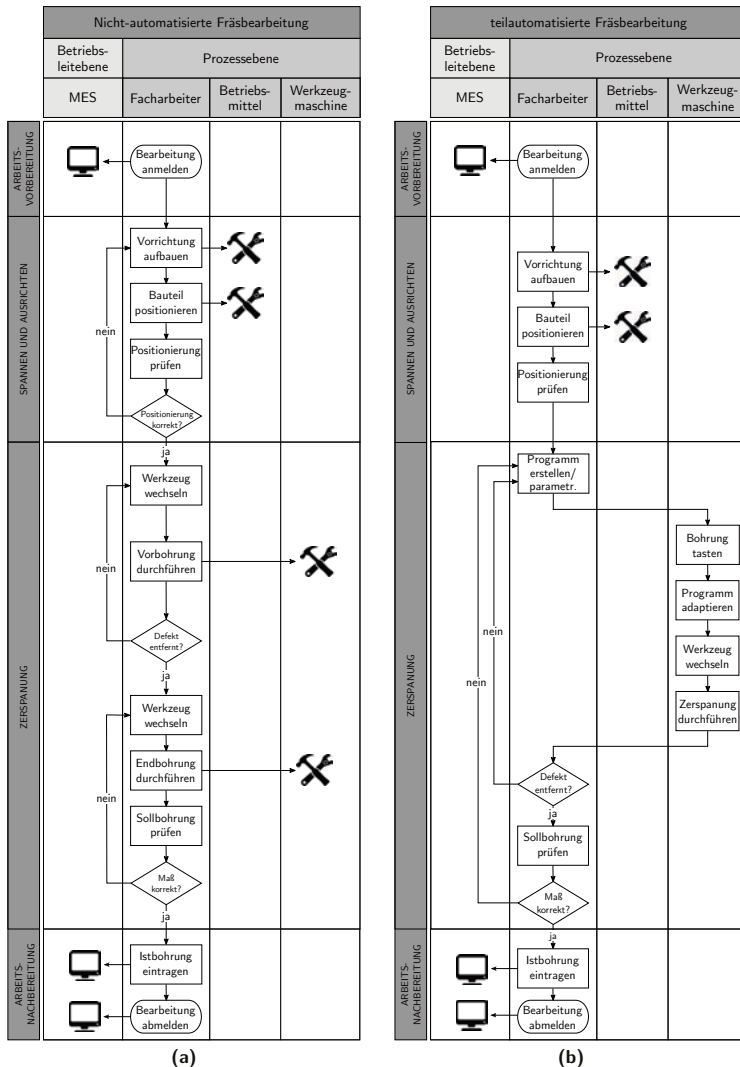


Abbildung 3.1.: Prozessmodellierung mittels Prozessablaufdiagrammen: (a) nicht-automatisierter Instandhaltungsprozess unter Verwendung einer manuell geführten Universalfräsmaschine; (b) teilautomatisierter Instandhaltungsprozess unter Verwendung einer fünf-achsigen CNC-Fräsmaschine

stattfindet. Sie werden hier als *berührungslos* zusammengefasst. In erstgenannten Prozessen werden in der Regel nur kleine Regionen des Bauteils bearbeitet, wohingegen bei berührungslosen Prozessen häufig die Bearbeitung der kompletten Oberfläche notwendig ist. Beiden Arten der mechanischen Bearbeitung ist gemeinsam, dass ein Bauteil stets gegenüber einer Werkzeugmaschine positioniert und fixiert werden muss. Für eine gesamte Oberflächensbearbeitung sind zudem ein oder mehrere Umpositionierungen des Bauteils notwendig.

Sowohl die Auswertung der Produktionsdaten als auch die Modellierung der repräsentativen Prozesse zeigt, dass die zum Spannen und Ausrichten eines Bauteils notwendigen Arbeitsschritte einen enormen Anteil an der Gesamtbearbeitung und den durchzuführenden Tätigkeiten beider Prozesse aufweisen. Betrachtet man das große Spektrum von über 200 Fahrwerksbauteilen verschiedener Hersteller, die auf vielfältige Art und Weise zur Bearbeitung positioniert werden müssen, so ergibt sich schnell eine Anzahl an Positionierungen in vierstelliger Größenordnung. Der Facharbeiter kann mangels informationstechnischer Unterstützung nicht systematisch auf Erfahrungs- und Prozesswissen zurückgreifen. Die Durchführung der Arbeitsschritte erfolgt stets in Form der unikaten Einzelproduktion und ist somit nicht nur zeitlichen, sondern auch qualitativen Schwankungen unterworfen. Daher weist vor allem der sehr zeitintensive Teilprozess *Spannen und Ausrichten* ein hohes Automatisierungspotenzial auf. Der Vergleich der modellierten Prozesse zeigt, dass durch die Integration automatisierter Werkzeugmaschinen in den Instandhaltungsprozess die Komplexität der Teilprozesse *Spannen und Ausrichten* und *Bearbeitung* für den Facharbeiter reduziert werden kann. Die Integration ist jedoch auch mit zusätzlichen Arbeitsschritten verbunden, deren Komplexität, gegenüber denen des nicht-automatisierten Prozesses, deutlich höher klassifiziert werden muss. So ist für die automatisierte Bearbeitung die vorhergehende zustands-, befund- und bauteilabhängige Programmierung und Parametrierung der zu verwendenden Maschine erforderlich. Dazu bedarf es eines höheren Qualifikations- und Spezialisierungsgrads des Facharbeiters, gegenüber der Prozessdurchführung mit manuell geführten Maschinen. Auch bei Betrachtung dieser Arbeitsschritte wird der Mangel an Systemen zur Unterstützung und der systematischen Nutzung von Prozesswissen deutlich. Die Programmierung wird auch bei der wiederholten Bearbeitung eines Bauteils meist von Grund auf neu durchgeführt. Teilweise werden Vorlagen für Programmrümpfe verwendet, die parametriert und adaptiert werden müssen. Die Verwendung und Verwaltung solcher Programmrümpfe hängt jedoch maßgeblich von der Qualifikation des Facharbeiters und seiner individuellen Herangehensweise ab. Eine systematische oder gar prozessübergreifend standardisierte Vorgehensweise konnte nicht identifiziert werden. Dementsprechend weisen auch teilautomatisierte Instandhaltungsprozesse Potenziale hinsichtlich der Standardisierung von Arbeitsschritten und der systematischen Nutzung vorhandenen Prozesswissens auf. Die größten Wirkungsfelder liegen sowohl im bereits angesprochenen Teilprozess *Spannen und Ausrichten* als auch in den Arbeitsschritten zur Programmierung und Parametrierung von Werkzeugmaschinen.

Darüber hinaus muss bei der Automatisierung auch die Koppelung der einzelnen Arbeitsschritte zur iterativen Bearbeitung beachtet werden. Sie führt oftmals zu einer ähnlich starken Einbindung des Facharbeiters in einen teilautomatisierten Instandhaltungsprozess wie in einen manuellen. Die Integration einer automatisierten Werkzeugmaschine kann einerseits den Arbeiter bei einzelnen Prozessschritten entlasten, beispielsweise durch gänzliche Substitution. Andererseits stellen die damit einhergehenden zusätzlichen, manuell auszuführenden Tätigkeiten neue Anforderungen hinsichtlich der Qualifikation und Spe-

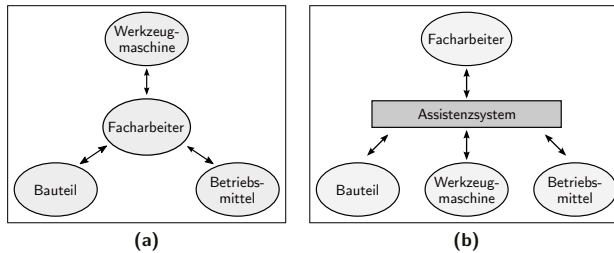


Abbildung 3.2.: Ressourcen und Objekte eines Instandhaltungsprozesses auf Prozessebene: (a) ohne Anwendung des Automatisierungsansatzes; (b) bei Automatisierung durch Integration eines Assistenzsystems als zentrale Schnittstelle

zialisierung eines Facharbeiters dar. Die Folge sind in der Regel signifikant höhere Personalkosten für entsprechendes Personal, das aufgrund der engen Kopplung permanent in den kompletten Instandhaltungsprozess eingebunden werden muss. Neben der systematischen Nutzung von Prozesswissen bietet daher auch die Komplexitätsreduzierung Potenziale zur Optimierung, um die Prozessdurchführung auch niedrig qualifizierten Arbeitern zu ermöglichen.

Der Facharbeiter kann als Glied des Mensch-Maschine-Systems eines Instandhaltungsprozesses aufgefasst werden. Er beeinflusst auch die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Systems. Vor allem die nicht-standardisierte Vorgehensweise, verbunden mit einer individuellen Herangehensweise, und die vielen einzelnen Arbeitsschritte und einzusetzenden Ressourcen bergen eine Vielzahl von kritischen Interaktionen bei der Prozessdurchführung. Diese Gegebenheit, die für die Instandhaltung auf Werkstattebene üblich ist, visualisiert Abbildung 3.2 (a). Dargestellt ist das zu bearbeitende Bauteil neben den drei elementaren Ressourcen, die direkte Auswirkungen auf dieses haben. Da dem Facharbeiter die komplette Steuerung und Durchführung des Prozesses obliegt, wurde dieser im Zentrum der Konstellation platziert. Er fungiert dabei als Systemglied, das Schnittstellen mit weiteren Ressourcen und Objekten aufweist, stellt aber auch selbst die Schnittstelle zwischen diesen dar. Potenziale zur Effizienzsteigerung bieten daher sowohl die Reduktion kritischer Interaktionen, als auch die Absicherung kritischer Schnittstellen zwischen einzelnen Systemgliedern.

Eine Vielzahl von Interaktionen, die sich in der Regel durch die Integration von automatisierten Werkzeugmaschinen oder Betriebsmitteln im Prozess ergibt, führt schnell zu einer Steigerung der Komplexität und einer Überforderung des Facharbeiters. Gelingt es, die Interaktionen zwischen dem Facharbeiter und den weiteren Ressourcen auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren, so kann die Komplexität der Prozessdurchführung gesenkt werden. In der Folge kann der Facharbeiter diese effizienter gestalten, indem er seine Fähigkeiten und Aufmerksamkeit auf die verbleibenden Tätigkeiten fokussieren kann.

Des Weiteren ist mit der Reduktion von kritischen Interaktionen auch die Reduktion potenzieller Fehlerquellen bei der Prozessdurchführung verbunden. Zwar sind etwaige Fehler, aufgrund umfangreicher und redundanter Kontrollen während der Instandhaltung, nicht unmittelbar mit finalen Qualitätsmängeln und entsprechenden Auswirkungen auf die Lufttuchtigkeit verbunden. Dennoch können sie, von der erneuten Durchführung von Instand-

haltungsprozessen bis zu irreparablen Beschädigungen an Bauteilen oder Schäden an Werkzeugmaschinen und Betriebsmitteln, immense Auswirkungen haben. Diese schlagen sich in stark steigenden Instandhaltungskosten durch Mehraufwand, die erschwerte Planung der termingerechten Abwicklung oder durch Reparatur und Ersatz beschädigter Komponenten nieder.

3.2. Konzept zur Automatisierung eines Instandhaltungsprozesses

Das Konzept zur Automatisierung setzt sich aus mehreren Aspekten zusammen, die in ihrer Gesamtheit ein Assistenzsystem für den Facharbeiter auf Prozessebene bilden. Als Assistenzsystem sollen folgend alle rechnergestützten Hilfsmittel aufgefasst werden, die den Anwender bei der Durchführung eines Prozesses oder dem Treffen einer Entscheidung unterstützen ([WN14], [BCK+07]). Da die Instandhaltung in vielen einzelnen Prozessen erfolgt, muss ein Konzept zur Automatisierung effizient auf viele dieser adaptierbar sein. Nur so lässt sich langfristig ein signifikanter Mehrwert einer Automatisierung für ein MRO-Unternehmen erzielen. Der modulare Aufbau des Assistenzsystems, durch adaptierbare, substituierbare und wiederverwendbare Komponenten, erfüllt genau diese Anforderung. Diese Systemeigenschaft der stringenten Modularisierung wird auch im Rahmen der Umsetzungsempfehlung für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 vorgeschlagen und gefordert [KWH13]. Die einzelnen Lösungsaspekte werden folgend eingeführt und erläutert.

Optimierung von Teilprozessen durch Wiederverwendung Eines der großen Automatisierungspotenziale ist die wiederkehrende Bearbeitung gleicher Bauteile. Die Defizite auf Prozessebene führen dazu, dass vorhandenes Prozesswissen nicht systematisch eingesetzt wird. Im Sinne der Lean-Prinzipien kann in diesem Zusammenhang auch von Verschwendung⁵ gesprochen werden. Bezogen auf den Instandhaltungsprozess wurde Verschwendung sowohl in Form der unsystematischen, wiederholten Durchführung von Arbeitsschritten, als auch in Form der erneuten Erstellung bereits in der Vergangenheit erstellter Lösungen identifiziert. Auch Zeiträume der Unproduktivität einer Werkzeugmaschine gelten als Verschwendung.

Ansatz zur Prozessoptimierung ist die nachhaltige Reduzierung von Verschwendung durch systematische Wiederverwendung von Prozesswissen. Eine solche Reduzierung sowie die Vermeidung von Verschwendung wird im Kontext der Lean Prinzipien als *Muda* bezeichnet. Zur Optimierung eines Instandhaltungsprozesses müssen im ersten Schritt diejenigen Teilprozesse identifiziert werden, die sowohl entsprechende Verschwendung als auch Potenziale zur Effizienzsteigerung aufweisen. Eine Grundlage dafür stellen vor allem die im vorherigen Abschnitt durchgeführte Prozessmodellierung sowie die Akquise zugehöriger Kennzahlen dar. Indikatoren können ein hoher Anteil an der Gesamtdauer des Prozesses, die Komplexität, aber auch die zustands- oder bauteilunabhängige Durchführung von Arbeitsschritten sein. Bezogen auf einen Instandhaltungsprozess wurden sowohl für den elementaren Teilprozess *Spannen und Ausrichten* als auch für Tätigkeiten, die mit der

⁵ Als Verschwendung werden für einen Wertschöpfungsprozess alle über den zur Wertsteigerung beitragenden Teil der Arbeit hinausgehende Tätigkeiten definiert [Bec06].

Integration automatisierter Werkzeugmaschinen einhergehen, Verschwendung und Optimierungspotenziale identifiziert. Zur Optimierung gilt es, das wiederverwendbare Wissen zu identifizieren und dessen systematische Wiederverwendung prozessspezifisch zu konzipieren. Dabei muss die prozessnahe Erfassung und die Bereitstellung von relevantem Wissen mit einbezogen werden. Die informationstechnische Realisierung soll an dieser Stelle nicht Gegenstand der Betrachtung sein und erst bei der Konzeption der Informatisierung Berücksichtigung finden.

Erhöhung der Prozessqualität durch Fehlervermeidung Ein weiterer Aspekt des Automatisierungskonzeptes ist die Erhöhung der Prozessqualität durch Fehlervermeidung. Dies soll dadurch erreicht werden, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fehlern während der Prozessdurchführung signifikant gesenkt wird. Außerdem soll das Vertrauen der Facharbeiter in die Verwendung und Bedienung hochtechnisierter Werkzeugmaschinen gestärkt werden, die zukünftig zunehmend in Instandhaltungsprozesse integriert werden. Das Prinzip der Integration von Systemen zur Vermeidung von Fehlern, beziehungsweise deren Auswirkungen auf ein Endprodukt, ist im Kontext der Lean-Prinzipien unter dem Begriff *Poka Yoke* bekannt. Das *Poka Yoke* Konzept fußt auf der Erkenntnis, „dass kein Mensch und auch kein System in der Lage ist, unbeabsichtigte Fehler vollständig zu vermeiden“ [KB08, S. 110]. Da sich solche unbeabsichtigten, zufälligen Fehler auch nicht durch erhöhte Sorgfalt ausschließen lassen, gilt es diese durch eine entsprechende Systemgestaltung zu antizipieren und den Eintritt negativer Folgen zu verhindern, um ein verbessertes Qualitätsniveau zu erreichen [Sys07]⁶.

Bezogen auf Instandhaltungsprozesse zur mechanischen Bearbeitung muss, unabhängig vom Automatisierungsgrad der eingesetzten Maschinen, dem Übergang zwischen dem stets manuell auszuführenden Teilprozess *Spannen und Ausrichten* und der anschließenden Bearbeitung besondere Bedeutung beigemessen werden. Dieser Übergang, bei dem der Facharbeiter als Schnittstelle zwischen Bauteil, Betriebsmitteln und Werkzeugmaschine agiert, ist mit einer Vielzahl von Interaktionen verbunden. Der Facharbeiter stellt hier eine kritische Schnittstelle mit hohem Fehlerpotenzial dar. Ein Lösungsansatz ist die Integration eines Systems in den Instandhaltungsprozess, das etwaige Fehler der Interaktionen im Vorfeld detektieren kann. Ein solches wurde auch seitens der MRO-Unternehmen, im Rahmen der Studien in Abschnitt 2.6, gefordert und als Absicherungswerkzeug bezeichnet. Die Herausforderungen für ein System zur Absicherung sind die spezifischen Charakteristiken der Instandhaltung, der Umgebung eines Instandhaltungsprozesses, der zu bearbeitenden Bauteile sowie der zu detektierenden Fehlertypen. Diese führen dazu, dass ein geeignetes System immer speziell für die jeweiligen Anforderungen konzipiert werden muss.

Informatisierung Die Informatisierung stellt den zentralen Aspekt des Automatisierungskonzeptes dar. Mittels dieser müssen sowohl die weiteren Aspekte des Konzeptes in einem Assistenzsystem auf Prozessebene integriert, als auch die Interaktion mit den übrigen prozessbeteiligten Ressourcen analysiert und homogenisiert werden. Eine solche Einführung und Verbesserung des Informations- und Konfigurationsmanagements wurde auch in den wissenschaftlichen Studien seitens der MRO-Unternehmen als Lösungsansatz benannt und gefordert. Zur Reduktion der Vielzahl an kritischen Interaktionen, mit denen sich der

⁶[Sys07] zitiert in diesem Zusammenhang [Wil01].

Facharbeiter konfrontiert sieht, soll über das zu konzipierende Informations- und Kommunikationssystem eine zentrale Benutzerschnittstelle für die gesamte Prozessdurchführung bereit gestellt werden. Beim Entwurf des Informations- und Kommunikationssystems muss zwischen Hard- und Softwareschnittstellen differenziert werden. Hardwareschnittstellen bezeichnen, aus Sicht der Informatik, die physikalischen Verbindungspunkte zwischen gekoppelten peripheren Systemkomponenten. Die Softwareschnittstellen definieren „die Möglichkeit und die Art und Weise des Datenaustausches zwischen verschiedenen Programmmodulen und Programmen“ [Hal94, S.169]. Zur Homogenisierung der Prozessdurchführung muss die zentrale, softwareseitige Benutzerschnittstelle gezielt für die Anforderungen der Facharbeiter und ihre verschiedenen Qualifikations- und Spezialisierungsgrade entworfen und nach ergonomischen Gesichtspunkten gestaltet werden. Auf diese Weise kann auch die Prozessdurchführung für verschiedene Benutzergruppen realisiert werden. Dies geht einher mit der Forderung des Arbeitskreises Industrie 4.0, der in seiner Umsetzungsempfehlung fordert, „personalisierte und auf spezielle Zielgruppen leicht adaptierbare Interaktionssysteme“ [KWH13, S.100] zu entwickeln.

Für die gezielte Unterstützung des Facharbeiters gilt es über die Benutzerschnittstelle sowohl die systematische Vorgehensweise zur Wiederverwendung von Prozesswissen zu implementieren, als auch den Facharbeiter bei der Durchführung des Instandhaltungsprozesses zu leiten. Dies erfordert den prozessspezifischen Entwurf des Informations- und Kommunikationssystems. Darüber hinaus müssen auch die Interaktion mit den weiteren Ressourcen durch das Informations- und Kommunikationssystem sowie seine Benutzerschnittstelle realisiert werden. Dazu zählen andere Systeme, wie ein System zur Absicherung kritischer Schnittstellen, oder auch Werkzeugmaschinen. Deren Integration erfordert die Verwendung oder Konzeption hardwareseitiger Schnittstellen zur Kommunikation. Zudem müssen auch Ressourcen integriert werden, die nicht als System zur Verfügung stehen oder durch ein solches verwaltet werden. Diese gilt es, beim Entwurf der softwareseitigen Schnittstelle zu berücksichtigen und in den Prozess zu integrieren.

Die Integration eines Informations- und Kommunikationssystems auf Prozessebene eröffnet auch die Möglichkeiten der automatisierten Kommunikation in horizontaler und vertikaler Richtung innerhalb der Automatisierungspyramide. So können sowohl zusätzliche Informationen anderer Systeme für die Prozessdurchführung auf Prozessebene verwendet, als auch vor Ort akquirierte Daten bereitgestellt werden. Darüber hinaus unterstützt die Informatisierung des Instandhaltungsprozesses und die damit einhergehende Prozessorientierung und Digitalisierung prozessspezifischen Wissens auch den Prozess der kontinuierlichen Verbesserung. Dieser wird im Sinne der Lean-Prinzipien als *Kaizen* bezeichnet [Bec06].

3.3. Zusammenfassung

Basierend auf den im zweiten Kapitel dieser Arbeit identifizierten Defiziten der Instandhaltungsprozesse im MRO und den Anforderungen an sie, wurden im ersten Abschnitt dieses Kapitels repräsentative Instandhaltungsprozesse modelliert und hinsichtlich ihrer Automatisierungspotenziale untersucht. Darauf aufbauend wurden die Lösungsaspekte des Gesamtkonzeptes erläutert, die in Kombination ein modular aufgebautes Assistenzsystem auf Prozessebene darstellen. Dabei dient die Modularisierung nicht nur der Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit, sondern vor allem auch der Wiederverwendbarkeit einzelner Module. Die Optimierung von Teilprozessen durch systematische Wiederverwendung führt zur Re-

duzierung von Verschwendung. Kritische Schnittstellen der Prozessdurchführung mit großem Fehlerpotenzial sollen durch speziell konzipierte Systeme abgesichert werden. Mittels der Informatisierung werden alle Lösungskomponenten in einem Informations- und Kommunikationssystem auf Prozessebene integriert, das über Schnittstellen auch die Interaktion mit weiteren prozessbeteiligten Systemen ermöglicht. Das Assistenzsystem stellt darüber hinaus dem Facharbeiter eine zentrale Benutzerschnittstelle für die Prozessdurchführung zur Verfügung. Abbildung 3.2 (b) zeigt das Zusammenspiel beteiligter Ressourcen und Objekte der Prozessdurchführung bei Anwendung des Automatisierungskonzeptes. Der Vergleich mit deren Zusammenspiel ohne Anwendung des Automatisierungsansatzes in Abbildung 3.2 (a) verdeutlicht noch einmal die Optimierung. Während der Facharbeiter im klassischen Sinne sowohl als Systemglied als auch als Schnittstelle innerhalb des Instandhaltungsprozesses agiert, fungiert er bei der Automatisierung als integrales Systemglied und das Assistenzsystem als zentrale Schnittstelle.

Das im Rahmen dieses Kapitels vorgestellte und in Abbildung 3.3 zusammengefasste Konzept führt zu folgender Hypothese dieser Arbeit:

Der Einsatz einer prozessangepassten Automatisierungslösung in Form eines Informations- und Kommunikationssystems, das die gezielte Unterstützung des Facharbeiters durch die systematische Wiederverwendung von Prozesswissen und die Integration eines Systems zur Fehlervermeidung ermöglicht, führt zu Effizienzsteigerungen von Instandhaltungsprozessen im MRO.

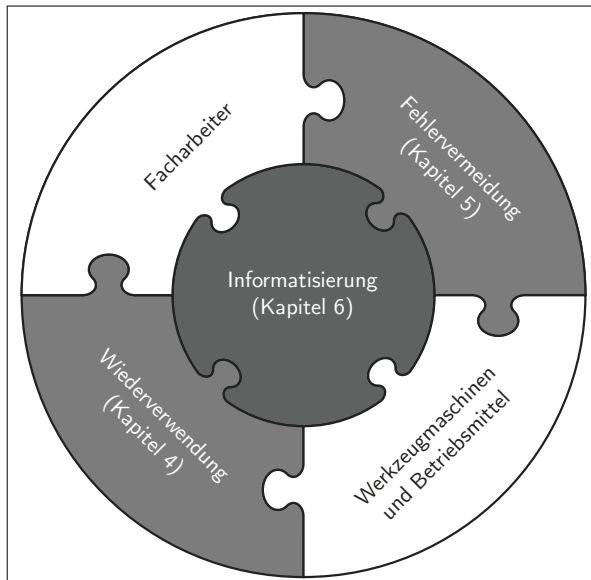


Abbildung 3.3.: Aspekte des Konzeptes zur Automatisierung von Instandhaltungsprozessen kleinster Losgrößen auf Prozessebene

4. Prozessoptimierung durch Wiederverwendung

Gegenstand dieses Kapitels ist die Optimierung eines Instandhaltungsprozesses durch die systematische Wiederverwendung von Prozesswissen für die wiederkehrende Bearbeitung gleicher Bauteile. Auf diese Weise soll Verschwendung in Form der unsystematischen Durchführung von Arbeitsschritten, der erneuten Erstellung bereits in der Vergangenheit erstellter Lösungen und daraus resultierender Zeiträume von Unproduktivität einer Werkzeugmaschine reduziert werden. Großes Potenzial, Effizienzsteigerungen durch Wiederverwendung herbeizuführen, wurde insbesondere im elementaren Teilprozess *Spannen und Ausrichten* und bei Tätigkeiten, die mit dem Einsatz automatisierter Werkzeugmaschinen einhergehen, wie beispielsweise der *Programmierung*, identifiziert.

Nachfolgend sollen daher die Grundlagen für den im Rahmen dieser Arbeit verfolgten Ansatz zur Prozessoptimierung durch Wiederverwendung gelegt und dieser anschließend näher erläutert werden. Abschließend erfolgt eine Anwendung in Form des Entwurfs zweier Lösungsansätze zur Reduzierung von Verschwendung an beispielhaften Teilprozessen der Instandhaltung.

4.1. Grundlagen der Komplexitätsbeherrschung

Als übergeordnete Maßnahmen zur Komplexitäts- und Aufwandsreduktion im Kontext der Adaption individueller Produkte bieten sich nach [LRZ06], [Pil06] und [Sch14] die folgenden Strategien an: die Modellierung, die Standardisierung, die Wiederverwendung und die Automatisierung. Die erstgenannte bildet die Grundlage einer strukturierten Herangehensweise zur Komplexitätsbeherrschung. Die Standardisierung und Wiederverwendung sind Gegenstand des Optimierungsansatzes dieses Kapitels zur Prozessoptimierung. Er soll im Rahmen der Automatisierung von Instandhaltungsprozessen Anwendung finden.

Die Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte gliedert sich nach der VDI-Richtlinie 2221 [VDI93][#] in sieben Arbeitsabschnitte, die in Abbildung 4.1 dargestellt sind. In jedem Arbeitsschritt wird jeweils ein Arbeitsergebnis erzielt. Von Bedeutung für den weiteren Verlauf dieses Kapitels sind die Arbeitsabschnitte zwei bis vier. Im zweiten Abschnitt *Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen* werden die wesentlichen vom Produkt zu erfüllenden Teilfunktionen ermittelt, „deren Gliederung und Kombination zu Strukturen die Grundlage zum Suchen nach Lösungen für [...] die Gesamtfunktion“ [VDI93, S. 10][#] bildet. Im dritten Schritt *Lösungsprinzipien und deren Strukturen* gilt es für die wesentlichen Teilfunktionen Lösungsprinzipien zu suchen, die anschließend entsprechend den Funktionsstrukturen zur Wirkstruktur verknüpft werden. Im vierten Arbeitsabschnitt *Gliedern in realisierbare Module* erfolgt die Gliederung der prinzipiellen Lösung in realisierbare Module. Dessen Ergebnis ist eine modulare Struktur, die „bereits die Gliederung der Lösung in die für deren Realisierung wesentliche reale Gruppen und

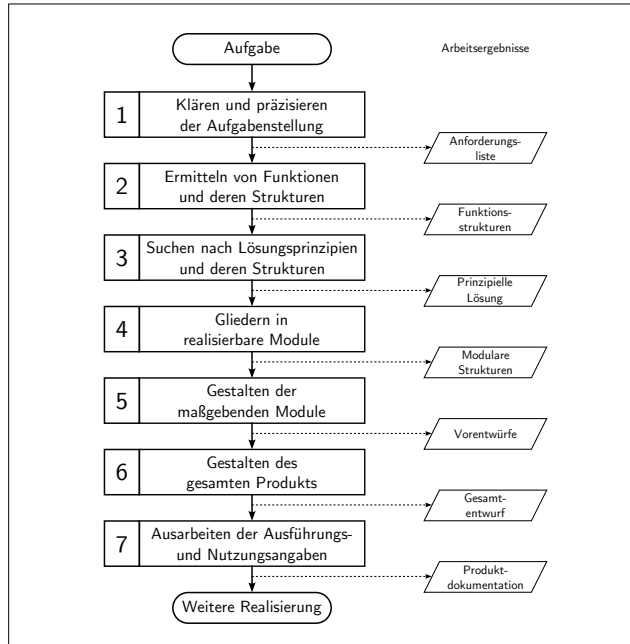


Abbildung 4.1.: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI93][#]

Elemente (Teilsysteme und Systemelemente) einschließlich deren Verknüpfungen (Schnittstellen) erkennen läßt“ [VDI93, S. 10][#]. Diese Modularisierung ist vor allem wichtig, um eine effiziente Aufteilung der Konstruktionsarbeit zu erleichtern und durch Strukturierung bestimmte Entwicklungsschwerpunkte besser erkennen und lösen zu können.

Die in [VDI93][#] definierte Vorgehensweise bildet die Grundlage zur Komplexitätsbeherrschung in der Entwicklung, der Produktion und dem Vertrieb. Sie hat sowohl für einzelne komplexe Produkte, technische Systeme und Prozesse, als auch für rapide wachsende Modellpaletten und Variantenzahlen, aufgrund zunehmender Kundenorientierung der Unternehmen, Gültigkeit [LRZ06].

4.1.1. Standardisierung und Formalisierung

Die Prinzipien der Wiederverwendung sind eng verknüpft mit den Begriffen der Standardisierung und der Formalisierung. Sowohl die Standardisierung, als auch die Formalisierung sind verzahnt mit einer Informatisierung. Sie bilden die Voraussetzungen der Wiederverwendung. Auf die Informatisierung von Instandhaltungsprozessen wird in Kapitel 6 eingegangen.

Standardisierung Der Begriff der *Standardisierung* bedeutet in einer weiten Begriffsfassung das „antizipative Durchdenken von Problemlösungswegen und die darauf aufbauende Festlegung von Aktivitätsfolgen, sodass diese im Wiederholungsfall mehr oder weniger routiniert und gleichartig ablaufen“ [May05, S. 27]⁷ bzw. „eine zweckmäßige Vereinheitlichung von Objekten nach bestimmten Mustern“ [Meu07, S. 452]⁸. Die Standardisierung kann sich dabei auf technische und strukturelle Aspekte wie Module, Bauelemente und Komponenten, auf prozessorientierte Aspekte wie Phasen und Ablauforganisation sowie auf aufbauorganisatorische Aspekte wie Schnittstellen zwischen Abteilungen beziehen [BWW03]. Als Träger der Standardisierungsprozesse kann zwischen einzelnen Unternehmen, dem Markt und Normungsinstitutionen, wie dem Deutschen Institut für Normung e. V. (DIN), unterschieden werden [KFJ96].

Bezüglich der Standardisierung auf Prozessseite muss berücksichtigt werden, dass mit dem Begriff der Standardisierung nicht das Prinzip der klassischen starren Standardisierung gemeint ist, das darauf zielt, möglichst jede Vielfalt zu eliminieren. Vielmehr geht es im Kontext der heutigen Anforderungen an produzierende Unternehmen darum, die mit der notwendigen Prozessflexibilisierung einhergehende Komplexitätssteigerung zu reduzieren. Daher spricht man in diesem Zusammenhang auch von der sogenannten *flexiblen Standardisierung*. Nach [Spr05] geht es bei der flexiblen Standardisierung angesichts großer Produkt- und Variationsvielfalt vor allem darum, die wesentlichen Gemeinsamkeiten auf Prozessebene zu finden. Bezüglich der Flexibilität argumentiert [Pfe07], dass diese im Zuge der Standardisierung nur erhalten bleiben kann, wenn die Standardisierung „das Elastizitätspotenzial von Erfahrung in diesen Prozessen anerkennt und berücksichtigt und Standards entwickelt, die eine weitere Genese und Nutzung von Erfahrung ermöglichen statt verhindern“ [Pfe07, S. 228].

Formalisierung Im Kontext der Arbeitswissenschaften wird unter der *Formalisierung* allgemein die Strukturierung und Standardisierung von Prozessen bezeichnet. Die Formalisierung bedeutet „die Fixierung expliziter und einforderbarer Verhaltens- und Ablaufregeln, welche die Erledigung typischerweise zu erwartender Aufgaben vorstrukturieren, indem sie die dafür erforderlichen Aktivitäten und Abläufe in standardisierter Form vorschreiben“ [FSS08, S. 13]. Eine deutlich rigidere Definition der Formalisierung ist die Auffassung dieser als formal-logisches Kriterium der Berechenbarkeit bzw. der Entscheidbarkeit von mathematischen Problemen [SAR08]. In dieser engen Definition wird in der Formalisierung die Voraussetzung für die Informatisierung gesehen, da sich nur solche Verfahren informationstechnisch umsetzen lassen, die auch gemäß dieser engen Begriffsfassung formal beschrieben werden können [SAR08]. Gleiches gilt im Hinblick auf die Wiederverwendbarkeit von Artefakten.

Die Art der Formalisierung kann in zwei gegenläufige Vorgehensweisen differenziert werden, deren Anwendung von der Art der Arbeitstätigkeit abhängt [FSS08]. Bei weniger komplexen Tätigkeiten, die bereits vor Einführung der Informatisierung als standardisierte Handlungsabläufe vorlagen oder sich bei der Einführung leicht standardisieren ließen, reicht zur Steuerung des Arbeitshandelns in der Regel die Festschreibung weniger fester Parameter. Man spricht von einer Formalisierung durch Tätigkeitsparameter. Komplexe Tätigkeiten, deren Abläufe sich nicht vorstrukturieren lassen, erfordern häufig den „eigen-

⁷[May05] verweist auf [Gro82].

⁸[Meu07] verweist auf [Ree93].

verantwortlichen und mit eigener Kompetenz ausstatten [sic!] ‚autonomen Wissensarbeiter‘, für den im informatisierten Arbeitszusammenhang jene Leerstellen der Formalisierung vorgesehen werden müssen, die es ihm erlauben, selbstständig zu tun, was die jeweilige Aufgabe in der betreffenden Situation verlangt“ [FSS08, S. 21]. Diese Leerstellen werden nach [SAR08] auch als notwendige Formalisierungslücken bezeichnet und entstehen dann, wenn „die erwartbaren Situationen im Anwendungskontext nicht vollständig beschreibbar sind“ [SAR08, S. 253]. Neben der Verwendung notwendiger Formalisierungslücken besteht für komplexe Tätigkeiten die häufig eingesetzte Möglichkeit der Formalisierung durch Vorgabe von Zielparametern.

4.1.2. Wiederverwendung

Der Begriff der *Wiederverwendung* kann bei der Betrachtung aus verschiedenen Blickrichtungen unterschiedliche Bedeutungen haben, die in zwei verschiedene Erscheinungsformen differenziert werden können [PBF07]:

- die Wiederverwendung desselben Artefaktes in einer anderen Umgebung und
- die Wiederverwendung eines Artefaktes in gleicher oder anderer Umgebung.

Unter einem Artefakt soll nachfolgend ein vom Menschen erschaffenes Produkt oder Zwischenprodukt verstanden werden, das sowohl materieller als auch immaterieller Art sein kann. Beispiele für materielle Artefakte sind Werkzeuge oder Betriebsmittel. Wissen, Methoden und Konzepte stellen Beispiele für immaterielle Artefakte dar [Die02].

Die erstgenannte Erscheinungsform meint die Wiederverwendung im Sinne des Recyclings. Ein Beispiel ist der Einsatz von Bauteilen oder Baugruppen in einer neuen Umgebung. Primäres Ziel ist dabei die Einsparung von Aufwand, indem ein nicht mehr benötigtes Artefakt an anderer Stelle eingesetzt wird. Diese Form der Wiederverwendung spielt im Kontext dieser Arbeit keine Rolle und soll nicht weiter betrachtet werden.

Die zweite Erscheinungsform kann sowohl die wiederkehrende Verwendung des gleichen Artefaktes im gleichen Kontext als auch die Wiederverwendung eines Artefaktes in anderem Kontext bedeuten. Die wiederkehrende Verwendung im gleichen Kontext wird im Bereich der Konstruktionslehre auch als Wiederholteilverwendung bezeichnet und bezieht sich auf die „naheliegende, jedoch häufig nicht berücksichtigte Verwendung gleicher und bestehender Einzelteile, sei es an verschiedenen Stellen desselben Produkts oder in verschiedenen Produkten“ [Rat93, S. 111]. Auch die Softwareentwicklung bietet hierfür zahlreiche Beispiele, wie die Wiederverwendung von Quellcode. Beispiele für die Wiederverwendung des gleichen Artefaktes in anderem Kontext finden sich im Engineering, in Form der Adaption von bewährten Prozessen oder Lösungswegen für häufig auftretende Problemstellungen.

Für die Anwendung kann zwischen Prinzipien und Methoden unterschieden werden. Als Prinzipien werden Vorgehensweisen bezeichnet, die allgemeingültig, abstrakt und weitestgehend unabhängig von einem Anwendungsgebiet sind [Bal82]. Methoden wiederum führen zur Anwendbarkeit von Prinzipien und sind anwendungsneutrale, planmäßig angewandte und begründete Vorgehensweisen zur Erreichung festgelegter Ziele [Die02]. Entscheidend für die Anwendung des Prinzips der Wiederverwendung und damit auch für den weiteren Verlauf dieses Kapitels sind die erforderlichen Voraussetzungen. Diese werden durch Prinzipien der Standardisierung, der Modularisierung, der Lokalität und der integrierten

Dokumentation geschaffen [Bal82]. Die Wiederverwendung kann in zwei Arten differenziert werden: die unsystematische und die systematische [Die02], die auch als ungeplant oder geplant bezeichnet werden können [Mah14]. Bei der unsystematischen Wiederverwendung erfolgt diese meist spontan, indem sich ein Nutzer an Artefakte erinnert und diese erneut einsetzt. Diese wurden aber bei der Erstellung nicht speziell für die wiederholte Verwendung entwickelt.

Für die systematische Wiederverwendung hingegen werden Artefakte so abstrahiert und entwickelt, dass diese in möglichst vielen anderen Kontexten mit geringem Änderungsaufwand erneut eingesetzt werden können. Deren Entwicklung ist in der Regel mit einem Mehraufwand gegenüber einer kontextspezifischen Lösung verbunden [Lev93], verspricht jedoch auch wesentliche Vorteile. Diese liegen vor allem in einer höheren Qualität der Artefakte und reduzierten Kosten durch die mehrmalige Einsetzbarkeit [BvP05]. Die geplante Wiederverwendung von Artefakten erfordert standardisierte oder leicht anpassbare Schnittstellen. Dazu müssen wiederkehrende Funktionalitäten identifiziert und im vierten Arbeitsabschnitt der Vorgehensweise zum Entwickeln und Konstruieren nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI93][#] gekapselt werden. Anschließend gilt es, entsprechende Schnittstellen zu definieren. Diese gekapselten Funktionen werden auch als Komponenten und die Form der geplanten Wiederverwendung als komponentenbasiert bezeichnet.

Die verschiedenen Methoden der Wiederverwendung lassen sich nach [Mah14] auf vier wesentliche reduzieren: Module, Copy-and-Paste, Templates und Patterns. Während Templates und Patterns eher abstrakte Methoden in Form der Bereitstellung von spezifischen Vorlagen für die Erstellung konkreter Lösungselemente (Templates) oder Lösungsschablonen für wiederkehrende Entwurfsprobleme (Patterns) darstellen, befassen sich die beiden erstgenannten mit der wiederholten Nutzung bereits konkretisierter Artefakte.

Mit dem Begriff *Module* werden Artefakte bezeichnet, die „mit unterschiedlichen Funktionen, aber einheitlichen Schnittstellen eine vielfältige Kombinierbarkeit der Komponenten ermöglichen“ [Rap10, S. 51]. Die Verwendung von Modulen stellt folglich eine komponentenbasierte Form der Wiederverwendung dar. Sie können dabei sowohl in Form von Blackboxes als auch in Form von Whiteboxes, Glassboxes oder Greyboxes vorliegen. Blackboxes legen dem Anwender nur die Funktionalität und die Schnittstelle offen, nicht jedoch die Umsetzung der Funktionalität. Whiteboxes hingegen ermöglichen dem Anwender die vollständige Einsehbar- und Manipulierbarkeit der Komponenten [Dum13]. Glass- und Greyboxes stellen Mischformen der Black- und Whiteboxes dar und werden in der Literatur unterschiedlich definiert und differenziert ([Die02], [Mah14]). Ein System von Produkten, das so konzipiert ist, dass alle Produkte aus einer begrenzten Zahl von Bausteinen, in Form von Komponenten, hergestellt werden können, wird als Baukastensystem bezeichnet [Rap10]. Bezogen auf die Konstruktion sind Baukästen charakterisiert durch „einen oder wenige Grundkörper, an die in verschiedenen Montagestufen unterschiedlich variantenreiche Anbauteile montiert werden“ [Rap10, S. 52].

Die Methode des *Copy-and-Paste* ist die verbreitetste Methode der Wiederverwendung und basiert darauf, eine Information oder ein Artefakt zu kopieren und an derer Stelle oder in anderem Kontext einzufügen bzw. zu verwenden. Dabei kann die Wiederverwendung sowohl in Form von Blackboxes als auch von Whiteboxes mit Funktionsanpassung erfolgen [Mah14].

Spezifische Vorlagen, die einen Nutzer bei der Erstellung von Inhalten unterstützen, werden als *Templates* bezeichnet [Urb04]. Sie werden häufig im Zusammenhang mit der Organisation von Daten und Informationen eingesetzt, um diese zu strukturieren und zu formalisie-

ren [Urb04]. Dazu „muss ein Template Strukturelemente beinhalten und auch die Struktur bzw. die Regeln selbst vorgeben, nach denen die entsprechenden Daten abgelegt werden [SH09a]“ [Mah14, S. 32]⁹. Templates können jedoch nicht nur dazu genutzt werden, Daten strukturiert abzulegen, sondern diese auch strukturiert einem Anwender zur Verfügung zu stellen.

Durch ein *Pattern* soll einem Anwender ein Lösungsweg für häufig auftretende Problemstellungen bereitgestellt werden. Bei der Pattern-Methode kann die Lösung zwar wiederverwendet werden, allerdings handelt es sich bei dieser „nicht um eine konkrete Umsetzung oder Ausführung, sondern um eine Art Rahmen, dessen Umsetzung und Inhalt der Anwender selbst ausgestalten muss“ [Mah14, S. 34].

4.2. Ansätze zur Prozessoptimierung durch Wiederverwendung

Die Analyse der Instandhaltungsprozesse in Kapitel 3.1 identifizierte Teilprozesse als ineffizient. Zur Effizienzsteigerung wird hier die Reduzierung von Verschwendung aufgegriffen. Diese kann, bezogen auf die Teilprozesse der Instandhaltung, in zwei Erscheinungsformen unterteilt werden:

- die Verschwendung in Form der wiederholten Durchführung einzelner Teilprozesse für gleiche Bauteile ohne die systematische Berücksichtigung der dazu in der Vergangenheit erstellten Arbeitsergebnisse und
- die Verschwendung im Zuge der erneuten Erstellung bereits erstellter Lösungsartefakte innerhalb eines Teilprozesses.

Bezogen auf beide Erscheinungsformen muss berücksichtigt werden, dass ein hoher Zeit- und Kostendruck in Kombination mit der erforderlichen Flexibilität der Prozesse auf Werkstattebene dazu führt, dass im Tagesgeschäft wenig bis keine Kapazitäten zur Verfügung stehen, um nachhaltige und systematische Ansätze zur Vermeidung von Verschwendung zu konzipieren und zu verfolgen. Die Entwicklung eines solchen Ansatzes und damit zur Optimierung der Prozesse muss daher losgelöst von derartigen Einflussfaktoren erfolgen und anschließend auf die Prozesse übertragen werden.

Für beide Erscheinungsformen bietet vor allem die spezifische Charakteristik der Instandhaltung Potenziale, diese durch den systematischen Einsatz von Methoden der Wiederverwendung zu minimieren. Dazu gilt es, nach der Modellierung des Instandhaltungsprozesses und der Analyse von Prozessstruktur und Kennzahlen, die identifizierten Verschwendungen in den Teilprozessen hinsichtlich ihrer Erscheinungsform zu differenzieren. Damit die Wiederverwendung von Prozesswissen oder einzelner Lösungsartefakte systematisch erfolgen kann, müssen die dazu notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden. Die Analyse der Prozesse in den vorangehenden Kapiteln zeigte gerade hier große Defizite. Die Formalisierung eines Prozesses erfolgt in der Regel nur durch die Vorgabe von Ziel- und Rahmenparametern, sodass weder eine Standardisierung, noch eine durchgängige Formalisierung oder Informatisierung gegeben ist. Gleiche Defizite gibt es bei der Vorgehensweise zur Erstellung von Lösungsartefakten in Teilprozessen. Diese werden in der Regel nicht

⁹[Mah14] verweist auf [SH09].

methodisch strukturiert oder gar im Kontext von Wiederverwendungsprinzipien erstellt, sondern situativ, bauteil- und zustandsabhängig.

4.2.1. Wiederverwendung von Prozesswissen

Der Ansatz zur Wiederverwendung des Prozesswissens verfolgt das Ziel, jegliche prozessspezifischen Informationen, die für die Bearbeitung eines Bauteils notwendig sind, für dessen wiederkehrende Bearbeitung systematisch wiederzuverwenden. Beispiele für derartige Arbeitsergebnisse können sowohl eine Reihenfolge durchgeführter Arbeitsschritte, die dazu verwendeten Betriebsmittel oder auch Parameter einer maschinisierten Bearbeitung sein. Dazu müssen die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, um die Arbeitsergebnisse der Teilprozesse informations- und kommunikationstechnisch erfassen und für die erneute Bearbeitung bereitstellen zu können.

Eine bewährte Herangehensweise ist die Anwendung der Prinzipien der Standardisierung, Strukturierung, Modularisierung und Lokalität. Die drei letztgenannten Prinzipien erfordern wiederum die Anwendung des Prinzips der Abstraktion, die damit den ersten Schritt für den Entwurf einer systematischen Wiederverwendung darstellt [Bal82]. Die Abstraktion erfolgt in Form der detaillierten Modellierung des Instandhaltungsprozesses und seiner Teilprozesse. Für eine umfassende und aussagekräftige Gestaltung dieser sollten Informationen aus verschiedenen Quellen und Blickrichtungen herangezogen werden. Dazu zählen z. B. Dokumentationen zu Soll-Prozessen und Rahmenbedingungen, das Prozesswissen der Facharbeiter und vor allem auch die Analyse der Ist-Prozesse. Erst wenn man auf diese Weise bis in die Mikrostrukturen der Arbeitsprozesse vordringt und dort die Ähnlichkeiten einzelner Tätigkeiten trotz unterschiedlicher Aufgabenstellungen sichtbar macht, lassen sich Organisations- und Arbeitsstandards entwickeln, die komplexe Abläufe vereinfachen, ohne die Flexibilität zu verringern [SM06].

Die Abstraktion und die Erfüllung des Prinzips der Lokalität, das besagt, dass alle relevanten Informationen, die zum Verständnis eines Zusammenhangs notwendig sind, an einer Stelle lokalisiert sein sollen, bilden schließlich die Basis für die Strukturierung, Standardisierung und Modularisierung. Dazu gilt es sowohl bauteilübergreifende und zustandsunabhängige Arbeitsschritte zu identifizieren, als auch diese zu kategorisieren und in übergeordnete Gruppen zu abstrahieren, die abhängig von Zustand und Bauteilspezifikation sind. Gerade bei den stark zustandsabhängigen und flexiblen Instandhaltungsprozessen muss das Bestreben zur Strukturierung der Teilprozesse jedoch nicht in der Form zielführend sein, als dass bauteilübergreifend und zustandsunabhängig eine klare und standardisierbare Prozessstruktur identifiziert und definiert werden kann. Vielmehr gilt es, unabhängige Arbeitsschritte zu standardisieren und die Flexibilität von Tätigkeiten, die abhängig von Bauteil und Zustand sind, beizubehalten. Dies führt dazu, dass häufig beide Arten der Formalisierung kombiniert werden müssen. Die bereits angesprochene flexible Standardisierung sowie die Nutzung notwendiger Formalisierungslücken spielen eine entscheidende Rolle. Während sich die unabhängigen, standardisierbaren Arbeitsschritte durch Tätigkeitsparameter formalisieren und informatisieren lassen, müssen die zustands- und bauteilabhängigen Tätigkeiten weiter differenziert werden. Für diese bietet sich einerseits die Möglichkeit, Parameter für abstrahierte übergeordnete Tätigkeiten bauteilabhängig zu formalisieren. Andererseits kann die Formalisierung auch durch unabhängige Zielparameter erfolgen und damit die bewusste Definition von Formalisierungslücken.

Die häufig von manuellen Tätigkeiten dominierten klassischen Teilprozesse lassen sich häu-

fig nicht ohne Veränderungen der Arbeitsabläufe oder der verwendeten Betriebsmittel standardisieren und formalisieren. Gerade für diese Fälle kann die Abstraktion eines Teilprozesses, unter Berücksichtigung des kompletten Bauteilspektrums und aller Arbeitsvorgaben, mögliche Lösungswege aufzeigen. Zur Lösungsfindung bietet sich die systematische Vorgehensweise nach VDI Richtlinie 2221 [VDI93][#] an. Auf diese Weise kann zudem, neben einer modularisierten und standardisierbaren Lösung, auch die Wiederverwendung einzelner Lösungsartefakte ermöglicht werden. Ein Beispiel wäre die Einführung eines Baukastensystems aus Betriebsmittelkomponenten, welche kombiniert ein für alle Bauteile adaptierbares Betriebsmittel darstellen. Ein derartiger Baukasten kann sowohl Hilfsmittel zur Strukturierung und Standardisierung der Arbeitsschritte selbst sein, als auch die bauteilübergreifende Wiederverwendung einzelner Artefakte des Baukastens ermöglichen. Gelingt es durch diese Vorgehensweise, Teilprozesse sowohl abhängig als auch unabhängig von Bauteil und dessen Zustand flexibel zu standardisieren und zu formalisieren, so können diese auch informationstechnisch erfasst werden. Für den Prozess der Erfassung und Wiederverwendung des Prozesswissens eignet sich die Methode der Templates. Solche bieten die Möglichkeit, basierend auf der erarbeiteten Struktur und Standardisierung eines Teilprozesses, die notwendigen Informationen für die Formalisierung der einzelnen Arbeitsschritte zu definieren. Die Verwendung solcher Templates bildet die Grundlage einer Informatisierung des Prozesses und damit der systematischen Wiederverwendung von Prozesswissen für dessen Durchführung.

Die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit des Ansatzes zur Wiederverwendung von Prozesswissen auf Instandhaltungsprozesse soll im nachfolgenden Unterkapitel 4.3 aufgezeigt werden. Dessen Anwendung soll die Rüstzeitminimierung bei kleinen Losgrößen ermöglichen, indem das notwendige Prozesswissen formalisiert und systematisch wiederverwendet werden kann.

4.2.2. Wiederverwendung einzelner Lösungsartefakte

Zur Reduktion der Verschwendung, aufgrund der erneuten Erstellung von in der Vergangenheit erstellten Artefakten, muss die systematische Wiederverwendung dieser betrachtet werden. Beispiele für derartige Lösungsartefakte können sowohl materieller Form, wie individuell gefertigte Betriebsmittel, als auch immaterieller Form, wie Maschinenprogramme, sein. Dabei kann ein Lösungsartefakt sowohl innerhalb des Entwicklungsprozesses als auch zur Erstellung neuer Lösungen wiederverwendet werden. In Frage kommen dafür die Methoden der Wiederverwendung mittels Copy-and-Paste und die Wiederverwendung von Modulen. Auch für die systematische Wiederverwendung ist die Schaffung der strukturellen Voraussetzungen zwingend notwendig. Dazu müssen die Prozesse zur Entwicklung von Lösungen standardisiert durchgeführt werden, so dass, basierend auf klar definierten modularen Strukturen, Module und Schnittstellen definiert werden können. Hierfür bietet sich die in [VDI93][#] definierte generelle Vorgehensweise zum Entwickeln und Konstruieren. Für die Wiederverwendung einzelner Lösungsartefakte muss prozessabhängig beurteilt werden, ob die Vorteile hinsichtlich einer Qualitätssteigerung und Zeiteinsparung die Nachteile überwiegen. Diese liegen vor allem in einer häufig notwendigen Änderung eines Entwicklungsprozesses, um die Voraussetzungen für Wiederverwendbarkeit zu schaffen. Ein Mehraufwand bei der Entwicklung ist zudem zu erwarten. Ein Beispiel für eine Umsetzung sei der Aufbau einer Bibliothek von Programmmodulen zur Erstellung von Maschinenprogrammen. Diese Programmmodule könnten sowohl unveränderbar als Blackbox-Module

oder adaptierbar als Whitebox-Module zur Verfügung stehen und so Programmteile für die Bearbeitung von Primitiven abbilden, die bei vielen Bauteilen vorzufinden sind. Im Vorfeld definierte Schnittstellen ermöglichen eine zeiteffiziente Erstellung eines neuen Maschinenprogramms durch Kombination existierender Module aus der Programmbibliothek mit neuen individuell und bauteilspezifischen erstellten Programmsegmenten.

Die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit des Ansatzes zur Wiederverwendung einzelner Lösungsartefakte auf Instandhaltungsprozesse soll in Unterkapitel 4.4 aufgezeigt werden. Dazu wird die Roboterprogrammierung betrachtet. Sie soll durch den Ansatz optimiert werden, indem Programme durch Wiederverwendung und Kombination von Modulen aus einer Programmbibliothek erstellt werden können.

4.3. Konzept zur Rüstzeitminimierung bei kleinen Losgrößen

Unter dem Rüsten versteht man alle Vorgänge, die notwendig sind, um eine Anlage vom Produktionsende eines zuvor produzierten Produkts in den Zustand zu versetzen, an dem Gutteile des nächsten Produktes hergestellt werden können. Die Rüstzeit bezeichnet folglich die dazu benötigte Zeit. Ein Rüstvorgang kann sowohl intern als auch extern erfolgen. Als internes Rüsten werden jene Vorgänge bezeichnet, die einen Stillstand der betreffenden Anlage zur Folge haben. Beim externen Rüsten wird ein Betriebsmittel autark und außerhalb der Anlage vorbereitet, sodass diese parallel produktiv sein kann. Ziel der Rüstzeitminimierung ist die Erzielung einer Zeitersparnis und damit eines Produktivitätsgewinns [Sys07].

Bereits in Abschnitt 2.5 wurde angesprochen, dass ein Bauteil für die Bearbeitung mittels einer Werkzeugmaschine genau gegenüber einem spezifischen Koordinatensystem dieser positioniert und fixiert werden muss. Die Bearbeitung in Losgröße-1 erfordert ein bauteilspezifisches Rüsten der Maschine. Die Analyse zeigt, dass konkrete Instruktionen zur Ausrichtung und Spannung der Bauteile komplexer Geometrie nicht identifiziert werden können. Der Rüstvorgang muss stattdessen für jeden Arbeitsauftrag individuell durchgeführt werden und basiert primär auf der Vorgehensweise und insbesondere dem Erfahrungsschatz des Facharbeiters. Diese Gegebenheiten führen vor allem zu hohen Werten und Schwankungen in den Rüstzeiten sowie einer hohen Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fehlern. Das nicht systematisch genutzte Wissen für die Positionierung eines Bauteils bei der wiederkehrenden Bearbeitung führt darüber hinaus zu einer signifikanten Verschwendung.

Das nachfolgend dargelegte Konzept zur Rüstzeitminimierung soll durch Reduzierung dieser Verschwendung zur Effizienzsteigerung des Teilprozesses *Spannen und Ausrichten* führen. Auf diese Weise soll die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit des Ansatzes der Wiederverwendung von Prozesswissen auf Instandhaltungsprozesse aufgezeigt werden. Dazu werden nachfolgend die Anforderungen eines exemplarischen Teilprozesses *Spannen und Ausrichten* sowie der Stand der Technik und Forschung zur Rüstzeitminimierung dargelegt. Abschließend erfolgt der Entwurf zur systematischen Wiederverwendung des Prozesswissens dieses Teilprozesses.

4.3.1. Rahmenbedingungen und Anforderungen

Nachfolgend soll die Positionierung von Flugzeuggroßbauteilen beim Instandhaltungsprozess *Oberfläche strahlen* betrachtet werden, der Teil des in Abschnitt 2.3 modellierten Reinigungsprozesses ist. Die etwa 200 verschiedenen Bauteile des zu bearbeitenden Bauteilspektrums haben eine Länge von 500 mm bis zu 3.000 mm, eine Ausladung von bis zu 1.400 mm und ein Gewicht von bis zu 750 kg. Für die vollständige Entfernung der Oberflächenbeschichtungen soll ein Strahlroboter eingesetzt werden. Zur automatisierten Ausführung eines Bearbeitungsprogramms muss die diesem zugehörige Positionierung eines Bauteils in der Roboterstrahlkabine exakt reproduziert werden. Für jedes Bauteil ergeben sich mindestens zwei Positionierungen, damit alle Oberflächensegmente bearbeitet werden können.

Die Anforderungen für eine Optimierung der Bauteilpositionierung liegen, neben der Minimierung der Rüstzeiten, in der Reduktion der Anzahl aller benötigten Betriebsmittel und der Gewährleistung der Prozess-, Mitarbeiter- und Bauteilsicherheit. Die Herausforderung liegt vor allem in der komplexen Geometrie der Flugzeugbauteile, ihrer prozess- und zustandsabhängigen Positionierung gegenüber dem Anlagenkoordinatensystem sowie der Einhaltung der vom Hersteller vorgegebenen Rahmenbedingungen. Dazu zählen beispielsweise Vorgaben hinsichtlich Auflagepunkten oder Strukturbelastungen.

4.3.2. Stand der Technik

Ein probates Mittel zur Rüstzeitminimierung im Bereich der Massenproduktion ist vor allem die Bildung großer Losgrößen, z. B. durch Harmonisierung des zu produzierenden Sortiments durch ein modulares Produktkonzept ([Wan09], [Sch06b]). Daraus resultierende Effekte können die Reduktion jeglicher Flexibilität und die auftretende Verschwendung durch Überproduktion sein. Darüber hinaus widerspricht dieser Ansatz den Rahmenbedingungen und Charakteristiken der MRO-Dienstleister, die – mit Ausnahme der OEMs – keinen Einfluss auf die Produktgestaltung haben und mit zu bearbeitenden Bauteilen in Losgröße-1 konfrontiert werden. Der Gegentrend der Lean Automation setzt im Bereich der Massenproduktion auf die Substitution großer Anlagen durch mehrere günstige und flexiblere [Dic08]. Diese Herangehensweise entspricht im Wesentlichen bereits der Konfiguration, die sich in der Instandhaltung über mehrere Jahrzehnte entwickelt und etabliert hat.

Eine übliche Vorgehensweise zur Strukturierung der Rüstvorgänge und zur Reduktion von Rüstzeiten ist die Konstruktion von Spannvorrichtungen. Dabei bezeichnet eine Spannvorrichtung im Sinne der DIN 6300 [DIN09][#] ein „Fertigungsmittel, das Werkstücke während des formändernden Fertigungsverfahrens in einer bestimmten Lage, zum Werkzeug gerichtet, fixiert“ [DIN09, S. 6][#]. Spannvorrichtungen können nach [WB05] generell in vier Gruppen eingeteilt werden:

- einfache Spannmittel und Positionierteile,
- Standardvorrichtungen,
- Baukasten- und Systemvorrichtungen und
- Spezialvorrichtungen.

Bei der Analyse der Instandhaltungsprozesse wurde vornehmlich die Verwendung von Baukästen, bestehend aus einer Vielzahl einfacher genormter Spannmittel und Positionierteile sowie partiell von Spezialteilen, ausgemacht. Durch die Kombination der Baukastenelemente kann ohne Konstruktionsaufwand eine Vorrichtung auch für komplizierte Teile zusammengestellt werden. Die Nutzung derartiger Baukästen aus Normteilen ist für die Einzel- und Kleinserienfertigung charakteristisch [WB05]. Eine Erweiterung dieser Vorgehensweise ist die Verwendung strukturierter und modular aufgebauter, mechanischer Vorrichtungsbaukästen, bestehend aus einer Vielzahl einzelner aufeinander abgestimmter Bauelemente, die dem Werkstück und der Bearbeitungsaufgabe angepasst sind ([Sch10], [Per13]). Vor allem für die wiederkehrende Bearbeitung gleicher Bauteile kann die bauteilspezifische Konstruktion von Bauelementen lohnenswert sein und zu deutlichen Effizienzsteigerungen beim Rüsten führen.

Als konkretes Konzept zur kontinuierlichen Rüstzeitreduzierung hat in den vergangenen Jahren vor allem die Vorgehensweise des SMED (Single Minute Exchange of Die) Anwendung in verschiedenen Industriezweigen gefunden [Gru10]. Sie wurde zur Rüstzeitminimierung schwer zu handhabender Pressformen (engl.: die) bei Toyota entwickelt und dort erstmalig eingesetzt [Sys07]. Die Vorgehensweise des SMED erfolgt in mehreren Schritten, die erst organisatorische Maßnahmen, wie die Standardisierung von Arbeitsschritten, und später auch technische Maßnahmen, wie die gezielte Entwicklung spezieller Werkzeuge und Betriebsmittel, beinhalten. Dabei bezieht sich die der SMED-Ansatz auf „den gesamten Rüstvorgang und umfasst auch den Ein- und Ausbau spezieller Rüstvorrichtungen“ [Sch06b, S.296]. Ziel des SMED ist vor allem die Reduktion ungenutzter Zeiten des Arbeitssystems durch die Transformation interner Rüstvorgänge zu externen [Sch06b]. Die perfekte Umsetzung der SMED Vorgehensweise in seiner höchsten Entwicklungsstufe, in Form der Durchführung eines Rüstvorgangs mit lediglich einem Handgriff, wird auch als OTED (One Touch Exchange of Die) bezeichnet [Sys07]. Häufig ist die Implementierung des SMED, vor allem für Produktionsprozesse von gut handhabbaren Bauteilen in mittleren bis großen Losgrößen, mit einem Robotereinsatz verbunden. Dieser ermöglicht die Automatisierung von Arbeitsvorgängen, wie der Entnahme, dem Transport und der Einlage von Teilprodukten [Gru10]. Zusätzlich werden beispielsweise auch spezielle Wechselplatensysteme eingesetzt, die ein Rüsten außerhalb der Maschine ermöglichen, sowie flexible Spann- und Greifsysteme. Speziell für die automatisierte Fertigung haben sich vor allem hydraulische Spannaktoren aufgrund ihrer hohen Kraftdichte durchgesetzt. Gegenstand der Forschungstätigkeiten ist vor allem die Steigerung des Automatisierungsgrads der Rüstvorgänge – auch für kleine Losgrößen und vielfältige Bauteile komplexer Geometrie. Dazu zählen die Forschungstätigkeiten bezüglich autarker Spannsysteme, flexibler Greifsysteme und die Kombination dieser zu automatisierten, sensorbasierten Bestückungssystemen ([Say11], [PS05], [TW13]).

4.3.3. Entwurf zur reproduzierbaren Positionierung

Der Entwurf eines Konzeptes zur reproduzierbaren Positionierung strebt nicht die Vollautomatisierung an. Vielmehr gilt es, durch ein strukturiertes und modular aufgebautes sowie informatisierbares Konzept zur Bauteilpositionierung, Potenziale der wiederkehrenden Bearbeitung auf Prozessebene aufzugreifen und effizienzsteigernd zu nutzen. Des Weiteren soll die signifikante Rüstzeitminimierung durch eine effiziente Interaktion von Mensch, Maschine und Betriebsmitteln und die gezielte Unterstützung des Facharbeiters erzielt

werden. Basis des Entwurfs stellt eine flexible, kodierbare und mobile Bauteilaufnahme dar, die durch ein Schienensystem und definierte Schnittstellen fest und reproduzierbar in der Roboterstrahlkabine positioniert und fixiert werden kann. Dies ermöglicht auch das im Rahmen des SMED-Ansatzes fokussierte externe Rüsten außerhalb der Anlagenzelle. Darüber hinaus verfügt sie über weitere Schnittstellen, die eine Adaption durch weitere Vorrichtungselemente ermöglichen. Diese können sich sowohl aus Standard- und Normteilen als auch aus bauteilspezifischen Elementen zusammensetzen und bieten auf diese Weise die Möglichkeit zur bauteilspezifischen Individualisierung. Die Vorrichtungselemente gilt es hier ebenso zu kodieren. Die Kodierbarkeit und eindeutige Identifikation von Bauteilaufnahme und Adaptionsvorrichtungen ermöglicht so die Formalisierung und Informatisierung des bauteilspezifischen Prozesswissens. Die Kombination von Bauteilaufnahme und Adaptionsvorrichtungen führt zu einem strukturierten, mechanischen Vorrichtungsbaukasten, der aus einer Vielzahl einzelner, aufeinander abgestimmter sowie dem Bauteilspektrum und der Bearbeitungsaufgabe angepasster Bauelemente besteht.

Zur Validierung wurde in [Bre11] die konstruktionstechnische Umsetzung des Entwurfs zur reproduzierbaren Positionierung untersucht. Dazu wurde gemäß der in der VDI-Richtlinie 2221 [VDI93][#] definierten Vorgehensweise und deren Vertiefung und Ergänzung, in Form der VDI-Richtlinie 2222 [VDI97][#], ein Lösungsprinzip entwickelt. Basis der konstruktionstechnischen Entwicklung waren neben dem zuvor vorgestellten Ansatz zur Rüstzeitminimierung ein Katalog mit technischen, handhabungs- und planungstechnischen Anforderungen sowie ein Katalog des in der Strahlkabine zu positionierenden Bauteilspektrums. Darauf basierend wurden Funktionen und Strukturen definiert und für diese prinzipielle Lösungen in Form von Teilkonzepten entwickelt. Dies ermöglichte sowohl die Abgrenzung der Funktionen der Vorrichtung und die Definition von Schnittstellen als auch die Definition von Funktionen, die Vorrichtungselementen zugeordnet werden können. Die Auswahl des finalen Konzepts zur konstruktionstechnischen Umsetzung erfolgte durch

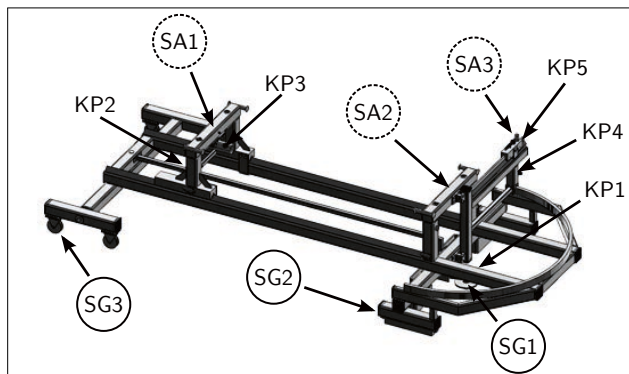










Abbildung 4.2.: Konstruktionstechnische Umsetzung der kodierbaren und mobilen Bauteilaufnahme nach [Bre11]; SG1-SG3: Schnittstellen für die Positionierung und Fixierung in der Strahlkabine; KP1-KP5: Konfigurationsparameter der Bauteilaufnahme; SA1-SA3: Schnittstellen für die Montage von Vorrichtungselementen auf der Bauteilaufnahme

Tabelle 4.1.: Konstruktionstechnische Umsetzung von Adaptionsvorrichtungen zur bauteilspezifischen Erweiterung und Individualisierung der Bauteilaufnahme nach [Bre11]

	A	B	C	D
1				
2				

Kombination der entwickelten Teilkonzepte mit Hilfe eines morphologischen Kastens und zuvor definierter Bewertungskriterien.

Abbildung 4.2 zeigt die konstruktionstechnische Umsetzung der kodierbaren und mobilen Bauteilaufnahme. Diese verfügt über Schnittstellen zur Strahlkabine ($SG1$ - $SG3$), die in Verbindung mit dem Konfigurationsparameter $KP1$ eine reproduzierbare und wiederholgenaue Positionierung in dieser ermöglichen. Weitere drei Schnittstellen ($SA1$ - $SA3$) erlauben die Montage von Adaptionsvorrichtungen. Die auf den ersten Blick gleichen Schnittstellen $SA1$ und $SA2$ werden durch vertikal angeordnete Einstecklöcher abgebildet, die sich zur eindeutigen Differenzierbarkeit in Form und Größe unterscheiden. Zur Adaption kann die Bauteilaufnahme durch vier Konfigurationsparameter ($KP2$ - $KP5$) eindeutig, reproduzierbar und wiederholgenau konfiguriert werden. Der Parameter $KP2$ definiert den Abstand zwischen den zwei gegeneinander verschiebbaren Aufnahmen für Adaptionsvorrichtungen $SA1$ und $SA2$. Der Parameter $KP3$ definiert die Position eines flexiblen Anschlags, an dem jedes Bauteil ausgerichtet werden kann und sorgt für eine hohe Positioniergenauigkeit. Die Parameter $KP4$ und $KP5$ definieren die Ausrichtung eines Schwenkarms sowie die Position der Schnittstelle $SA3$.

Eine repräsentative Auswahl von Adaptionsvorrichtungen, die eine finale bauteilspezifische Individualisierung der Bauteilaufnahme ermöglichen, ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Sie setzen sich aus standardisierten und speziellen Vorrichtungelementen zusammen. Zu den standardisierten Elementen, die sich bauteilübergreifend einsetzen und wiederverwenden lassen, zählen beispielsweise verschiedene Auflageprismen ($A1$, $A2$) und Distanzbleche ($B1$) für $SA1$ und $SA2$ oder ein verstellbarer Sicherungsbügel ($B2$) für $SA3$. Bauteilspezifisch konstruierte Adaptionsvorrichtungen stellen beispielsweise die Vorrichtungen ($C1$, $C2$, $D1$, $D2$) dar, die über $SA1$ und $SA2$ mit der Bauteilaufnahme verbunden werden können und über individuelle Aufnahmepunkte für ein Bauteil verfügen.

Die endliche Anzahl eindeutiger Konfigurationsparameter und Schnittstellen zur Montage von Adaptionsvorrichtungen bildet die Basis für die Formalisierung des Prozesswissens, das für eine reproduzierbare und wiederholgenaue Positionierung der Bauteile auf der mobilen Bauteilaufnahme erforderlich ist. Gleiches gilt für die Schnittstellen zwischen der Strahlkabine und der Bauteilaufnahme in Form eines Schienensystems. Definierte Absteckpositionen im Boden der Strahlkabine ermöglichen die reproduzierbare und wiederholgenaue Positionierung der Bauteilaufnahme gegenüber dem Koordinatensystem des Strahlroboters. Unter der Prämisse der eindeutigen Identifizierbarkeit aller Adaptionsvorrichtungen, an-

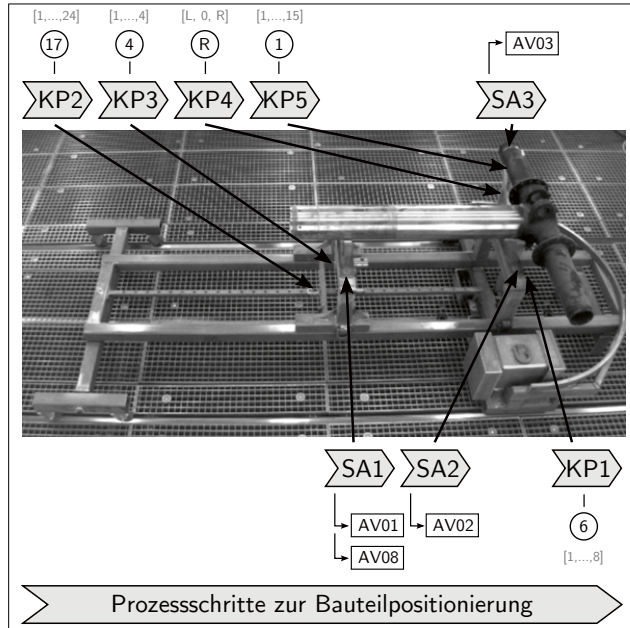


Abbildung 4.3.: Standardisierung und Formalisierung des Prozesswissens zur reproduzierbaren Bauteilpositionierung am Beispiel eines in der Strahlkabine positionierten Fahrwerksbauteils; eingekreiste Werte definieren die positionierungsspezifischen Konfigurationsparameter der Bauteilaufnahme; Werte in Rechtecken geben eindeutige Identifikationsnummern für Adaptionsvorrichtungen der Schnittstellen SA1-SA3 an

hand von Identifikationsnummern, kann somit die Vorgehensweise zur Positionierung eines Bauteils standardisiert und das dazu notwendige Prozesswissen formalisiert werden. Dies veranschaulicht Abbildung 4.3, die ein in der Strahlkabine positioniertes Fahrwerksgroßbauteil unter Verwendung der konzipierten Bauteilaufnahme zeigt. In horizontaler Richtung sind die zur Bauteilpositionierung standardisiert durchzuführenden Prozessschritte in Form der zu konfigurierenden Parameter und der mit Adaptionsvorrichtungen zu besetzenden Schnittstellen aufgetragen. Das dazu notwendige Wissen kann für die Konfigurationsparameter durch einen Wert aus dem gültigen Wertebereich formalisiert werden. Für die Schnittstellen SA1-SA3 kann die Formalisierung durch Definition einer oder mehrerer zu montierender Adaptionsvorrichtungen anhand ihrer eindeutigen Identifikationsnummern erfolgen.

Durch die Standardisierung der Prozessschritte und die Formalisierbarkeit des Prozesswissens zur reproduzierbaren Positionierung der Fahrwerksgroßbauteile wurden die Voraussetzungen für die Informatisierbarkeit und damit die Wiederverwendbarkeit der Arbeitsergebnisse des Teilprozesses *Spannen und Ausrichten* geschaffen. Dies ermöglicht schließlich, die Verschwendung des Rüstprozesses aufgrund der bis dato nicht möglichen systemati-

schen Wiederverwendung vorhandenen Prozesswissens zu reduzieren, das Fehlerpotenzial aufgrund unstrukturierter Vorgehensweisen zu senken und in der Summe die Rüstzeit zu verringern.

4.4. Konzept zur Optimierung der Roboterprogrammierung

Das nachfolgend dargelegte Konzept zur Optimierung der Roboterprogrammierung für ein großes Bauteilspektrum soll die Anwendung des Ansatzes zur Wiederverwendung einzelner Lösungsartefakte demonstrieren. Nachfolgend werden erst die Anforderungen und Rahmenbedingungen des exemplarischen Teilprozesses sowie der Stand der Technik zur Programmierung von Industrierobotern erläutert. Anschließend erfolgt der Entwurf zur Optimierung der Programmierung.

4.4.1. Rahmenbedingungen und Anforderungen

Eine Herausforderung bei der Integration von Industrierobotern und modernen Werkzeugmaschinen in Prozesse zur Bearbeitung eines großen Bauteilspektrums in Losgröße-1 ist die Erstellung notwendiger Bearbeitungsprogramme. Diese müssen für jedes Bauteil je nach Instandhaltungsprozess zustandsabhängig erstellt oder parametrisiert werden. Für die Erstellung der Bearbeitungsprogramme muss das prozessspezifische Wissen der Facharbeiter auf die Maschinen übertragen werden. Die Facharbeiter verfügen zwar über einen mittleren bis hohen Spezialisierungsgrad in Bezug auf den Bearbeitungsprozess, häufig aber über einen niedrigen bis mittleren Qualifikationsgrad und in der Regel nicht über Fachkenntnisse zur Programmierung von Robotern und Anlagen. Einschränkend kommt hinzu, dass die MRO-Dienstleister, die nicht Hersteller der instandzusetzenden Bauteile sind, über keinerlei digitale Daten dieser verfügen.

Betrachtet werden soll nachfolgend die Programmierung des in Abbildung 4.4(a) und 4.4(b) dargestellten acht-achsigen Portalroboters. Dieser setzt sich aus der Kombination eines drei-achsigen kartesischen Roboters und eines fünf-achsigen Vertikal-Knickarmroboters zusammen. Auf diese Weise kann neben einem großen Arbeitsraum von knapp 4.000 mm × 5.000 mm auch die Flexibilität der Roboterbewegung in der Nähe zu bearbeitender Bauteile realisiert werden. Der Roboter wird für die Oberflächenentschichtung von Fahrwerksgrößbauteilen eingesetzt. Ein solches wird, beispielsweise mittels der im vorangehenden Unterkapitel entworfenen Vorrichtung, in der Strahlkabine positioniert. Zur Entschichtung muss der Strahlroboter an seinem Endeffektor eine Strahldüse in einem Abstand zwischen 100 mm und 250 mm entlang der Bauteiloberfläche führen. Da die Oberflächenschichten vollständig zu entfernen sind, muss der Endeffektor so um das Bauteil bewegt werden, dass der Strahlkegel alle Segmente der Oberfläche vollständig erfassen kann. Dafür ist die Bearbeitung in mindestens zwei Positionierungen erforderlich, für die separate Bearbeitungsprogramme erstellt werden müssen.

Die Steuerung des Roboters und der Strahlanlage erfolgt mittels einer speziell entwickelten Software, die auf der Robotersteuerung des Herstellers Adept [Ade][®] basiert. Die Bedienung des Roboters, die Steuerung des Endeffektors und die Programmierung werden über das in Abbildung 4.4(c) dargestellte HMI, bestehend aus einem Touch-Panel und zwei Joysticks, durchgeführt. Letztere ermöglichen eine intuitive Translationsbewegung des Endeffektors

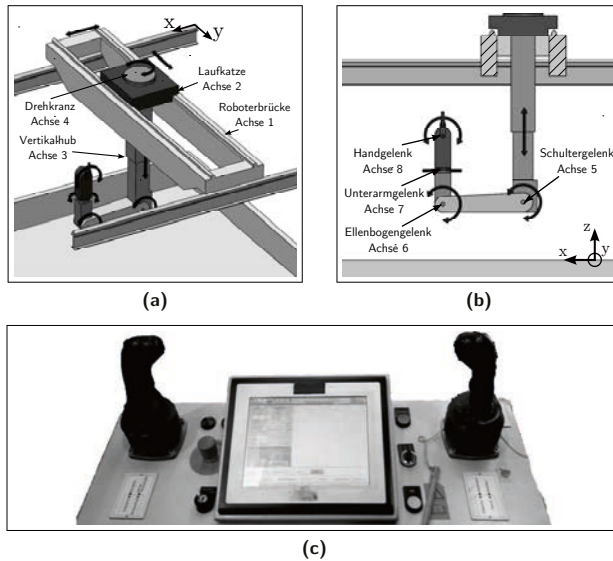


Abbildung 4.4.: (a) - (b): Konstruktionsskizzen des acht-achsigen Portalroboters, bestehend aus einem drei-achsigen kartesischen Roboter (Achsen 1-3) und einem fünf-achsigen Vertikal-Knickarmroboter (Achsen 4-8); (c) HMI des Portalroboters zur Bedienung, Steuerung und Programmierung

im kartesischen Koordinatensystem und die Manipulation seiner Lage. Die Programmierung kann durch ein Lernprogrammierverfahren erfolgen. Dazu steuert ein Facharbeiter mittels der Joysticks den Endeffektor auf der zur Entschichtung vorgesehenen Trajektorie. Währenddessen werden durch die Steuerung eine Vielzahl einzelner Bahnpunkte gespeichert und in einem Programm zur erneuten Ausführung abgelegt. Ein Bearbeitungsprogramm setzt sich aus einer endlichen Menge einzelner Bahnen in einer festgelegten Reihenfolge zusammen. Jede Bahn wiederum besteht aus einer endlichen Menge einzelner Ist-Positionen des Endeffektors, die in Form der acht Gelenkpositionen gespeichert werden, sowie weiterer Bearbeitungsparameter für den eigentlichen Strahlprozess. Die Speicherung der Bahnpunkte in Form der Gelenkpositionen sorgt, im Gegensatz zur Speicherung in Form kartesischer Koordinaten, für eine eindeutige Definition der Roboterachsstellung für einen solchen [Web09]. Ihre Interpolation führt bei der erneuten Ausführung eines Programmes zur Reproduktion der Bearbeitungstrajektorien. Dieses Verfahren erlaubt zwar die intuitive Programmierung und Übertragung des Prozesswissens auf den Roboter – auch durch niedrig qualifizierte Bediener – ist jedoch auch mit Nachteilen verbunden. Der größte Nachteil ist der hohe Zeitaufwand für die Erstellung der Programme, der mit einem kostenintensiven Personaleinsatz und hohen Zeiten der Unproduktivität der Roboterstrahlanlage verbunden ist.

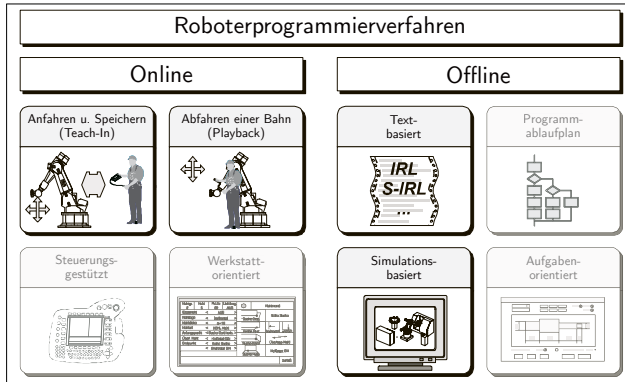


Abbildung 4.5.: Einteilung von Roboterprogrammierverfahren nach [Wec06]

4.4.2. Stand der Technik

Nach [SB13] muss ein Roboter frei programmierbar sein, sodass ein Bediener eine beliebige Sequenz von Steuerinformationen definieren kann, die zur Ausführung einer Automatisierungsaufgabe erforderlich ist [Wec06]. Dazu bieten sich mittlerweile eine Vielzahl unterschiedlicher Programmierverfahren an, die auch miteinander kombiniert werden können. Sie lassen sich nach [Wec06], wie in Abbildung 4.5 dargestellt, in direkte (Online) und indirekte (Offline) differenzieren.

Die Offline-Verfahren kennzeichnen sich dadurch, dass sie unabhängig von der Produktionseinrichtung praktikierbar sind. Sie lassen sich weiter unterteilen in text-, simulations- und ablaufdiagrammbasierte sowie aufgabenorientierte Verfahren. Die beiden bekanntesten und am häufigsten eingesetzten Verfahren sind die beiden erstgenannten. Die textuelle Programmerstellung erfolgt meist in zwei Schritten. Zu Beginn wird offline das eigentliche Gerüst erstellt. Dazu werden die benötigten Befehle der Sequenz ausgewählt, jedoch noch nicht mit konkreten Werten spezifiziert. Dies erfolgt schließlich im zweiten Schritt, der online direkt am Roboter ausgeführt wird. Man spricht daher auch von hybrider Programmierung. Simulationsbasierte Verfahren sollen die bei textueller Programmierung notwendige zeitaufwändige Online-Phase drastisch reduzieren oder gar eliminieren [Wec06]. Dazu beschränkt sich die Funktionalität derartiger Systeme nicht nur auf die Roboterprogrammierung, sondern ermöglicht auch die Modellierung, Programmierung und Simulation der gesamten Produktionszelle unter Verwendung von CAD-Modellen aller am Prozess beteiligten Komponenten [UK14]. Entscheidend für die Genauigkeit und Nutzbarkeit der Simulation und der erstellten Bearbeitungsprogramme ist, das reale Verhalten der Robotersteuerung in Form einer implementierten virtuellen Steuerung möglichst realitätsnah nachzubilden oder gar auf die Algorithmen der Hersteller zurückzugreifen [Wec06].

Online-Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass diese prozessnah unter Verwendung des Roboters und seiner Steuerung erfolgen. Diese Vorgehensweise ist mit hohen Rüstzeiten verbunden, da die Produktionsanlage folglich währenddessen nicht für Produktionstätigkeiten zur Verfügung stehen kann. Die Qualität der erstellten Anwenderprogramme hängt maßgeblich von der Erfahrung des Programmierers in der Bedienung des Roboters ab

[UK14]. Online-Verfahren lassen sich nach [Wec06] weiter unterteilen in steuerungsgestützte und werkstatorientierte sowie die am häufigsten eingesetzten Lernprogrammierverfahren. Bei der Lernprogrammierung lassen sich zwei Varianten unterscheiden: die Playback-Programmierung und die Teach-In-Programmierung. Erstgenannte ist dadurch gekennzeichnet, dass der Bediener den Endeffektor durch ein Bediengerät auf der zu programmierenden Bahn bewegt. Dabei übernimmt die Steuerung selbstständig die Lage-Ist-Werte, in Form der Achsstellungen, in einem definierten Zeit- oder Wegraster so in das Anwenderprogramm, dass die Bahn bei der Ausführung des Programms reproduziert werden kann [UK14]. Bei der Teach-In-Programmierung wird der Endeffektor zwar ebenfalls mittels eines Bediengerätes bewegt, jedoch werden nur markante, den Bewegungsablauf charakterisierende Bahnpunkte angefahren und die entsprechenden Roboterkoordinaten durch Betätigung einer Übernahmetaste gespeichert. Darüber hinaus können beim Teach-In-Verfahren weitere Parameter und Bewegungsformen spezifiziert werden, die die Art der Interpolation der einzelnen Bahnpunkte und damit den genauen Verlauf der Trajektorie definieren [Wec06].

Forschungsgegenstand im Bereich der Offline-Verfahren ist vor allem die aufgabenorientierte Programmierung, bei der, im Gegensatz zu den text- und simulationsbasierten Verfahren, nicht mehr festlegt wird, wie ein Roboter eine Aufgabe zu lösen hat, sondern nur noch welche Aufgabe durchzuführen ist [SB13]. Ziel der aufgabenorientierten Programmierung, die in der Regel CAD- und simulationsbasiert durchgeführt wird, ist, eine vollautomatische Generierung von Roboterprogrammen zu ermöglichen und damit die bislang erforderliche Online-Phase nach der Offline-Programmierung zu eliminieren [Wec06].

Aufgrund der Vorteile, die Lernprogrammierverfahren hinsichtlich der Intuitivität bieten, und dem damit verbundenen häufigen Einsatz dieser in der industriellen Praxis, befassen sich viele Forschungsansätze mit einer Optimierung derartiger Verfahren. Ziel der Forschungsaktivitäten ist vor allem die Vereinfachung der Definition von Roboterbewegungen, damit diese intuitiver und effizienter sowie auch von unerfahrenen Anwendern erfolgen kann [Dos14]. Dazu wird sowohl der Einsatz innovativer und intuitiver Bedieneinheiten zur Bewegung des Roboterarms als auch von Systemen, die ein intuitives Vormachen einer Bewegung ermöglichen, erforscht. Hierzu zählen Kraft-Momenten-Sensoren zur manuellen Führung des Roboterarms ([MHPH07], [WZZ08], [WF02]), der Einsatz von optisch lokalisierbaren Zeigewerkzeugen [HHW08] oder von Handschuhen zur Erfassung der menschlichen Bewegung ([ACR04], [SIKP07]). Gegenstand aktueller Forschungstätigkeiten ist darüber hinaus, den Bediener bei der Online-Programmerstellung durch Assistenzsysteme zu unterstützen. In diesem Zusammenhang sind Ansätze zur visuellen Unterstützung, z. B. durch Cyber-Brillen [ZVM04] oder Laserprojektion [ZV06], zu nennen. Des Weiteren existieren auch Ansätze zur akustischen Unterstützung des Benutzers, z. B. durch die Möglichkeit der Erkennung von Sprachbefehlen [NPM09] oder die Interaktion mit dem Benutzer durch akustisches Echtzeitfeedback zur Warnung vor möglichen Singularitäten, Arbeitsraumgrenzen oder Gelenkwinkelbeschränkungen [KKW12].

4.4.3. Entwurf zur Optimierung der Roboterprogrammierung

Im Kontext der Rahmenbedingungen stellt das gewählte Playback-Verfahren auch unter Berücksichtigung des Stands der Technik eine geeignete aber sehr zeitaufwändige und damit kostspielige Lösung zur Programmierung des acht-achsigen Portalroboters nach 4.4.1 dar. Gleichzeitig begünstigen die Rahmenbedingungen des Instandhaltungsprozesses die

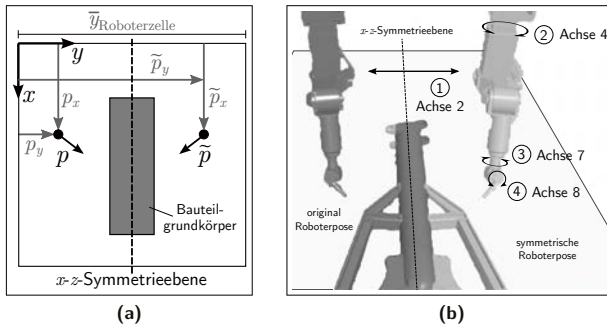


Abbildung 4.6.: Generierung symmetrischer Roboterposen bzgl. einer x - z -Symmetrieebene: (a) Konventionen zur Berechnung der Position der symmetrischen Pose \tilde{p} ; (b) Reihenfolge notwendiger Transformationen der Roboterachswinkel zur Erzeugung symmetrischer Posen

Entwicklung eines Ansatzes zur Optimierung der Roboterprogrammierung durch Wiederverwendung einzelner Lösungsartefakte. Entscheidend dafür sind die Charakteristiken der zu bearbeitenden Großbauteile, die Eigenschaften der Positionierungsvorrichtung und die Funktionalität von Roboterkinematik und -steuerung, auf die nachfolgend detaillierter eingegangen werden soll.

Die in mindestens zwei Positionierungen zu bearbeitenden Großbauteile verfügen, bis auf wenige Ausnahmen, über mindestens eine Symmetrieebene und über symmetrische Grundkörper, wie in Abschnitt 2.5.3 aufgezeigt wurde. Das im vorangehenden Unterkapitel 4.3 entwickelte Konzept einer Bauteilaufnahme erlaubt, bezogen auf die zwei notwendigen Bearbeitungspositionen, die symmetrische Positionierung eines Bauteils gegenüber einer x - z -Symmetrieebene. Diese ist zum einen deckungsgleich mit der Symmetrieebene der zylindrischen Grundkörperlängsachse des Bauteils und liegt zum anderen, wie in Abbildung 4.6 (a) skizziert, auf der Mitte der y -Achse des Koordinatensystems. Die Roboterkinematik ermöglicht die translatorische Änderung einzelner Ist-Positionen durch reine Änderung der Gelenkpositionen des kartesischen Roboters.

Darüber hinaus konnten im Rahmen der Forschungstätigkeiten, welche dieser Dissertation zugrunde liegen, die Voraussetzungen für den Optimierungsansatz geschaffen werden. Dazu wurde ein Konverter entwickelt, der die Dekodierung der Roboterprogramme aus dem proprietären Dateiformat der Steuerung in lesbaren ASCII-Code ermöglicht. Die erfolgte Modellierung der Kinematik des Portalroboters nach der Denavit-Hartenberg-Konvention [Web09] eröffnet die Möglichkeit, die Gelenkkoordinaten einzelner Bahnpunkte in ein Ortskoordinatensystem zu transformieren. Die Programme sind damit lesbar, interpretierbar und simulierbar. Folglich können sie durch das Hinzufügen und Entfernen einzelner Bahnpunkte oder ganzer Bahnen auch editiert werden. Durch die Erweiterung des Konverters zur Kodierung der Roboterprogramme in das proprietäre Dateiformat der Steuerung konnte die Verwendbarkeit editierter Roboterprogramme realisiert werden.

Ausgangspunkt für die Optimierung durch Wiederverwendung ist die Nutzung der Editierbarkeit der Roboterprogramme. Neue Roboterprogramme sollen auf diese Weise durch die Kombination mehrerer einzelner Programmteile erstellt werden. Das können sowohl neue

als auch in der Vergangenheit erstellte Programme sein, sodass Teile eines Programms für mehrere Bauteile wiederverwendbar sind. Darüber hinaus sollen die Symmetrieeigenschaften der zu bearbeitenden Bauteile und ihrer Positionierung sowie die Eigenschaften der Kinematik des Roboters dazu genutzt werden, ganze Programme in der Form wiederzuverwenden, dass, basierend auf einem Bearbeitungsprogramm, das adäquate Programm für die symmetrische Positionierung desselben Bauteils automatisiert generiert wird. Das Konzept zur Optimierung der Roboterprogrammierung sieht folglich eine Kombination des Playback-Programmierverfahrens mit der textbasierten Offline-Programmierung vor. Für die Kombination von Modulen zu neuen Programmen reicht prinzipiell deren Existenz in Form von Blackboxes; die Generierung symmetrischer Roboterprogramme bedarf hingegen der Interpretierbarkeit und Editierbarkeit des Programmcodes in Form einer Whitebox. Aufgrund der Anforderungen hinsichtlich der Programmierbarkeit durch niedrig qualifizierte Facharbeiter gilt es, die textuelle Offline-Programmierung einfach zu gestalten. Dafür muss ein Softwarewerkzeug bereitgestellt werden, das einzelne Module automatisiert zu neuen ausführbaren Roboterprogrammen kombinieren kann. Voraussetzung für diese Kombination ist die Definition entsprechender Schnittstellen. Bedingung für eine glatte und vorhersagbare Bewegung des Endeffektors zwischen zwei Programmmodulen ist, dass die letzte Roboterposition des vorherigen Moduls mit der ersten des nachfolgenden übereinstimmt. Dies lässt sich über den Vergleich der Achswinkel beider Positionen automatisiert prüfen. Unter Einhaltung dieser Schnittstellendefinition können Roboterprogramme durch die Kombination einzelner Programmmodule automatisiert generiert werden. Dieser Ansatz ermöglicht die Wiederverwendung bereits erstellter Roboterprogramme. Er kann zudem durch den Aufbau einer Programm-Bibliothek weiter optimiert werden. Bezüglich der Wiederverwendung durch Generierung eines Roboterprogramms für die symmetrische Bearbeitungsposition desselben Bauteils bezogen auf die x - z -Symmetrieebene muss die Roboterkinematik detaillierter betrachtet werden. Es gilt, die Position und Lage des Endeffektors entsprechend zu transformieren. Abbildung 4.6 visualisiert die dazu notwendige Herangehensweise. Die x - und z -Koordinaten der ursprünglichen Roboterpose p bleiben für die symmetrische Roboterpose \tilde{p} unverändert. Folglich müssen auch die Positionen der Gelenke eins, drei, fünf und sechs nicht modifiziert werden. Unter der Prämisse, dass für die y -Koordinate der Symmetrieebene y_{Sym} gilt:

$$y_{Sym} = \frac{\bar{y}_{Roboterzelle}}{2},$$

folgt für die y -Koordinate der zu p symmetrischen Pose \tilde{p} :

$$\tilde{p}_y = \bar{y}_{Roboterzelle} - p_y.$$

Die y -Koordinate entspricht der Position der Achse zwei des Roboters. Zur Realisierung der symmetrischen Lage der Roboterpose p müssen die verbleibenden Rotationsachsen vier, sieben und acht, basierend auf ihrer individuellen in der Robotersteuerung definierten Nulllage und der Gelenkposition der Originalpose, transformiert werden. Da durch diese Vorgehensweise jede Pose eines Roboterprogramms auf eine symmetrische Pose abgebildet werden kann, bei dem die Stellung der Roboterachsen ebenfalls exakt symmetrisch zur Originalpose ist, ergibt sich durch Interpolation der Bahnpunkte eines generierten symmetrischen Roboterprogrammes auch eine exakt zur Symmetrieebene symmetrische Trajektorie des Endeffektors.

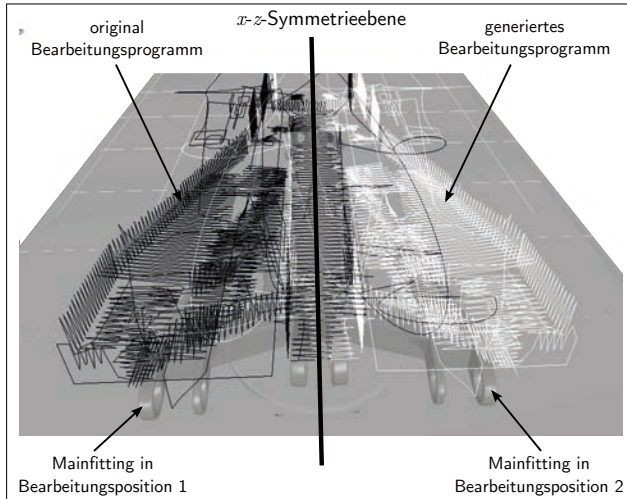


Abbildung 4.7.: Automatisierte Offline-Programmgenerierung eines Bearbeitungsprogramms für symmetrische Bearbeitungspositionen; dargestellt ist für beide Programme die Bahn des Endeffektors in der Simulationssoftware EASY-ROB™ [EAS][®]

Abbildung 4.7 zeigt das Ergebnis der automatisierten Generierung eines symmetrischen Bearbeitungsprogramms. Erkennbar entspricht die Bahn des Endeffektors bei der Ausführung des generierten Roboterprogramms exakt der an der Symmetrieebene gespiegelten Bahn des originalen Programms. Folglich bietet der Ansatz zur Wiederverwendung, in Form der automatisierten Generierung symmetrischer Bearbeitungsprogramme, eine Möglichkeit, den Programmieraufwand und die damit einhergehende Verschwendung deutlich zu reduzieren.

4.5. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde die Optimierung von Teilprozessen eines Instandhaltungsprozesses auf Werkstattebene durch Wiederverwendung betrachtet. Dazu wurden zu Beginn die theoretischen Grundlagen und Voraussetzungen zur Anwendung von Wiederverwendungsprinzipien geschaffen. Als wesentliche sind die Prinzipien der Standardisierung, der Formalisierung und der Modularisierung zu nennen. Darauf basierend wurden die Ansätze zur Prozessoptimierung erläutert. Durch die Wiederverwendung des Prozesswissens einerseits und die Wiederverwendung einzelner Arbeitsartefakte andererseits soll die Verschwendung in Teilprozessen reduziert werden. Für die erstgenannte Form gilt es, die Teilprozesse flexibel zu standardisieren und zu formalisieren, um sie informationstechnisch erfassen zu können. Für die Wiederverwendung einzelner Arbeitsartefakte sieht der Ansatz die Schaffung struktureller Voraussetzungen für deren modulbasierte Entwicklung vor. Die Verwendung einer Bibliothek erlaubt schließlich deren systematische Wiederverwendung. Ein Fahrwerksbauteil setzt sich nach Abschnitt 2.5.3 aus häufig wiederkehrenden Primiti-

ven verschiedener Geometrie wie Zylindern, Quadern, Ösen und Laschen zusammen. Daher lässt sich der Wiederverwendungsgrad der Artefakte einer solchen Bibliothek weiter steigern, wenn diese nicht nur häufig eingesetzte Module von Bearbeitungsprogrammen einzelner Bauteile sondern auch parametrierbare Programmteile für die Primitive, die Bestandteil vieler Fahrwerksbauteile sind, enthält. Ein neues Bearbeitungsprogramm kann damit durch die Kombination der parametrisierten wiederverwendeten Programmteile für die Bearbeitung der Bauteil-Primitive erstellt werden.

Die mit der Anwendung beider Ansätze einhergehenden Nebeneffekte wie die Strukturierung und Standardisierung einzelner Arbeitsschritte tragen darüber hinaus zu einer Effizienzsteigerung bei. Sowohl die Ansätze als auch die dazu erläuterte Herangehensweise lassen sich auf eine Vielzahl von Teilprozessen in der Instandhaltung übertragen. Deren Konkretisierung muss jedoch stets prozessspezifisch konzipiert und adaptiert werden. Dies wurde für beide Formen der Wiederverwendung anhand zweier Teilprozesse aufgezeigt. Sie befassen sich mit der reproduzierbaren Positionierung von Bauteilen sowie der Roboterprogrammierung und werden im weiteren Verlauf dieser Dissertation zur Stützung der Hypothese herangezogen.

5. Entwurf eines Systems zur Verifikation der Bauteilpositionierung

Bei der Prozessdurchführung agiert der Facharbeiter als Schnittstelle zwischen den Ressourcen und Objekten des Instandhaltungsprozesses und beeinflusst als Glied des Mensch-Maschine-Systems die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Systems auf Prozessebene. Bereits im vorangehenden Kapitel wurde in Abschnitt 4.3 die Komplexität des Teilprozesses *Spannen und Ausrichten* aufgezeigt, bei dem ein zu bearbeitendes Bauteil wiederholgenau und reproduzierbar positioniert werden muss. Das stellt für den Facharbeiter eine Anforderung mit hohem Fehlerpotential dar. Zur Komplexitätsbeherrschung wurde die Verwendung einer kodifizierbaren und adaptierbaren Bauteilaufnahme vorgeschlagen, die auf die jeweiligen Anforderungen von Bauteil und Positionierung angepasst werden kann. Dennoch verbleibt ein hohes Risiko für das Auftreten unbeabsichtigter, zufälliger Fehler, in Form der fehlerhaften Bauteilpositionierung oder der Wahl eines falschen Bearbeitungsprogramms, mit weitreichenden Folgen. Die Auswirkungen reichen von einer mangelhaften Bearbeitungsqualität bis zur Kollision von Maschine und Bauteil mit immensen monetären Schäden.

Daher soll in diesem Kapitel ein Entwurf für ein System entwickelt werden, das in den Instandhaltungsprozess integriert werden kann, um die Eintrittswahrscheinlichkeit derartiger Schäden zu minimieren. Solche technischen Maßnahmen werden nach VDI-Richtlinie 4006 [VDI15][#] als *aktive Sicherheit* bezeichnet. Neben der präventiven Erkennung potenzieller Fehler soll durch die Einführung aktiver Sicherheit sekundär auch das Vertrauen der handelnden Personen in die Nutzung automatisierter Systeme gestärkt werden. Die Herausforderungen für den Entwurf solch eines Systems liegen in den Umgebungsbedingungen eines Instandhaltungsprozesses, der Heterogenität zu bearbeitender Bauteile sowie der zu detektierenden Fehlertypen. Ein solches System muss daher immer speziell für die jeweiligen Anforderungen und Rahmenbedingungen konzipiert werden. In diesem Kapitel erfolgt der Entwurf eines Systems für die Verifikation der Bauteilpositionierung.

Folgend werden zunächst die Rahmenbedingungen und Anforderungen eines Instandhaltungsprozesses an ein System zur Verifikation der Bauteilpositionierung aufgeführt. Den Ansatz zur Verifikation der Bauteilpositionierung soll die Objekterkennung darstellen, sodass anschließend der Stand der Technik derartiger Systeme dargelegt wird. Auf dessen Basis erfolgt abschließend der Entwurf für ein solches, das den Anforderungen gerecht werden und in Form eines Assistenzsystems in Instandhaltungsprozesse integriert werden kann.

5.1. Rahmenbedingungen und Anforderungen

Die Charakteristiken eines Instandhaltungsprozesses stellen für ein System zur Absicherung einer Schnittstelle, im Hinblick auf die lokalen Gegebenheiten und das zu bearbeitende

Spektrum der Flugzeugbauteile, eine enorme Herausforderung dar. Daher werden folgend die wesentlichen Rahmenbedingungen und Anforderungen dargelegt.

Robustheit und Zuverlässigkeit Da die Umgebung der Werkstattfertigung nicht speziell für den Einsatz von Absicherungssystemen ausgelegt ist, hat diese häufig suboptimale Rahmenbedingungen, vor allem für bildgebende Sensorik. Zusätzlich gilt es zu beachten, dass bei vielen Prozessen die Integration zusätzlicher Sensorik und Aktorik in der Anlagenzelle nicht ohne Weiteres möglich ist, z. B. aufgrund von Vorgaben zum Explosionschutz [DIN14a][#]. Betrachtet man darüber hinaus das in Abschnitt 2.5.3 exemplarisch aufgezeigte Spektrum an Bauteilen eines Fahrwerks, so wird deutlich, dass die Verifikation deren Positionierung eine Herausforderung an die Robustheit eines Systems darstellt. Diese wird durch variierende Zustände, insbesondere der Beschaffenheit, Farbe, Reflexion und Verschmutzung der Oberfläche, vergrößert. Die Akzeptanz eines Systems zur aktiven Sicherheit als hilfreiches Assistenzsystem, sowohl auf administrativer als auch auf exekutiver Ebene, kann nur erreicht werden, wenn dieses im Kontext der lokalen Gegebenheiten und der Charakteristiken des Bauteilspektrums zuverlässig eingesetzt werden kann.

Flexibilität Bereits die im Kontext der Zuverlässigkeit und Robustheit angesprochenen Charakteristiken des Bauteilspektrums erfordern von einem System zur Verifikation der Bauteilpositionierung ein hohes Maß an Flexibilität. Hinzu kommt, dass alle Bauteile des Bauteilspektrums niemals zu einem Zeitpunkt gleichzeitig vorliegen, sondern verteilt über einen langen Zeitraum von mehreren Monaten bis Jahren die Instandhaltung durchlaufen. Das zu konzipierende System kann folglich nicht beschränkt auf ein kleines Spektrum weniger im Vorfeld bekannter Bauteile mit ähnlichen Charakteristiken ausgelegt werden. Vielmehr muss es flexibel, auch für neue bis dato unbekannte Bauteile, angepasst werden können und hinsichtlich sich ändernder Umgebungsbedingungen adaptierbar sein.

Handhabbarkeit Ein bedeutender Aspekt für ein System zur Verifikation der Bauteilpositionierung, das im Rahmen des Automatisierungsansatzes dieser Arbeit in den Instandhaltungsprozess integriert werden soll, ist die Handhabbarkeit. Kernelement des Ansatzes ist die homogenisierte Interaktion von Facharbeiter und den weiteren prozessbeteiligten Ressourcen. Ziel für den Entwurf muss daher die Bedien- und Benutzbarkeit durch Facharbeiter sein, die weder über eine Spezialisierung noch über Erfahrung im Umgang mit Informationssystemen verfügen. Eine effiziente Integration in den Instandhaltungsprozess erfordert einen intuitiv gestalteten Prozess für die Einrichtung neuer Bauteile und Positionierungen.

5.2. Stand der Technik der Objekterkennung

Objekterkennung ist ein recht weiter Begriff und kann sowohl die Identifikation eines unbekannten Objektes in einem Objektraum, als auch die Bestimmung seiner Position und Lage bezeichnen [DSAS11]. Gegenstand der Identifikation ist, ein Objekt aus einer Auswahl von vielen unterschiedlichen Typen zu erkennen und damit dessen Anwesenheit zu prüfen. Die genaue Bestimmung der Lage muss dabei nicht zwangsläufig Teil der Prüfung sein [Sto11]. Ebenso existieren Verfahren, deren primäres Ziel die Lageerkennung ist, wobei der Typ des Objektes dabei häufig auch schon im Vorfeld bekannt ist. Anwendungsbeispiele für

den Einsatz von Objekterkennungsverfahren im industriellen Umfeld sind die Navigation von Robotern, Pick-And-Place-Anwendungen oder Bestückungsmaschinen [Hor07]. Im Kontext der Verifikation der Positionierung eines bekannten Bauteils in einer Anlagenzelle soll folgend der Fokus auf Verfahren zur Lageerkennung von Objekten gelegt werden.

Für die Lageerkennung von Objekten wurde in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl an Verfahren entwickelt, die auf diversen physikalischen Messprinzipien beruhen. Eine übersichtliche Darstellung über die vielfältigen Messprinzipien und die darauf aufbauenden Verfahren bietet [HS11]. Insbesondere die im vorherigen Abschnitt dargestellten Anforderungen an ein System hinsichtlich Flexibilität und Robustheit führen dazu, dass der Einsatz von physikalischen Messprinzipien, die nicht zur szenenabbildenden Sensorik zählen, folgend nicht weiter betrachtet werden soll. „Der szenenabbildenden Sensorik liegt eine prinzipiell andere Philosophie der Informationsgewinnung zugrunde als bei Näherungssensoren oder taktilen Sensoren. Letztere entnehmen von ausgewählten und eng begrenzten Stellen einer Szene eine Probe und gewinnen daraus die gewünschten Informationen. Diese Art der Sensorik ist zwar weniger aufwendig, muss aber sorgfältig an die Spezifik des Einzelfalls angepasst werden. Die Anwendung ist meistens wenig flexibel und hat oftmals den Charakter einer Sonderlösung“ [HS11, S. 313].

Für die Lageerkennung von Objekten mittels eines automatisierten Bildverarbeitungssystems zählen „Unsicherheit, lokale Störungen und Mehrdeutigkeiten in den Daten sowie Szenenvielfalt, Beleuchtungseinflüsse, Verdeckungen und die Menge der Daten bzw. der große Lösungsraum“ [Hau10, S. 7] zu den größten Herausforderungen.

Die Unterteilung der Ansätze zur Objekterkennung erfolgt in der Literatur auf vielfältige Art und Weise. Häufig sind jedoch zwei Hauptklassen als übergeordnete Gruppierung vorzufinden ([Sto11], [Hau10]). Die zwei Hauptklassen – die ansichtsbasierten und die geometriebasierten Ansätze – können jeweils in die Unterklassen der lokalen und der globalen Ansätze unterteilt werden. Während die globalen Ansätze die Objekte in ihrer Gesamtheit behandeln, repräsentieren die lokalen Ansätze die Objekte als eine Menge herausragender lokaler Merkmale. Die Vorteile globaler Ansätze liegen, aufgrund der größeren verwendeten Datenbasis und der damit einhergehenden Auflösung lokaler Mehrdeutigkeiten, vor allem in einer exakteren Lageschätzung. Verfahren, die auf diesem Ansatz basieren, erfordern jedoch die genaue Segmentierung eines Objektes und sind dementsprechend anfällig gegenüber Verdeckungen, Störungen oder Schwankungen des Hintergrundes. Die lokalen Ansätze haben ihre Vorteile insbesondere in der Robustheit gegenüber den zuvor genannten Defiziten der globalen Ansätze. Sie sind dafür in der Regel weniger genau. Folgend werden die ansichtsbasierten und die geometriebasierten Ansätze sowie die Klassifikation und die Objektlageerkennung in der industriellen Praxis detaillierter betrachtet. Darauf basierend erfolgt abschließend die Zusammenfassung und Bewertung der Erkenntnisse.

5.2.1. Ansichtsbasierte Ansätze

Die ansichtsbasierten Ansätze nutzen zur Erkennung eine Vielzahl von Erscheinungsbildern eines Objektes. Sie werden in Form einzelner 2D-Bilder repräsentiert, den sogenannten Objektansichten. Im Zuge der Lagebestimmung gilt es, ein aktuelles Bild einer dieser Objektansichten zuzuordnen und darüber die Lage zu bestimmen. Die Informationen, die eine Objektansicht enthalten kann, müssen für die Lageerkennung kodiert und komprimiert werden.

Globale Ansätze Die globalen Ansätze nutzen zur Codierung der in den Objektansichten enthaltenen Informationen das gesamte Bild. Zu den wichtigsten Ansätzen zählen die korrelations-, histogramm- und momentenbasierten Ansätze, die ausführlich in [Hau10] beschrieben und bewertet werden.

Korrelationsbasierte Ansätze repräsentieren die Objektansichten in Form ihrer ursprünglichen Intensitätsbilder, davon abgeleiteten Gradientenbildern oder Binärbildern. Das notwendige Ähnlichkeitsmaß für die Zuordnung einer Objektansicht zur aktuellen Ansicht wird dabei über die Korrelationsmethode definiert. Dazu wird ein Bildmuster (Template) über das aktuelle Bild eines Objektes in einer zu bestimmenden Lage bewegt und die pixelweise Differenz zwischen beiden Bildern gemessen. So ergibt sich für jede Position des Bildmusters ein Maß für die Übereinstimmung. Derartige Verfahren sind auch unter dem Begriff des Template Matching in der Literatur zu finden ([BB06], [DSAS11]). In Bezug auf die Robustheit der korrelationsbasierten Ansätze muss festgehalten werden, dass „eine leichte Erhöhung der Gesamthelligkeit, die Quantisierung der Intensitätswerte, eine Verschiebung des Bilds um nur ein Pixel oder eine geringfügige Rotation [...] große numerische Unterschiede gegenüber dem Ausgangsbild verursachen“ [BB06, S. 411].

Während korrelationsbasierte Ansätze auf der vollständigen Repräsentation räumlicher Information basieren, verzichten *histogrammbasierte Ansätze* gänzlich auf diese. Stattdessen nutzen sie lediglich die Informationen über die Farbverteilung in den Objektansichten zur Lokalisierung. Daher weisen sie eine gewisse Invarianz bzgl. Translation und Rotation in der Kameraebene auf. Zur Lagebestimmung müssen jedoch weitere Merkmale der Objektansicht, wie z.B. ein geometrisches Kantenmodell, herangezogen werden [EKH05].

Momentenbasierte Ansätze sind mittlerweile zu einem Standardmerkmal in der Bildverarbeitung geworden und können als Mittelweg zwischen den beiden vorhergehenden Verfahren interpretiert werden [SR14]. Sie ermöglichen die Merkmale der Objektansichten, unter Einbezug der räumlichen Information, zu codieren und damit die zu speichernde Datenbasis zu reduzieren. Momentenbasierte Verfahren zur Lokalisierung eines Objektes benötigen jedoch eine Vielzahl an 2D-Trainingsbildern, um ein auf Merkmalsvektoren basierendes 3D-Modell eines Objektes generieren zu können. Mittels dieses Objektmodells kann die Orientierungsschätzung eines Testbildes erfolgen [CG00].

Lokale Ansätze Die lokalen Ansätze betrachten nur kleine, saliente Ausschnitte der Objektansichten, um eine Lokalisierung vorzunehmen [Hau10]. Die Verfahren codieren diese lokalen Bildinformationen in Form eines robusten und invarianten Vektors von Merkmalen mittels eines Deskriptors. Basierend auf den Merkmalsvektoren ist anschließend ein Zuordnungsproblem zu lösen, das ein auf dem Merkmalsraum zu definierendes Ähnlichkeitsmaß erfordert [SR14]. Die Verfahren lassen sich weiter in punktbasierte und regionenbasierte Techniken unterscheiden, zu deren bekanntesten Vertretern die SIFT- [Low04] und SURF-Algorithmen [BTVG06] zählen. Werden die lokalen Ansätze nicht nur zur Detektion sondern auch zur Lagebestimmung eines Objektes eingesetzt, so erfolgt diese in der Regel durch Zuordnung eines Testbildes zu einem Datensatz im Vorfeld aufgenommener Trainingsbilder. Die hinterlegte Lage wird schließlich für das Trainingsbild mit der größten Übereinstimmung zurückgegeben [OM02].

5.2.2. Geometriebasierte Ansätze

Die geometriebasierten Ansätze nutzen zur Objekterkennung ein abstrahiertes Modell und versuchen „den Zusammenhang zwischen Objekten und ihren Projektionen in Bildern analytisch zu modellieren“ [Hau10, S. 23]. Dies erfordert ein 3D-Modell aller Objekte, das entweder in Form eines CAD-Datensatzes verfügbar sein oder sehr aufwändig erstellt werden muss. Die geometriebasierten Ansätze nutzen dazu sowohl Intensitätsbilder, als auch 3D-Daten in Form von Abstandsdaten, die mit Stereo-, Laufzeitkameras oder Laserscannern akquiriert werden können.

Globale Ansätze Wie auch die globalen, ansichtsbasierten Ansätze, erfordern die globalen, geometriebasierten Ansätze eine möglichst exakte Segmentierung des Objektes und häufig zusätzlich eine erste Groblageschätzung. Die meist iterativen Verfahren dieses Ansatzes, wie z. B. die Iterative Closest Point Algorithmen ([CM92], [BM92], [RL01]), basieren darauf, die Punktemenge eines Testdatensatzes in die Modellform des Objektes einzupassen.

Lokale Ansätze Die lokalen, geometriebasierten Ansätze basieren in der Regel darauf, Ecken oder Kanten der 3D-Modelle der Objekte „in einem Registrierungsprozess mit den beobachteten Projektionen im Bild in Einklang zu bringen“ [Hau10, S. 23]. Auch dazu gibt es mittlerweile vielfältige Verfahren, die z. B. das Problem auf die Lösung eines Korrespondenzproblems reduzieren ([DD95], [Hor87]).

5.2.3. Klassifikation und maschinelles Lernen

Die Klassifikation ist „der zentrale Vorgang bei der Erkennung von Mustern, d. h. dem Bemühen, beobachtete Erscheinungen zu benennen, von der bloß beschreibenden Ebene physikalischer, geometrischer oder sonstiger Merkmale zu einer symbolischen Ebene zu gelangen“ [DSAS11, S. 171]. Die Aufgabe der Klassifikation ist die Zuordnung eines Objektes, basierend auf einem Satz extrahierter Merkmale, zu einer von mehreren vorgegebenen oder sich im Laufe der Anwendung ausprägenden Klassen. Dabei ist die Anzahl der Klassen in der Anwendung meist deutlich geringer als die Anzahl der Objekte, z. B. bei der Klassifikation hinsichtlich fehlerfrei und fehlerhaft produzierter Erzeugnisse [DSAS11]. Die Implementation von Klassifikatoren erfolgt heutzutage immer häufiger in Form lernender Verfahren und folgt dem Bestreben, das Entscheidungsverhalten des Menschen für eine bestimmte Aufgabe durch ein Bildverarbeitungssystem maschinell nachzuvollziehen.

Die größte Herausforderung bei der Anwendung der Formen statistischer Klassifikationsverfahren zur Objekterkennung ist die Spezifikation der Merkmalsvektoren, die anhand ihrer möglichst salienten und robusten Merkmale die eindeutige und zuverlässige Klassifikation der Objekte erlauben sollen. Die Anwendung lernender Verfahren hat ihre Vorteile vor allem bei der Klassifikation von bislang für das System unbekannten Ausprägungen, die sich anhand ihrer Merkmale und einer Lernstichprobe, die das Problem „hinreichend genau und umfassend repräsentiert“ [DSAS11, S. 189], eindeutig zuordnen lassen.

5.2.4. Objektlageerkennung in der industriellen Praxis

In den letzten Jahren wurde der Einsatz von Bildverarbeitungssystemen im industriellen Umfeld, durch die Entwicklung und Vermarktung umfassender Bildverarbeitungsbibliotheken, erheblich vereinfacht. So können mittlerweile komplette Bildverarbeitungsalgorithmen in grafischen Benutzeroberflächen oder durch textuelle Programmierung – ohne tiefgründige Bildverarbeitungskenntnisse – entworfen und parametrisiert werden. Beispiele sind die Bibliotheken Halcon [MVT][®] und NeuroCheck [Neu][®] oder die Bibliothek Vision Pro [Cog][®]. Damit können insbesondere einfache Bildverarbeitungsaufgaben mit reduziertem Entwicklungs- und Integrationsaufwand realisiert werden, wie die Anwesenheits- oder Vollständigkeitskontrolle, die Objektidentifikation oder einfache Formen der Qualitätskontrolle.

Hinsichtlich des Einsatzes von Bildverarbeitungssystemen für komplexere Anwendungen, beispielsweise für die Objektklassifikation mittels 3D-Verfahren, „sind bisher nur wenige Verfahren verfügbar, die sich meist noch im Forschungsstadium befinden (Boehnke, 2007; Schmid, 2006). Das Hauptproblem dieser Verfahren ist, dass es sich dabei meist um speziell für ein bestimmtes Werkstück entwickelte Einzellösungen handelt. Neue Objekte müssen dem System oft mühsam bekannt gemacht werden, meist in Form einer langwierigen Konfiguration durch einen Experten“ [Sto11, S. 18]¹⁰.

Viele Forschungsansätze im Bereich der Objekterkennung zielen vor allem darauf ab, die Objektmodellierung und das Einlernen neuer zu klassifizierender Objekte halbautomatisch oder vollautomatisch zu gestalten. [Löm04] und [WKG+06] stellen beispielsweise einen automatischen Algorithmus zur Merkmalsextraktion vor, der mit einer halbautomatischen Objektsegmentierung gekoppelt ist. Der Bediener unterstützt dabei lediglich das Objekttraining oder den Segmentierungsprozess auf eine intuitive Art und Weise, ohne dem System Expertenwissen zuführen zu müssen. Weitere Forschungsansätze zur intuitiven Einrichtung einer Objektlokalisierung werden in [Dos14] übersichtlich dargestellt und bewertet: „Eine robuste Anwendung der Algorithmen auf industrielle Applikationen mit zum Teil sehr kleinen, reflektierenden und homogenen Werkstücken auf komplexen Untergründen ist nicht möglich“ [Dos14, S. 45]. Darüber hinaus fehlen zur Anwendung bisheriger Forschungsansätze für ein großes Bauteilspektrum geeignete Methoden, die von unerfahrenen Bedienern bedienbar sind [Dos14].

Die Defizite industrieller Bildverarbeitungslösungen bezüglich der flexiblen Anpassung an häufig wechselnde Messobjekte mit schwankenden Oberflächenbeschaffenheiten und komplexen Bauteilgeometrien sowie der Robustheit gegenüber variierenden Rahmenbedingungen werden ebenfalls in [PS05] identifiziert und kritisiert. Als Lösung wird ein Bildverarbeitungssystem vorgeschlagen, das auch für geometrisch und optisch stark variierende Objekte realisiert werden kann. Als Beispiel dient die Bearbeitung kleiner Objekte in einem Fräszentrum. Das vorgeschlagene Verfahren zur Lageerkennung erfordert jedoch auch die CAD-Daten der Objekte und ist auf saliente Merkmale in Form von Ecken und Kanten beschränkt. Ein ähnlicher Ansatz für die Überwachung eines mittels einer Spannvorrichtung eingespannten Bauteils wird in [Göb10]^p verfolgt. Er basiert ebenfalls auf dem Vergleich akquirierter Objektmerkmale mit einem vorhandenen CAD-Modell.

Im Bereich der vollautomatischen Ansätze wird in [Hau10] ein System vorgeschlagen, das auf einem Industrieroboter montiert wird. Auf diese Weise sollen, autonom und ohne Zusatzwissen, texturierte Objekte eingelernt werden. Anschließend sollen sie online detek-

¹⁰[Sto11] verweist auf [Boe07] und [Sch06a].

tierbar sein und ihre Lage in allen sechs Freiheitsgraden bestimmt werden können. Diese Methode konnte jedoch nur für wenige, geeignet ausgewählte Objekte, die eine genügend große Anzahl starker Merkmale auf der unveränderlichen, texturierten Oberfläche aufweisen, validiert werden. Ein ähnlicher Ansatz wird auch in [Kei12]^P verfolgt mit dem Ziel, die Position und Lage eines beliebig in einer Fertigungszelle positionierten Bauteils zu bestimmen, um ein Maschinenprogramm entsprechend zu adaptieren. Dazu soll ein 3D-Messsystem auf einem Industrieroboter, wie bei [Hau10], mitgeführt und die gewonnenen Daten anschließend in einem 3D-Simulationssystem ausgewertet werden. Dies erfordert ebenfalls die Existenz von CAD-Daten oder die aufwändige Erstellung von 3D-Modellen aller Objekte.

5.2.5. Bewertung und Zusammenfassung

Die in den vorhergehenden Unterabschnitten vorgestellten Ansätze zur Objektlageerkennung und die darauf basierenden Umsetzungen im industriellen Umfeld verdeutlichen die Komplexität und Herausforderung, Bildverarbeitungssysteme für vielfältige und flexible Messaufgaben einzusetzen. Die Charakteristiken der vorgestellten Verfahren und Ansätze im Kontext der in Abschnitt 5.1 dargelegten Anforderungen des Instandhaltungsprozesses sollen im Folgenden bewertet werden. Dazu sind die in Abbildung 5.1 dargestellten Netzdiagramme eine geeignete Darstellungsform. Jeder der fünf Pfade eines Netzes repräsentiert die Kompetenz eines Verfahrens bezüglich der Merkmale Robustheit, Flexibilität, Handhabbarkeit und der Objektidentifikation sowie der Lageerkennung. Je weiter außen auf dem Pfad des Netzes der Marker eines Verfahrens gesetzt wird, desto ausgeprägter sind dessen Kompetenzen für das entsprechende Merkmal. Die Größe der Fläche der aus den fünf Kompetenzmarkern gebildeten konvexen Hülle gibt bei gleicher Reihung der Bewertungskriterien Aufschluss über die allgemeine Mächtigkeit eines Verfahrens. Ein ideales Verfahren, das alle Anforderungen bestmöglich erfüllen kann, würde dementsprechend zur vollständigen Überdeckung des Netzdiagramms führen.

Abbildung 5.1 (a) visualisiert die Charakteristiken der in [Sto11] bewerteten 3D-Verfahren zur Objektklassifikation, die ihre Stärken in der Lageerkennung und der Identifikation sowie partiell auch in der Robustheit besitzen. Schwächen weisen die Verfahren sowohl in Bezug auf die Flexibilität, aufgrund der Beschränkung auf eines oder wenige Bauteile, als auch in Bezug auf die Handhabbarkeit, resultierend aus aufwändigen Trainingsphasen und der Verwendung komplexer Sensorik, auf. Die Eigenschaften der in [Dos14] betrachteten und bewerteten Verfahren und Forschungsansätze, mit dem Ziel der intuitiven Einrichtung einer Objektlageerkennung, werden in Abbildung 5.1 (b) veranschaulicht. Derartige Verfahren haben ihre Stärke in den Bereichen der Handhabbarkeit, Identifikation und Lageerkennung. Schwächen der Ansätze wurden bezüglich der Robustheit und Flexibilität identifiziert. Die Verfahren mit teil- und vollautomatisierten Ansätzen nach [PS05] oder [Hau10] lassen sich gemäß Abbildung 5.1 (c) darstellen. Sie verfolgen das Ziel der teil- oder vollautomatisierten Adaption der Objektlageerkennung für neue, unbekannte Objekte. Dementsprechend liegen ihre Stärken in der Handhabbarkeit, der Lageerkennung und der Identifikation. Die betrachteten, noch im Forschungsstadium befindlichen Ansätze, sind jedoch auf wenige ausgewählte Objekte oder ein Spektrum kleiner Bauteile mit salienten Oberflächenmerkmalen und die Existenz von CAD-Daten beschränkt. Folglich weisen sie Defizite in den Bereichen Robustheit und Flexibilität auf.

Der visualisierte Vergleich der Ansätze verdeutlicht, dass die Bildverarbeitungsverfahren

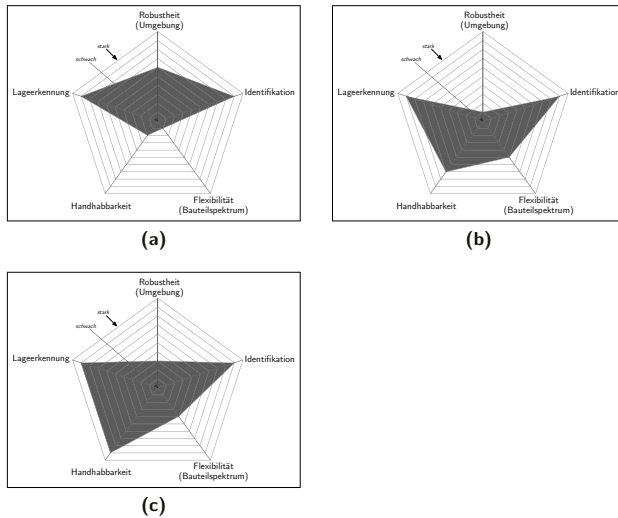


Abbildung 5.1.: Charakterisierung von Systemen der Objektlageerkennung der industriellen Praxis: (a) Objektklassifikation mittels 3D-Verfahren; (b) Systeme zur intuitiven Einrichtung der Objektlageerkennung; (c) Systeme mit vollautomatischem Ansatz zur Objektlageerkennung

in der Regel immer für eine spezielle Messaufgabe und ein kleines Spektrum an Bauteilen, in einem möglichst idealen Messumfeld entworfen werden. Die Ansätze haben, je nach fokussierter Aufgabe, jeweils Stärken in bestimmten Bereichen und entsprechende Defizite in anderen. Betrachtet man die Flächeninhalte der konvexen Hüllen in den Netzdiagrammen, so fällt auf, dass diese eine annähernd ähnliche Größe aufweisen. Die betrachteten Verfahren der industriellen Praxis haben demzufolge eine ähnliche Mächtigkeit und, je nach Anwendungsfall oder Schwerpunkt, entsprechende Stärken und Schwächen. Ihre Hauptprobleme liegen vor allem in einer hohen Robustheit und Flexibilität.

Der Einsatz intelligenter Methoden und Klassifikatoren zur Objektlageerkennung setzt zum einen die Existenz notwendiger Merkmale bei allen zu klassifizierenden Objekten voraus und erfordert zum anderen häufig einen aufwändigen Trainingsprozess, der durch einen Experten begleitet werden muss. Darüber hinaus ist meist ein möglichst großer Satz an Trainingsdaten und -objekten erforderlich, der gerade bei der Bearbeitung von Bauteilen in Losgröße-1 nicht ohne Weiteres zur Verfügung stehen kann. Zudem kann auch die für einige der zuvor angeführten Verfahren notwendige Existenz von CAD-Daten bei einem MRO-Dienstleister, der nicht gleichzeitig auch Hersteller der Bauteile ist, nicht vorausgesetzt werden. Daher ist der anwendungsspezifische Entwurf eines flexibel einsetzbaren Systems für die Verifikation der Bauteilpositionierung, das die in Abschnitt 5.1 dargelegten Anforderungen erfüllt, unabdingbar.

5.3. Systementwurf

In diesem Abschnitt soll der Entwurf eines Systems für die Identifikation und Verifikation der Positionierung von Flugzeugbauteilen eines großen Bauteilspektrums vorgestellt werden. Ziel ist dabei, den in Abschnitt 5.1 erläuterten Anforderungen gerecht zu werden und zur Minimierung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Schäden beizutragen, die aus einer fehlerhaften Bauteilpositionierung oder einem falschen gewählten Bearbeitungsprogramm resultieren. Ein solches System muss, zur Stützung der Hypothese dieser Arbeit, in Form eines Assistenzsystems in den Instandhaltungsprozess integriert werden können. Nachfolgend erfolgt die Darstellung und Erläuterung des Konzeptes für ein derartiges System, auf dessen hardwareseitige und insbesondere softwareseitige Komponenten in den daran anschließenden Unterabschnitten eingegangen wird.

5.3.1. Systemkonzept

Anders als die im industriellen Umfeld für die Massenproduktion eingesetzten Verfahren, die speziell für ein kleines Bauteilspektrum und unter optimalen Umgebungsbedingungen konzipiert werden, kann das folgend zu entwerfende System nicht auf ideale Bedingungen zurückgreifen. Die für ein Bildverarbeitungssystem suboptimalen Umgebungsbedingungen lassen sich bei der Betrachtung der Aufnahme einer Fertigungszelle in Abbildung 5.2 bereits erahnen. Dazu zählen ein stark heterogener Hintergrund, eine Vielzahl von Reflexionen und sehr ähnliche Farberscheinungen von Hintergrund, Bauteilaufnahme und Bauteil. Die Vielzahl der in Abschnitt 5.1 erläuterten, teilweise konträren Anforderungen und Rahmenbedingungen einer Verifikation der Bauteilpositionierung ist nur schwer durch ein einziges System abzubilden. Für die Erfüllung der Anforderungen gilt es folgende (Mess-)Aufgaben zu bewerkstelligen:

1. die Identifikation eines in der Anlagenzelle positionierten Bauteils,
2. die Bestimmung der aktuellen Positionierung des Bauteils und
3. die Verifikation der hinterlegten Soll-Positionierung des Bauteils.

Zur Reduktion der Komplexität sollen daher einerseits bereits bekannte Informationen über das Bauteil und die zu verifizierende Positionierung genutzt werden. Andererseits sollen auch weitere in den Instandhaltungsprozess involvierte Ressourcen berücksichtigt und in das Konzept integriert werden. Dazu zählen beispielsweise der Facharbeiter oder weitere Betriebsmittel. Diese Vorgehensweise hat sich heutzutage bei der Implementierung von Sichtprüfungssystemen etabliert, da es nicht immer sinnvoll ist, eine komplett vollautomatische Lösung anzustreben [BLF12]. „Viele erfolgreich implementierte Sichtprüfungssysteme haben den Teil der Aufgabe, der sich gut automatisieren lässt, technisch gelöst. Alles andere, und insbesondere das, was der Mensch besonders gut kann, überlässt man noch ihm und schafft somit ein Mensch-Maschine-System für die Sichtprüfung, das die besonderen Stärken der Technik mit den besonderen Stärken des Menschen symbiotisch kombiniert“ [BLF12, S. 4].

Da bei der Durchführung eines Instandhaltungsprozesses die genaue Identität des zu bearbeitenden Bauteils bekannt ist, soll diese Information auch dem Bildverarbeitungssystem zur Verfügung gestellt werden. Der erste Schritt, in Form der Identifikation des positionierten Bauteils, kann folglich durch den Facharbeiter ausgeführt und über eine Schnittstelle

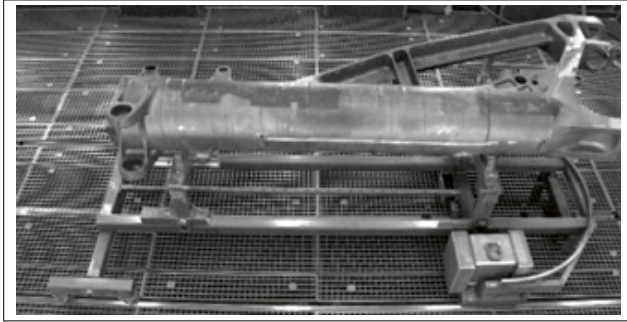


Abbildung 5.2.: Aufnahme einer Fertigungszelle mit positioniertem Großbauteil

dem System übermittelt werden. Des Weiteren wurde im letzten Kapitel ein Entwurf zur Komplexitätsbeherrschung und systematischen Wiederverwendung des Wissens zur wiederholgenauen Reproduzierung einer Bauteilpositionierung vorgestellt. Der Entwurf sieht den Einsatz einer flexiblen, kodierbaren und mobilen Bauteilaufnahme vor, die durch den Einsatz weiterer Vorrichtungselemente bauteilspezifisch individualisiert werden kann. Somit kann sowohl die Positionierung eines Bauteils auf der Bauteilaufnahme als auch deren Positionierung samt Bauteil in der Anlagenzelle wiederholgenau reproduziert werden. Durch Berücksichtigung dieses Ansatzes kann die Komplexität der Messaufgabe weiter reduziert werden. Folglich gilt es nicht, die beliebige Positionierung eines Bauteils zu bestimmen, sondern eine vorgegebene und reproduzierbare Positionierung zu verifizieren. Die Aufgabe des Systems zur Minimierung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Schäden kann auf die Verifikation einer hinterlegten Soll-Positionierung reduziert werden.

Dementsprechend kann die Funktionalität des Bildverarbeitungssystems auf die Bereiche Flexibilität, Robustheit, Handhabbarkeit und die Verifikation einer bekannten Lage fokussiert werden. Gelingt der Entwurf eines solchen Systems, das den Anforderungen mit entsprechenden Stärken in diesen Bereichen gerecht werden kann, so lassen sich seine Charakteristiken, unter Einbezug der weiteren beteiligten Ressourcen, mittels des in Abbildung 5.3 (a) dargestellten Netzdiagramms, visualisieren. Da die Funktionalität der Bildverarbeitung im Rahmen des Systemkonzeptes auf vier der fünf Bereiche fokussiert werden kann, ergibt sich im Vergleich zu den zuvor betrachteten Systemansätzen in Abbildung 5.1, die alle Bereiche abdecken müssen, eine veränderte Gestalt der konvexen Hülle. Betrachtet man jedoch ausschließlich den Flächeninhalt der konvexen Hülle des Bildverarbeitungssystems in Abbildung 5.3 (a), so weist dieser erwartungsgemäß eine ähnliche Größe auf wie die der anderen Systemansätze. Die Kombination des Bildverarbeitungssystems mit der Vorrichtung zur reproduzierbaren Positionierung führt zu der in Abbildung 5.3 (b) dargestellten Netzabdeckung. Deren Kombination mit der Charakterisierung des Facharbeiters im Rahmen des Systemkonzeptes in Abbildung 5.3 (c) führt zur Abdeckung der überwiegenden Fläche der Netzgrafik in Abbildung 5.3 (d). Die Kombination eines Bildverarbeitungssystems zur robusten Verifikation bekannter Referenzpositionierungen mit der Flexibilität eines Facharbeiters und einer Lösung zur wiederholgenauen und reproduzierbaren Bauteilpositionierung kann folglich den konträren Anforderungen und Rahmenbedingungen eines Instandhaltungsprozesses gerecht werden.

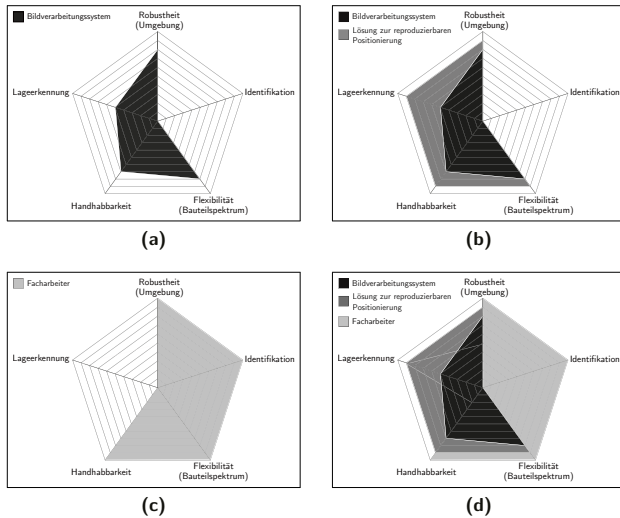


Abbildung 5.3.: Charakterisierung des Konzeptes und seiner Komponenten zur Identifikation und Verifikation eines Bauteils und dessen Positionierung: (a) Bildverarbeitungssystem; (b) Bildverarbeitungssystem in Kombination mit der Positionierungsvorrichtung; (c) Facharbeiter; (d) Gesamtsystem durch Kombination der einzelnen Komponenten

Betrachtet man nun die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Verfahren zur Objekterkennung vor dem Hintergrund des Systemkonzeptes zur Verifikation von Bauteilpositionierungen, so kann schnell die Eignung einiger dieser Verfahren ausgeschlossen werden. Aufgrund des weitreichenden Spektrums von Bauteilen heterogener Geometrie und deren stark zustandsabhängiger Oberflächenbeschaffenheit ist die Verwendung lokaler ansichtsbasierter Ansätze nicht zielführend. Die für ein MRO-Unternehmen nicht verfügbaren digitalen Konstruktionsdaten der zu bearbeitenden Bauteile sowie die mit der Erstellung von 3D-Modellen einhergehende Komplexität führen zum Ausschluss der geometriebasierten Ansätze. Folglich verbleiben zur Realisierung des Bildverarbeitungssystems lediglich Verfahren aus dem Bereich der ansichtsbasierten, globalen Verfahren. Diese nutzen in der Regel ein oder mehrere Erscheinungsbilder eines Objektes für die Objekt- und Lageerkennung. Bei deren Vorstellung in Abschnitt 5.2 wurde bereits als Nachteil bemerkt, dass die Verfahren eine möglichst exakte Segmentierung erfordern und anfällig gegenüber Verdeckungen, Störungen oder Schwankungen des Hintergrundes sind.

Es bedarf für das dargelegte Systemkonzept folglich eines ansichtsbasierten globalen Verfahrens, das neben einer robusten Segmentierung auch den weiteren Anforderungen in Bezug auf eine maximale Flexibilität und einfache Handhabbarkeit gerecht werden kann. Ein automatisiertes Bildverarbeitungssystem lässt sich, wie in Abbildung 5.4 dargestellt, grob in die Schritte Bilderzeugung, Bildvorverarbeitung, Merkmalsextraktion und Bildauswertung unterteilen. Darauf basierend soll nachfolgend der Entwurf für ein geeignetes Bildverarbeitungssystem, unterteilt in Bilderzeugung und -verarbeitung, präzisiert werden.

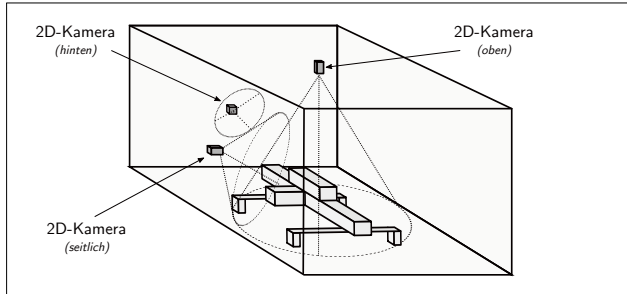


Abbildung 5.5.: Bilderzeugung zur Positionierungsverifikation durch drei 2D-Kameras aus linear unabhängigen Blickrichtungen

auch die Genauigkeit der Verifikation einer Positionierung gesteigert werden. Abbildung 5.5 zeigt exemplarisch die Integration dreier 2D-Kameras in eine Anlagenzelle, die aus drei linear unabhängigen Richtungen Bilder der Szenerie aufnehmen.

5.3.3. Entwurf einer Bildverarbeitung

Das Systemkonzept erfordert von einem Bildverarbeitungssystem die robuste Verifikation bekannter Referenzpositionierungen von Flugzeugbauteilen. Die Komplexität der Lagererkennung unbekannter Objekte wurde auf eine Objekterkennung reduziert, bei der sinnbildlich jede Positionierung eines Bauteils als einzelnes Objekt aufgefasst werden kann, das es zu verifizieren gilt. Dazu wurden, im Kontext von Anforderungen und Rahmenbedingungen, die globalen, ansichtsbasierten Verfahren als geeignet evaluiert. Sie können nach Abschnitt 5.2.1 in korrelations-, histogramm- und momentenbasierte Ansätze unterteilt werden. Die histogrammbasierten Ansätze verzichten vollständig auf die Repräsentation räumlicher Information und reduzieren damit die Informationsbasis für eine Objekterkennung deutlich. Gleiches gilt für die momentenbasierten Ansätze, die ebenfalls auf einer Codierung der vorhandenen Informationsbasis fußen. Da die Informationen durch die 2D-Aufnahme der dreidimensionalen Objekte ohnehin schon deutlich reduziert werden, soll daher nachfolgend ein korrelationsbasierter Ansatz verfolgt werden, der nicht bereits im Vorfeld die Informationsbasis reduziert.

Bildvorverarbeitung Die Verfahren zur Vorverarbeitung eines Bildes bilden meist den ersten Schritt nach dessen Erzeugung. Ziel ist es, das digitalisierte Bild für die weiteren Verarbeitungsschritte aufzubereiten und zu reduzieren. Eine umfassende Übersicht der Bildvorverarbeitung liefert [GW07]. Die an die Vorverarbeitung anschließende Merkmalextraktion erfordert eine möglichst exakte und gleichzeitig robuste Segmentierung der relevanten Objektinformationen. Daher muss im Rahmen der Bildvorverarbeitung eine Differenzierung des Eingangsbildes in Hintergrund, Störungen und relevante Objektinformationen durchgeführt werden. Diese Differenzierung wird auch als Vordergrundsegmentierung bezeichnet. Sie ist seit den frühen 1990er Jahren Schwerpunkt umfassender Forschungstätigkeiten, die zu einer Vielzahl aus ihr entwickelter Methoden und Verfahren geführt

haben [SV14]. Viele Anwendungen der Vordergrundsegmentierung finden sich insbesondere im Bereich der Video- und Verkehrsüberwachung [PHC13].

Bezogen auf den Instandhaltungsprozess gilt es, durch ein Verfahren zur Vordergrundsegmentierung, die relevanten Objektinformationen möglichst robust und genau vom Hintergrund zu differenzieren. Abbildung 5.6 zeigt die Bildaufnahme eines in einer Anlagenzelle positionierten Flugzeugbauteils. Vor allem der heterogene Hintergrund der Anlagenzelle, die Reflexionen an Hintergrund und Bauteil, das Auftreten von Schattenartefakten und die heterogene Oberflächenbeschaffenheit des positionierten Bauteils erschweren eine Segmentierung. Das ideale Ergebnis einer Bildvorverarbeitung, in Form des segmentierten Objektes, veranschaulicht Abbildung 5.6 (b). Darauf aufbauend kann folgend die Merkmalextraktion durchgeführt werden.

Merkmalextraktion Ziel der Merkmalextraktion ist die Reduktion der Bilddaten auf wenige Merkmale, die dennoch eine erfolgreiche Bildauswertung ermöglichen. Bezogen auf die übergeordnete Aufgabe des Systems, in Form der Minimierung des Risikos von Kollisionen zwischen Werkzeugmaschine und Bauteil oder Vorrichtungselementen, sollte nicht nur die Positionierung des Bauteils selbst, sondern auch die der mobilen und adaptierbaren Betriebsmittel in die Prüfung mit einbezogen werden. Die Merkmale, die folgend für die Auswertung zu extrahieren sind, müssen unveränderlich, robust extrahierbar und so charakteristisch sein, dass anhand derer die Positionierungen aller Bauteile samt eingesetzter Betriebsmittel eindeutig verifizierbar sind. Die Oberflächenmerkmale der Bauteile, in Form von Farbe und Struktur, variieren zustandsabhängig und deren Erscheinung kann durch Reflexionen und inhomogene Beleuchtung zusätzlich verfälscht werden. Diese Merkmale können nicht als unveränderlich und robust extrahierbar betrachtet werden. Da folglich weder die Farb- noch die Intensitätsinformationen des vorverarbeiteten Bildes für eine robuste Bildauswertung zielführend sind, können die Bilddaten um diese reduziert und zu Binärdaten transformiert werden. Das ideale Ergebnisbild der zuvor skizzierten Merkmalextraktion ist in Abbildung 5.6 (c) dargestellt.

Bildauswertung Im Rahmen der Bildauswertung erfolgt die Auswertung der extrahierten Merkmale. Die Aufgabe des Bildverarbeitungssystems, in Form der Verifikation der Positionierung eines Bauteils, konnte im Vorfeld auf die Verifikation eines Objektes, das sich aus positioniertem Bauteil und Aufnahmevorrichtung zusammensetzt, reduziert werden. Als extrahiertes Merkmal eines solchen steht die in Binärform kodierte Projektion des dreidimensionalen Objekts in die 2D-Ebene des Bildsensors zur Verfügung. Da ein korrelationsbasierter Ansatz zur Bildauswertung auf dem Vergleich von Prüfdaten mit Referenzdaten basiert, müssen auch diese im Vorfeld akquiriert werden. Dies kann automatisiert, nach gleicher Vorgehensweise wie bei der beschriebenen Aufnahme und Verarbeitung eines Prüfbildes bis einschließlich des Schrittes der Merkmalextraktion, erfolgen. Die Bildauswertung erfolgt durch den direkten Vergleich der Daten der Referenzpositionierung (Template) mit den Daten der zu analysierenden Bildszene. Ergebnis dieses Verfahrens ist die Angabe einer Wahrscheinlichkeit, mit der sich in der Bildszene ein den Referenzdaten entsprechendes Objekt befindet. Dazu wird – anschaulich gesprochen – das Template über die Bildszene geschoben. In Abhängigkeit von den Koordinaten der Verschiebung wird ein Korrelationskoeffizient bestimmt, der eine Aussage hinsichtlich der Übereinstimmung zwischen Template und dem jeweiligen Bildausschnitt unter diesem ermöglicht [JMNS13]. Da

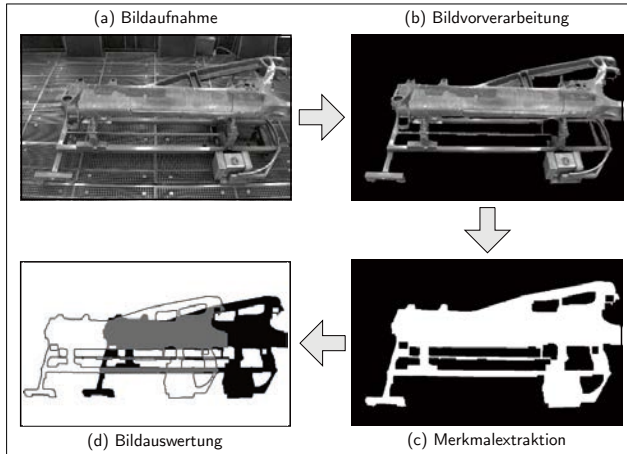


Abbildung 5.6.: Schematische Darstellung der idealen Ergebnisbilder des Bildverarbeitungssystems: (a) 2D-Bildaufnahme eines positionierten Fahrwerkbauteils; (b) Segmentierung relevanter Objektinformationen; (c) Kodierung der relevanten Objektinformationen in Binärform; (d) Bildauswertung durch Template Matching (schwarz: Referenzpositionierung, weiß: verschobenes Prüfobjekt, grau: übereinstimmende Pixel beider Positionierungen)

dieser Vergleich auf binären Daten basiert, muss die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten zusätzlich auch in umgekehrter Richtung erfolgen. Das Ergebnis einer beidseitigen Korrelation visualisiert Abbildung 5.6 (d). Diese zeigt ein in horizontaler Richtung verschobenes Prüfobjekt (weiße Pixel) gegenüber dem Referenzobjekt (schwarze Pixel). Die grau markierten Flächen zeigen gemeinsame Pixel beider Objekte. Der prozentuale Anteil der übereinstimmenden Pixel an allen Pixeln des Referenzobjektes ergibt den Korrelationskoeffizienten der einen Richtung. Das Minimum der Koeffizienten beider Richtungen ergibt schließlich das Ergebnis der beidseitigen Korrelation. An dieser Stelle schließt sich auch der Kreis zu den im Vorfeld betrachteten Verfahren der Objekterkennung, da „beim Template Matching-Verfahren Objekterkennung und Lageerkennung ineinander über [gehen]“ [JMNS13, S. 95]. Als Ergebnisdaten der Bildauswertung stehen der minimale Korrelationskoeffizient sowie dessen Verschiebungskoordinaten zur Verfügung.

Prozesskopplung Abschließend müssen die Ergebnisse der Bildauswertung vor dem Hintergrund der Verifikation einer Bauteilpositionierung betrachtet werden, um diese für die weitere Prozessdurchführung verwenden zu können. Beim Einsatz mehrerer Kameras, wie in Abschnitt 5.3.2 vorgeschlagen, empfiehlt sich die Nutzung eines gewichteten Mittels aller Perspektiven als das Maß der Übereinstimmung einer Positionierung. Beispielsweise können die Werte der Korrelationskoeffizienten, in Abhängigkeit der vorhandenen Pixel, in Referenz- und Prüfbild der jeweiligen Perspektive gewichtet werden. Auf diese Weise kann der Effekt, dass kleine Abweichungen in Bildern, die wenig Fläche eines Bauteils zeigen, final zu kleineren Wahrscheinlichkeiten einer Übereinstimmung führen, reduziert werden. Neben diesem gewichteten Übereinstimmungsmaß erlauben die zugehörigen Wer-

te der Verschiebung die Prüfung, ob auch die Positionierung von Bauteil und mobiler Aufnahmevorrichtung in der Anlagenzelle korrekt durchgeführt wurde.

Die in Abschnitt 5.2.1 von [BB06] angesprochenen Nachteile der korrelationsbasierten Ansätze für viele Anwendungen in der Form, dass geringe Verschiebungen und Rotationen bereits zu großen numerischen Unterschieden des Übereinstimmungsmaßes führen können, stellen für diese Anwendung sogar einen Vorteil dar. Bereits geringe translatorische oder rotatorische Abweichungen von der Referenzpositionierung können zu signifikanten Änderungen des Übereinstimmungsmaßes führen. Des Weiteren muss bei der Anwendung der entworfenen Bildverarbeitung berücksichtigt werden, dass die Rahmenbedingungen der Instandhaltungsprozesse weder eine Segmentierung noch eine Bildauswertung mit hundertprozentiger Genauigkeit erlauben. Die Ergebnisse der Bildauswertung stellen lediglich ein Maß für die Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung einer Positionierung mit der Referenz dar, das im Kontext der Komplexität des Bauteils und der Bedingungen der Bildaufnahme interpretiert werden muss.

Vor dem Hintergrund des Einsatzes des Systems als Assistenzsystem zur Absicherung einer kritischen Schnittstelle erfüllt das entworfene System die in Abschnitt 5.1 dargelegten Anforderungen. Damit dem Facharbeiter die Interpretation der Ergebnisse erleichtert werden kann, empfiehlt es sich, nicht die absoluten Werte von Übereinstimmungsmaß und Verschiebung bereitzustellen, sondern diese durch Fuzzy-Logik zu bewerten [JMNS13]. Eine Möglichkeit stellt die Klassifikation in die Kategorien

- hohe Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung,
- unwahrscheinliche Übereinstimmung und
- unklare Übereinstimmung, die erneut manuell geprüft werden sollte,

dar. Dies kann sowohl statisch oder adaptiv als auch positionierungsabhängig oder -unabhängig erfolgen.

5.4. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgte der Entwurf eines Systems für die Identifikation und Verifikation der Bauteilpositionierung. Die zu Beginn aufgezeigten Anforderungen und Rahmenbedingungen der Instandhaltungsprozesse verdeutlichten die Komplexität dieser Aufgabe. Dies führte zu einer Fokussierung auf bildverarbeitende Systeme. Basierend auf dem dargelegten Stand der Technik zur Objekterkennung und der Bewertung der Ansätze erfolgte abschließend der Entwurf eines Systemkonzeptes. Es integriert den Facharbeiter und seine Fähigkeiten zur Bauteilidentifikation sowie eine Bauteilaufnahme zur wiederholgenauen, reproduzierbaren Positionierung. Auf diese Weise kann die Funktionalität des Bildverarbeitungssystems auf die Verifikation einer bekannten Lage reduziert werden. Es setzt sich aus der 2D-Bildaufnahme mittels Industriekameras und einer Bildverarbeitung zusammen. Basis dieser ist eine robuste Segmentierung eines positionierten Bauteils und der Vergleich der gewonnenen Informationen mit denen eines Referenzdatensatzes. Geschuldet der Tatsache, dass ein Bildverarbeitungssystem immer für eine konkrete Aufgabe und deren Umstände entworfen werden muss, wurden seine einzelnen Komponenten entlang des grundsätzlichen Funktionsschemas weiter konkretisiert. Die erwarteten idealen Zwischenergebnisse der entworfenen Bildverarbeitung wurden exemplarisch veranschaulicht.

Das Systemkonzept erfüllt neben den aufgabenspezifischen Anforderungen hoher Robustheit und Zuverlässigkeit sowie maximaler Flexibilität auch die einer einfachen Handhabbarkeit durch niedrig qualifizierte Facharbeiter. Sowohl die Aufnahme neuer Referenzpositionierungen als auch die Verifikation einer Positionierung kann vollautomatisch erfolgen. Die Verwendung flexibel positionierbarer und leicht adaptierbarer 2D-Kameras ermöglicht, in Kombination mit einer softwareseitigen hohen Robustheit, die Integration des entworfenen Systems in vielfältige Umgebungen von Instandhaltungsprozessen.

6. Informatisierung des Instandhaltungsprozesses

In Kapitel 4 wurde bereits ein Bestandteil des Automatisierungsansatzes dieser Arbeit, in Form der Optimierung einzelner Teilprozesse durch Wiederverwendung, betrachtet. Im vorangehenden Kapitel erfolgte der Entwurf eines Systems zur Absicherung einer kritischen Schnittstelle eines Instandhaltungsprozesses. Es verbleibt die Betrachtung des zentralen Aspektes des Automatisierungsansatzes dieser Arbeit, die Informatisierung des Instandhaltungsprozesses. Dazu gilt es, alle prozessbeteiligten Ressourcen zu einem System zu fusionieren, das sowohl zur Strukturierung des Prozesses und der Organisationsabläufe beitragen kann als auch durch prozessangepasstes Informationsmanagement zu einer Effizienzsteigerung führt. Teil eines solchen Informationssystems ist auch die zentrale Schnittstelle zum Facharbeiter, die maßgeblich den Grad der Homogenisierung der Interaktionen mit allen involvierten Ressourcen beeinflusst. Für einen solchen Ansatz der Strukturierungshilfe und des Informationsmanagements gibt es jedoch keine standardisierte Lösung: „Bei aller Standardisierung ist Informationsmanagement stets eine unternehmensspezifische Aufgabe und bedarf der situativen Synchronisation mit der Unternehmensstrategie, der Organisation, den Menschen und den Geschäftsprozessen“ [Krc05, S. V]. Nachfolgend werden in diesem Kapitel die Anforderungen und Grundlagen einer Informatisierung des Instandhaltungsprozesses sowie der Stand der Technik zu Informationssystemen erläutert. Anschließend erfolgt darauf basierend der Entwurf eines situativ synchronisierten Informations- und Kommunikationssystems für den Instandhaltungsprozess.

6.1. Grundlagen einer Informatisierung

Da „nicht das Sammeln und Speichern von Wissen, sondern das Anwenden des Wissens in Prozessen [...] den Wert von Wissen [bestimmt]“ [BVÖ00, S. 219], hat vor allem dieser Aspekt zentrale Bedeutung für den im Rahmen dieser Arbeit verfolgten Automatisierungsansatz. Daher sollen in diesem Unterkapitel die Grundlagen erläutert werden, die für eine prozessspezifische Anwendung von Wissen mittels einer Informatisierung erforderlich sind.

6.1.1. Informatisierung

Die Informatisierung ist nach [Ram89] als ein Prozess der Technisierung zu begreifen, mit dem Ziel, die Plan- und Berechenbarkeit realer Produktionsprozesse sowohl in Bezug auf stabil reproduzierbare Prozesse als auch in Bezug auf den ökonomischen Wert herzustellen [Pfe07]. Die Realisierung der Informatisierung erfolgt über technische Artefakte, Methoden und Technologien und führt zu „korrespondierende[n] Veränderungen der Arbeitsorganisation und Einzeltätigkeiten“ [KM08, S. 44]. Da jedoch auf der anderen Seite auch neuartige Formen der Arbeitsorganisation durch Informationssysteme den Einsatz

neuer Technologien und technischer Investitionen erfordern können, müssen die organisatorischen Entwicklungen perspektivisch in ihrer Verzahntheit betrachtet werden [KM08]. Der Einsatz von Informatisierungstechnologien kann dazu beitragen, „Arbeit zu standardisieren und zugleich einzelne Arbeitshandlungen prozessorientiert zu integrieren“ [KM08, S. 45]. Weil die Informatisierung die Strukturierung – sowohl der Einzelarbeit der Subjekte, als auch der organisatorischen Arbeitsabläufe – einerseits ermöglicht und andererseits erzwingt, wird in diesem Zusammenhang häufig von einer durchgehenden Formalisierung gesprochen [KM08].

6.1.2. Daten, Informationen und Wissen

Der Begriff *Wissen* wird „in der Praxis als genereller Oberbegriff verwendet, der verwandte Konzepte wie Fähigkeiten, Fertigkeiten, Werthaltungen, Know-how oder Qualifikationen umschließt“ [TA12, S. 1025]. Die Vorstellungen über den Kern des Wissensbegriffes sowie über die Zusammenhänge zwischen Informationen und Wissen gehen in der Literatur weit auseinander ([PRR10], [Nor13]). „Je nach Fragestellung und eigenem Vorverständnis definieren sich Praktiker und Wissenschaftler dabei ihre jeweils eigenen Wissensbegriffe“ [PRR10, S. 16]. Folgend werden die Definitionen aufgeführt, die von Bedeutung für dieses Kapitel und den weiteren Kontext dieser Arbeit sind.

Die in Abbildung 6.1 dargestellte Wissenstreppe nach [Nor13] veranschaulicht die unterschiedlichen Qualitäten und Inhalte, die Wissen aufweisen kann. Sie reichen von reinen Zeichen bis hin zur unternehmerischen Wettbewerbsfähigkeit. Der Qualitätswandel zwischen den einzelnen Stufen der Wissenstreppe ist dabei nicht sprunghafter, sondern stetiger Natur [PRR10]. Die Grundelemente des Wissens setzen sich aus Zeichen, Daten und Informationen zusammen. Zeichen werden durch entsprechende Ordnungsregeln zu Daten, die ihrerseits für einen Empfänger zu Informationen werden, indem er für diese einen Bezug herstellt und in ihrem Bedeutungskontext entsprechend interpretiert. Erst die zweckdienliche Vernetzung der Informationen, z. B. mit dem Kontext, Erfahrungen oder bereits vorhandenem Wissen, transformiert Informationen zu (neuem) Wissen [Nor13]. Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen Informationen und Wissen wird nach [TA12]¹³ die Befähigung zum Handeln gesehen, da Wissen im Gegensatz zu Informationen handlungsorientiert ist. Folglich sind Informationen eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für Wissen. Das Wissen selbst wiederum bildet die Grundlage für die Bildung von Kompetenzen und Kernkompetenzen, die zur Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens führen und damit ausschlaggebend für den unternehmerischen Erfolg sind [TA12].

Man unterscheidet zwischen dem expliziten und dem impliziten Wissen. Explizites Wissen kann in schriftlicher Form gespeichert und daher leichter transferiert werden. Ohne einen spezifischen Kontext zu seiner Ausübung hat explizites Wissen jedoch auch lediglich Informationswert. Implizites Wissen kann weiter differenziert werden in unbewusstes Wissen und nicht explizites Wissen. Während unbewusstes Wissen dadurch gekennzeichnet ist, dass es dem Wissensträger nicht bewusst ist oder nicht mit Hilfe sprachlicher Mittel erklärt und folglich nicht expliziert werden kann, bietet nicht explizites Wissen Potenzial, dies durch Explizierung zu erschließen [TA12].

¹³[TA12] verweist dazu auf [Sve98].

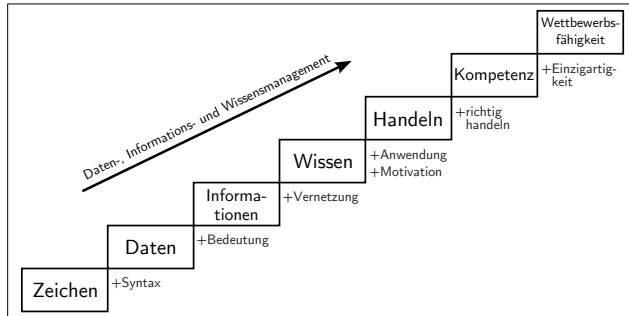


Abbildung 6.1.: Reifegrade wissensorientierter Unternehmensführung nach [Nor13]

6.1.3. Explizierung von Wissen

Die grundlegenden Strategien, um Wissen zu explizieren, sind die Personalisierungs- und die Kodifizierungsstrategie. Erstgenannte setzt dazu auf den persönlichen Austausch zwischen Wissensträgern; die zweitgenannte auf die Dokumentation und die Archivierung des Wissens [BW03]. Auch wenn sich beide Strategien nicht gegenseitig ausschließen, sollte innerhalb eines Unternehmens eine dominante Strategie verfolgt werden, um den Erfolg der Explizierung nicht expliziten Wissens zu maximieren [HNT99]. Vor allem im Hinblick auf eine systematische Wiederverwendung von Wissen ist dessen Dokumentation und Archivierung unabdingbar. Kennzeichnend für die dafür prädestinierte Kodifizierungsstrategie ist der Einsatz von IT-Systemen, um das Wissen zu digitalisieren und zu transferieren. Auf diese Weise ist die Nutzung des Wissens nicht an Zeit, Ort oder Personen gebunden und kann schnell multipliziert und wiederverwendet werden. Zwar fallen im Zuge der Umsetzung der Strategie einmalige Investitionen zur Entwicklung und Erfassung des Wissenskapitals an, jedoch ist der laufende Zugriff darauf kostengünstig, sodass die Kosten für die Nutzung des Wissens mit der Wiederverwendungshäufigkeit sinken. Die Kodifizierungsstrategie eignet sich folglich besonders, wenn regelmäßig Lösungsansätze oder Komponenten wiederverwendet werden [BW03].

6.2. Informations- und Kommunikationssysteme

Die Bezeichnung eines Systems als Informations- und Kommunikationssystem (IuK-System), das in Kurzform häufig auch als Informationssystem bezeichnet wird, verdeutlicht die enge Kopplung von Information und Kommunikation [HL05]. Bei Informationssystemen handelt es sich um soziotechnische Systeme, sogenannte Mensch-Maschine-Systeme, die sowohl menschliche als auch maschinelle Komponenten umfassen. Sie werden mit der Absicht eingesetzt, eine optimale Bereitstellung von Information und Kommunikation nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu ermöglichen [Krc05]¹⁴. Die Kommunikation bezeichnet nichts anderes, als den erforderlichen Austausch zwischen den beteiligten Elementen eines Systems, die auf bestimmte Weise miteinander in Beziehung stehen [Krc05].

¹⁴[Krc05] verweist auf [Wis94].

„Eine angepasste Nutzung von IKT [(IKT: Informations- und Kommunikationstechnik)] führt zu erheblichen Produktivitätsfortschritten und zwar nicht nur dadurch, dass Computer verwendet werden, sondern dass im Zuge der Verwendung von Computern Arbeitsabläufe und Arbeitsstrukturen effektiv, effizient und schnell gestaltet werden“ [Krc05, S. 1]. Informationssysteme werden häufig, bezogen auf ihren Verwendungskontext, auch als Informationsmanagementsysteme ([Kle92], [Ste12]), Wissensmanagementsysteme ([TA12], [Rie12]), Mitarbeiterinformationssysteme ([FGSW04], [Lan07]) oder Arbeitssysteme [DIN14c][#] bezeichnet. Da die IuK-Systeme lediglich Informationsobjekte speichern, unterscheiden sie sich von den sogenannten wissensbasierten Systemen, die anstreben das Wissen selbst, beispielsweise durch Anwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz, zu speichern [Rie12].

6.2.1. Anforderungen an ein IuK-System

Durch die Informatisierung des Instandhaltungsprozesses sollen Effizienzsteigerungen vor allem durch die informationstechnische Unterstützung des Facharbeiters erzielt werden. Dazu zählen sowohl die Bereitstellung von Prozess- und Best-Practice-Wissen als auch die Standardisierung durchzuführender Teilprozesse sowie eine Homogenisierung der Interaktion mit allen am Prozess beteiligten Entitäten. „Damit Software Geschäftsprozesse unterstützen kann, müssen Daten mit hoher Verfügbarkeit bereitgehalten, der Zugriff auf Daten zeitlich und logisch koordiniert werden, die Software einen hohen Nutzungskomfort bieten sowie sehr flexibel bei der Nutzung sein. Die Software muss deshalb eine funktionsorientierte, kontextabhängige Bedienerführung ermöglichen“ [Krc05, S. 134]¹⁵. Da sich die Charakteristiken eines IuK-Systems aus den Anforderungen ableiten sollten, die an ein solches System gestellt werden, werden diese nachfolgend im Kontext des Instandhaltungsprozesses präzisiert und erläutert.

Informations- und Wissensmanagement Zur gezielten Unterstützung des Facharbeiters bedarf es im Hinblick auf das Informations- und Wissensmanagement nicht nur der bloßen Bereitstellung einer Fülle von Informationen, sondern der gezielten Bereitstellung der richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt [Her09]. In der DIN EN ISO 9241-110 [DIN08][#] wird dieses Kriterium der Dialoggestaltung eines Informationssystems auch als *Aufgabenangemessenheit* bezeichnet, die ein interaktives System erfüllt, „wenn es den Benutzer unterstützt, seine Arbeitsaufgabe zu erledigen, d. h., wenn Funktionalität und Dialog auf den charakteristischen Eigenschaften der Arbeitsaufgabe basieren“ [DIN08, S. 8][#]. Mittels eines aufgabenangemessenen IuK-Systems müssen die gemäß einer Kodifizierungsstrategie explizierten und formalisierten prozessspezifischen Informationen gespeichert und bereitgestellt werden. Da diese verschiedenartig formalisiert und digitalisiert vorliegen können, muss das Informationssystem in der Lage sein, die verschiedenen Formen der Digitalisierung, wie z. B. Videos, Bilder, Dokumente, Maschinenprogramme oder bloße Daten, wie Konfigurationsparameter, zu verwalten.

Berücksichtigt werden muss darüber hinaus, dass die Informationen des IuK-Systems unter Umständen auch für mehrere gleiche Instandhaltungsprozesse an verschiedenen Arbeitsstationen oder weitere Systeme verfügbar sein müssen.

¹⁵[Krc05] zitiert dazu [Öst90].

Ergonomie Die zentrale Fragestellung der Ergonomie befasst sich mit der Einbindung des Menschen in komplexe Informations- und Kommunikationssysteme und dessen Interaktion mit ihnen. Dazu müssen bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion insbesondere die physiologischen und mentalen Fähigkeiten und Grenzen des Menschen berücksichtigt werden, indem sich z. B. die technische Informationsvisualisierung an Prozessen der menschlichen Informationsverarbeitung orientiert [SSG08]. Die zahlreichen Vorteile der benutzerzentrierten Gestaltung interaktiver Mensch-Maschine-Systeme und die dazu notwendigen Prozesse werden in der DIN EN ISO 9241-210 [DIN11][#] benannt und definiert. Die zustandsabhängige Bearbeitung eines großen Bauteilspektrums in Losgröße-1 erfordert, dass während des Produktlebenszyklus eines IuK-Systems die Informationsbasis stets prozessbegleitend durch die Anwender gepflegt und erweitert werden kann. Daher muss die vom Informationssystem bereitzustellende Benutzerschnittstelle in Bezug auf das Informations- und Wissensmanagement sowohl den Prozess der Explizierung von Informationen als auch die Verwaltung und Bereitstellung dieser bedarfsgerecht und effizient gestalten. In diesem Kontext muss vor allem den Eigenschaften und Anforderungen verschiedener Benutzergruppen und insbesondere der Zielgruppe niedrig qualifizierter Facharbeiter, im Hinblick auf den Umgang mit Informationssystemen, große Beachtung beigemessen werden. Für die Erzielung einer hohen Akzeptanz muss ein entsprechendes ergonomisches Bedienkonzept für maximale Einfachheit der Bedienung und minimalen Aufwand bei nötigen Eingaben konzipiert werden [FGSW04]. Auch beim Prozess der Explizierung von Prozesswissen muss die Zielgruppe bestmöglich unterstützt und idealerweise geleitet werden. Der in diesem Zusammenhang mit der Akzeptanz von IuK-Systemen häufig verwendete Begriff der *Benutzerfreundlichkeit* wird in der DIN EN ISO 9241-11 [DIN99][#] durch die Hauptmerkmale gebrauchstauglicher Computeranwendungen *Effektivität*, *Effizienz* und *Zufriedenstellung* präzisiert [Her09].

Schnittstellen, Homogenisierung und Adaptierbarkeit „Während man sich im Rahmen der Software-Ergonomie auf die Gebrauchstauglichkeit eines computerbasierten Anwendungssystems konzentriert, wird gerne übersehen, dass auch das Zusammenspiel von Arbeitsmitteln¹⁶, die teils computerbasiert, teils anderer Natur sein können [...], reibungslos funktionieren sollte. So sind gerade das Zusammenwirken und die Übergänge zwischen den physischen und digitalen Arbeitsmitteln eine besondere Herausforderung“ [Her09, S. 27]. Zur Homogenisierung reicht es nicht, lediglich den Anwender und das IuK-System zu betrachten. Vielmehr muss das Gesamtsystem aller beteiligten Komponenten des Instandhaltungsprozesses zusammenhängend und als sich gegenseitig beeinflussend betrachtet werden [Her09]. Für die Durchführung eines Instandhaltungsprozesses müssen durch den Facharbeiter verschiedene Betriebsmittel, Werkzeuge, Werkzeugmaschinen, Prüfgeräte und Dokumentenmanagementsysteme bedient, kombiniert und konfiguriert werden. Daher ist die Kernanforderung der Homogenisierung entscheidend für die Erzielung signifikanter Effizienzsteigerungen. Nicht zuletzt muss beim Entwurf eines Informations- und Kommunikationssystems auch der in dieser Arbeit verfolgte Automatisierungsansatz berücksichtigt werden, der vorsieht das Konzept zur Automatisierung auf möglichst viele Instandhaltungsprozesse effizient übertragbar zu machen.

¹⁶Zur Prozessdurchführung nötige Ressourcen werden in DIN EN ISO 6385 [DIN14c][#] als Arbeitsmittel wie folgt definiert: „Werkzeuge, einschließlich Hardware und Software, Maschinen, Fahrzeuge, Geräte, Möbel, Einrichtungen und andere im Arbeitssystem benutzte (System-)Komponenten“ [DIN14c, S. 6][#].

6.2.2. Stand der Technik

Der Einzug von Informations- und Kommunikationstechnik in die Fabriken begann, wie in Abbildung 6.2 dargestellt, bereits in den 1970er Jahren, in Form eigenständiger Anwendungen zur digitalen Informationsverarbeitung in den Bereichen der Konstruktion (CAD), dem Auftragsmanagement (PPS) und der Fertigung (CNC) [WSCL13]. Darauf basierend entwickelte sich rasch die Vision, die Produktion durch Integration von Informationstechnologie zu vernetzen und zu automatisieren. Sie wurde unter dem bereits in Abschnitt 2.1 angesprochenen Begriff des *Computer-Integrated-Manufacturing* bekannt. Das verfolgte Ziel des CIM war die Vollautomatisierung, bei der die Produktion von der Planung bis zur Fertigung rechnergesteuert erfolgen sollte und alle Informationsströme in einem Gesamtsystem integriert werden sollten [Sch90]. Dieser Ansatz scheiterte einerseits, weil der Faktor Mensch für die Produktion teilweise in Vergessenheit geriet. Andererseits scheiterte er, weil die für eine ganzheitliche Vernetzung der Produktion erforderliche Infrastruktur, in Form von Datensystemen, Sensorik und Datenübertragungstechnik, zu diesem frühen Zeitpunkt noch nicht vorhanden, nicht leistungsfähig genug oder schlichtweg nicht effizient realisierbar war ([Pil06], [Bau14]). So blieb lange Zeit eine Teilung der Anwendungsbereiche von IKT bestehen. Der Schwerpunkt der Entwicklung wandelte sich von Datenschnittstellen und der Funktionalitätserweiterung von IuK-Systemen zur Harmonisierung der Anwendungssysteme durch Standards in Hard- und Software sowie der Interaktion des Menschen mit IuK-Systemen. Erst die großen Fortschritte in der Leistungsfähigkeit der Computer und der Kommunikationstechnik ermöglichten schließlich, den Integrationsaspekt wieder aufzugreifen und eingehend zu verfolgen, der heutzutage mit den Begriffen *Digitale Produkte* und *Digitale Fabrik* umschrieben wird [WSCL13].

Der Begriff der *Digitalen Fabrik* entstand seit Ende der 1990er Jahre, vor allem durch Einschätzungen der Flugzeug- und Automobilindustrie sowie spezialisierter Softwarehäuser [Jac13], und wurde schließlich 2006 in der VDI-Richtlinie 4499 [VDI08][#] vereinheitlicht. Die Digitale Fabrik ist ein „Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden“ [VDI08, S. 3][#]. Verfolgt wird das Ziel einer „ganzheitliche[n] Planung, Evaluierung und laufende[n] Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt“ [VDI08, S. 3][#]. Dazu sollen Produkte, Fertigungsverfahren und Produktionsabläufe beginnend in einer frühen Entwicklungsphase, aber auch während der späteren realen Produktion, abgestimmt und durchgängig geplant sowie mit digitalen Modellen und Werkzeugen begleitet, beschleunigt, überprüft und verbessert werden [VDI08][#].

Mittlerweile steht der gesamte industrielle Sektor vor einem massiven Umbruch, der durch das Zusammenwachsen moderner IKT mit klassischen industriellen Prozessen zu den sogenannten cyber-physischen Systemen gekennzeichnet ist und von vielen Experten als vierte industrielle Revolution *Industrie 4.0* bezeichnet wird [SGG⁺13]. Bei der mit Industrie 4.0 verfolgten Produktionsphilosophie sollen nicht nur Maschinen und integrierte IuK-Systeme untereinander kommunizieren, sondern auch intelligent vernetzt sein und mit den zu fertigenden Produkten echtzeitnah Informationen austauschen [Bau14]. Der signifikante Unterschied zum Ansatz des CIM kann darin gesehen werden, dass die Vorgehensweise der Industrie 4.0 nicht vorsieht, alles durch ein zentrales System vorzugeben, sondern „durch verteilte, intelligente Objekte zu einer dezentralen Steuerung zu kommen, die lokale Ent-

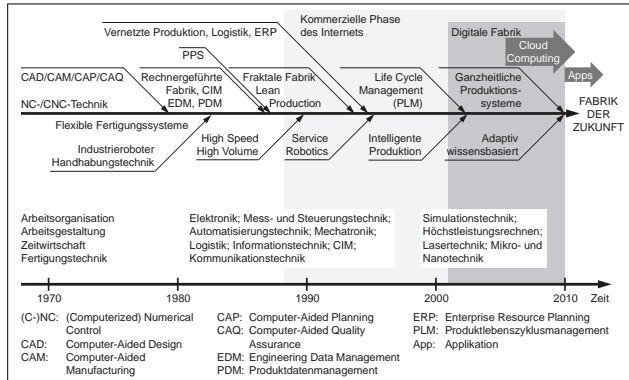


Abbildung 6.2.: IT-Unterstützung im Kontext der wesentlichen Entwicklungsrichtungen im Bereich des Engineerings aus [WSCL13]

scheidungen ermöglicht“ [SGG⁺13, S.115f.]. Die technologische Grundlage einer derartigen Vernetzung, in Form des *Internets der Dinge*, bildet einerseits „die Ausstattung von Gegenständen, Räumen und Maschinen mit verschiedenen Technologien zur Umgebungswahrnehmung, Datenspeicherung, Kommunikation und zum autonomen Handeln“ [Win14, S.141] und andererseits die „Kopplung der Daten aus Engineeringsystemen, Laufzeitsystemen sowie übergeordneten IT-Systemen“ [Bau14, S.41].

Auch wenn im Zuge der Realisierung von Industrie 4.0 Maschinen zunehmend intelligenter werden, durch die Vernetzung untereinander kommunizieren können und so in der Lage sind, viele Entscheidungen und Tätigkeiten autonom auszuführen, ist die Vision von Industrie 4.0 nicht die menschenleere, vollautomatisierte Fabrik der Zukunft. Vielmehr geht es darum, den Menschen als integralen Bestandteil eines flexibilisierten Gesamtsystems zu betrachten, ihn zu entlasten und bei der Entscheidungsfindung durch sinnvolle Informationen zu unterstützen [SGG⁺13].

6.3. Entwurf eines IuK-Systems

In diesem Abschnitt wird der Entwurf eines IuK-Systems für den Instandhaltungsprozess dargelegt, das sowohl den im vorherigen Abschnitt betrachteten allgemeinen Anforderungen an ein IuK-System als auch speziellen prozessspezifischen Anforderungen gerecht werden kann. Darüber hinaus sollen auch Aspekte des im Rahmen dieser Arbeit verfolgten Automatisierungsansatzes hinsichtlich der Übertragbarkeit und Adaptierbarkeit des Entwurfs auf weitere Instandhaltungsprozesse berücksichtigt werden.

Informations- und Wissensmanagement Die Charakteristiken und Anforderungen des Instandhaltungsprozesses bestimmen beim aufgabenangemessenen Entwurf „die geforderte Qualität, Quantität und Art der angezeigten Informationen“ [DIN08, S.8][#]. Damit die Informationen und das Wissen während der Prozessdurchführung kontextbezogen und damit aufgabenangemessen bereitstellt und wiederverwendet werden können, muss bereits

die Explizierung der Informationen in Form einer kontextbezogenen Kodifizierungsstrategie erfolgen. Zur Berücksichtigung dieser Anforderungen im Entwurf des IuK-Systems, müssen sowohl der zugrundeliegende, zu informatisierende Instandhaltungsprozess als auch dessen Teilprozesse eingehend betrachtet und analysiert werden. Diese fundamentale Vorgehensweise zur Entwicklung eines Informationssystems wird auch als Aufgabenanalyse bezeichnet. Für deren Durchführung existieren mittlerweile eine Vielzahl an Methoden für unterschiedliche Anwendungskontexte ([DS03], [Dix09], [PSR15]).

Zwar wurden die allgemeinen Eigenschaften und Rahmenbedingungen von Instandhaltungsprozessen bereits in Kapitel 2 herausgearbeitet, dennoch ist für den aufgabenangemessenen Entwurf eines IuK-Systems die Modellierung des konkreten Instandhaltungsprozesses analog zu der in Abschnitt 3.1 aufgezeigten Vorgehensweise unabdingbar. Bauteil- und zustandsunabhängig gilt es anschließend, Tätigkeiten, Arbeitsschritte und Teilprozesse so zu abstrahieren und zu clustern, dass möglichst eine grundsätzliche Ablaufstruktur des Instandhaltungsprozesses zur Bearbeitung eines Bauteils definiert werden kann. Darauf basierend können die für die Ausführung einzelner Arbeitsschritte notwendigen Ressourcen und Informationen identifiziert, deren Formalisierbarkeit analysiert und notwendige Formalisierungslücken für ausschließlich flexibel gestaltbare Arbeitsschritte definiert werden. Für die kontextspezifische Kodifizierung, in Form der bedarfsgerechten Formalisierung des zu explizierenden Wissens, bietet sich die Erstellung und Verwendung eines prozessspezifischen Templates an. Über ein solches Template können für jeden Arbeitsschritt der zuvor definierten Ablaufstruktur, zu dem prozessspezifisches Wissen expliziert werden kann, die Art und der Umfang der dazu notwendigen Informationen sowie das Medium der Formalisierung definiert werden. Der angepasste Entwurf eines IuK-Systems ermöglicht darüber hinaus auch, den Anwender durch den Prozess zu leiten und diesem für jeden Arbeitsschritt die erforderlichen Informationen bereitzustellen: „Im Idealfall werden diese Arbeitsmittel die typischen ‚Arbeitsabläufe kennen‘ und die Benutzer dabei leiten, entlang dieser Arbeitsabläufe fortzuschreiten“ [Her09, S. 29]. Dabei gilt es jedoch, aufgrund der beizubehaltenden Flexibilität des Instandhaltungsprozesses und des zugrundeliegenden Automatisierungskonzeptes dieser Arbeit, die Handlungs- und Entscheidungsvollmacht bei der Prozessdurchführung stets beim Anwender zu belassen.

Damit die Bereitstellung der Informationen des IuK-Systems ggf. auch an mehreren Arbeitsplätzen erfolgen kann und darüber hinaus auch ähnlichen Instandhaltungsprozessen oder weiteren Informationssystemen in der Automatisierungspyramide zur Verfügung gestellt werden können, bietet sich der Einsatz eines zentralen Datenbanksystems und der Zugriff über Client-Software an den Arbeitsplätzen an [Kle07].

Ergonomie Zur gezielten und bedarfsgerechten Unterstützung des Facharbeiters muss das IuK-System nicht nur spezifisch auf die Anforderungen des Instandhaltungsprozesses, sondern in gleichem Maße auch auf die Zielgruppe ausgelegt werden. Da jeder Benutzer des Informationssystems individuelle Eigenschaften besitzt, ist es nicht möglich, eine Benutzerschnittstelle zu konzipieren, die allen gerecht werden kann [Her09]. Die Einführung einer benutzerklassenspezifischen Informations- und Funktionsbereitstellung bietet eine bewährte Lösung, um die Facharbeiter, sowohl im Hinblick auf ihre Erfahrung und Spezialisierung im Umgang mit Informations- und Kommunikationstechnik als auch im Hinblick auf die durchzuführenden Tätigkeiten, bestmöglich zu unterstützen [FGSW04]. Dazu müssen die Benutzer einer Analyse unterzogen werden, um sie hinsichtlich ihrer Eigenschaften, wie z. B.

ihrer Ziele, Aufgaben, Erfahrungen und Einstellungen, klassifizieren und darauf basierend Benutzerklassen zuordnen zu können. Die Klassifizierung der Benutzereigenschaften liefert anschließend wertvolle Hinweise, wie das HMI des Informationssystems zu gestalten ist, um die einzelnen Benutzerklassen bestmöglich zu unterstützen und ihre Zufriedenstellung zu erreichen [Her09]. So kann beispielsweise der Prozess zur Explizierung von Prozesswissen in der Benutzeroberfläche nur für die Benutzerklassen zugänglich sein, denen diese Möglichkeit eingeräumt werden soll.

Auch die Integration von Systemen zur Absicherung kritischer Schnittstellen in das IuK-System muss beim Entwurf für das Bedienkonzept berücksichtigt werden. Zur Sicherstellung der Akzeptanz einer solchen Vorgehensweise und der Stärkung des Vertrauens in das Informations- und Kommunikationssystem, muss deren Integration in den Instandhaltungsprozess für den Facharbeiter als hilfreicher und nicht als hindernder, einschränkender oder überwachender Aspekt wahrgenommen werden. In diesem Zusammenhang ist die *Nachvollziehbarkeit* als wichtige Systemeigenschaft zu nennen, die beispielsweise durch die grafische Visualisierung von Prüfergebnissen und zum Verständnis wichtiger Informationen in der Benutzeroberfläche erreicht werden kann [BSHL12]. Dass die visualisierten Prüfergebnisse den Facharbeiter zudem in die Lage versetzen können, einen als *nicht in Ordnung* klassifizierten Zustand zu korrigieren, trägt zusätzlich zur Wahrnehmung der Nützlichkeit und damit der Steigerung der Zufriedenstellung des Facharbeiters bei.

Schnittstellen, Homogenisierung und Adaptierbarkeit Die Homogenisierung des Zusammenwirkens der verschiedenen Arbeitsmittel soll dadurch optimiert werden, dem Facharbeiter für die gesamte Prozessdurchführung durch das Informationssystem eine zentrale Benutzerschnittstelle als Informations- und Bedieneinheit bereitzustellen. Des Weiteren soll durch die gezielte Bereitstellung von prozessspezifischem Wissen für formalisierbare Arbeitsschritte auch die Interaktion mit physischen Arbeitsmitteln homogenisiert und optimiert werden. In diesem Zusammenhang gilt es jedoch nicht, die Benutzerschnittstellen von Arbeitsmitteln, wie Maschinen oder Robotern, gänzlich zu substituieren, sondern lediglich die Prozessausführung über eine zentrale Benutzerschnittstelle zu realisieren. Ein Beispiel wäre die automatisierte Vorauswahl eines Bearbeitungsprogrammes in einer Robotersteuerung über eine zentrale Benutzerschnittstelle, während für die Programmierung das herstellerseitige HMI verwendet wird. Zur Umsetzung dieses Ansatzes sind entsprechende Schnittstellen zwischen dem IuK-System und den weiteren Systemen notwendig, die eine derartige Kommunikation ermöglichen. Gleiches gilt für den Aspekt der Homogenisierung der Informationsbasis. Damit auf die für einen Prozess erforderlichen Informationen zugegriffen werden kann, die in MRO-Unternehmen üblicherweise in heterogenen Systemen und teilweise in Papierform vorgehalten werden, und sie zentral bereitgestellt werden können, bedarf es ebenfalls entsprechender Schnittstellen. Eine Schnittstelle zwischen zwei Systemen setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, die definiert und realisiert werden müssen. Dies ist zum einen der technische Teil, der sich mit der Kommunikation und dem Austausch der Daten befasst, und zum anderen die eigentliche Definition der auszutauschenden Daten [Kle07].

Bezogen auf einen einzigen zu informatisierenden Instandhaltungsprozess ergibt sich, resultierend aus der prozessangepassten und benutzerzentrierten Entwicklung eines IuK-Systems mit speziell auf die Anwendungssysteme des Prozesses abgestimmten Schnittstellen, ein nicht unerheblicher Entwicklungsaufwand. Abhilfe schafft an dieser Stelle die Ver-

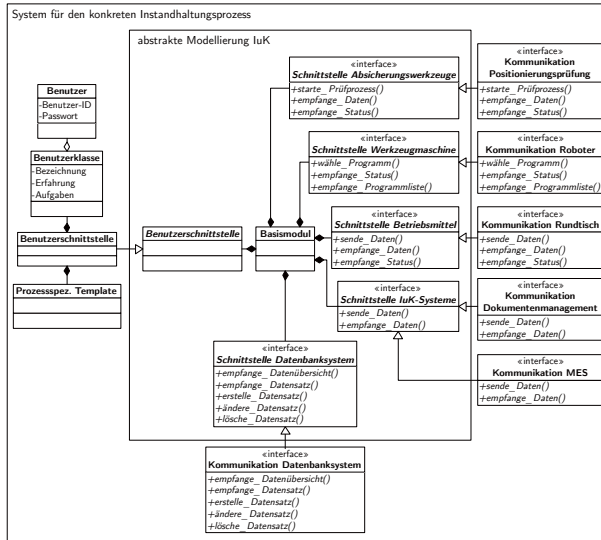


Abbildung 6.3.: Entwurf eines Informationssystems für den konkreten Instandhaltungsprozess, basierend auf der aufgabenangemessenen Implementierung der abstrakten Objekte des zugrundeliegenden modular aufgebauten IuK-Systems

wendung einer modularen, offenen Systemstruktur und die abstrakte Definition von Modulen, Funktionen und Schnittstellen, wie in Abbildung 6.3 entworfen. Diese Vorgehensweise ermöglicht die voll umfängliche Implementation des Grundmoduls des IuK-Systems. Für die Adaption des Entwurfs auf einen konkreten Instandhaltungsprozess gilt es anschließend, die abstrakten Objekte entsprechend der Rahmenbedingungen und der Infrastruktur des Prozesses zu implementieren. Dazu können auch für einen anderen Prozess realisierte Module entweder gänzlich wiederverwendet oder durch wenige Anpassungen auf abweichende Anforderungen und Rahmenbedingungen adaptiert und integriert werden.

6.4. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde der Ansatz zur Informatisierung des Instandhaltungsprozesses vorgestellt. Aufbauend auf den dargelegten Grundlagen zur Differenzierung von Daten, Informationen und Wissen sowie der Explizierung von Wissen durch Informatisierung, wurden die Anforderungen und der Stand der Technik zu IuK-Systemen erläutert. Ein solches System muss neben der Verwaltung von Informationen auch deren gezielte Bereitstellung zum richtigen Zeitpunkt ermöglichen und dabei vor allem ergonomischen Gesichtspunkten der Anwender genügen. Der Instandhaltungsprozess erfordert dazu die Bedienbarkeit durch verschiedene Zielgruppen, die sich im Hinblick auf ihre Aufgabe und ihre Qualifikation differenzieren. Des Weiteren muss durch ein IuK-System eine homogene Interaktion mit weiteren Ressourcen des Instandhaltungsprozesses ermöglicht werden.

Der Entwurf eines IuK-Systems, das aufgabenangemessen spezifiziert werden muss, berücksichtigt diese Aspekte. Basierend auf einer grundsätzlichen Ablaufstruktur eines Prozesses erlaubt die Verwendung eines prozessspezifischen Templates das Leiten des Anwenders durch den Prozess und die kontextspezifische Informationsbereitstellung. In Bezug auf die Ergonomie wurde die Differenzierung von Benutzerklassen als sinnvoll erachtet, um damit auf die größtmögliche Zufriedenheit aller Anwender hinzuwirken. Für die Integration von Systeme zur Absicherung kritischer Schnittstellen sieht das Konzept diesbezüglich vor allem eine Nachvollziehbar- und Verwendbarkeit der Prüfergebnisse vor. Durch die Bereitstellung einer zentralen Benutzerschnittstelle wird der Homogenisierung des Zusammenwirkens der verschiedenen Ressourcen Rechnung getragen, die über Schnittstellen in das System integriert werden. Dies wurde anhand eines idealen Entwurfs des IuK-Systems aufgezeigt.

Mit den Erkenntnissen dieses Kapitels wurden die Voraussetzungen geschaffen, die Teillösungen des Automatisierungsansatzes dieser Dissertation zu integrieren und zur Stützung ihrer Hypothese zu konkretisieren.

7. Automatisierung im Fallbeispiel

Das Automatisierungskonzept nach Kapitel 3 soll hier in einem konkreten Fallbeispiel eines Instandhaltungsprozesses in der Praxis eines MRO-Unternehmens angewendet und im Hinblick auf mögliche Effizienzsteigerungen untersucht werden. Auf diese Weise soll die dieser Arbeit zugrunde liegenden Hypothese bestätigt werden.

Im ersten Abschnitt erfolgt die Umsetzung des Ansatzes auf einen berührungslosen Instandhaltungsprozess, unter Berücksichtigung der in den vorangehenden Kapiteln entworfenen Teillösungen. Für die Evaluation der Effizienzsteigerungen werden Experimente für den Prozess entworfen und deren Ergebnisse ausgewertet. Der dritte Abschnitt befasst sich mit der Übertragung des Konzeptes auf einen Instandhaltungsprozess mit auftretenden Kontaktkräften zwischen Werkzeug und Bauteil. Sie wird anhand einer Simulation evaluiert. Abschließend erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse dieses Kapitels.

7.1. Automatisierung des Strahlprozesses in der Instandhaltung

Die Automatisierung des Strahlprozesses zur Oberflächenentschichtung von Großbauteilen der Flugzeugfahrwerke wird im Folgenden betrachtet. Der Strahlprozess ist Bestandteil des Reinigungsprozesses, der bereits in Unterkapitel 2.3 modelliert wurde. Gemäß der DIN 8580 [DIN03][#] zählt der berührungslose Strahlprozess zu den allgemeinen Fertigungsverfahren. Gegenstand ist die Abtragung der beiden obersten Lackschichten eines Bauteils, damit im Rahmen nachfolgender Prozesse dessen einzelne Werkstoffschichten auf Schäden geprüft werden können. Zur Abtragung der Oberflächenschichten werden diese einem Druckluftstrahlverfahren mit festem Strahlmittel, in Form von Kunststoffgranulat, unterzogen. Dazu wird eine Düse von etwa 5-20 mm Durchmesser in einem Abstand zwischen 100 mm und 250 mm entlang des Bauteils bewegt. Währenddessen wird das Strahlmittel mit einem Druck von maximal 3,5 bar auf die Oberfläche gestrahlt. Die ausschließlich manuelle Ausführung des Prozesses ist sehr arbeits-, zeit- und kostenaufwändig. Insbesondere stellt sie für die Facharbeiter eine hohe körperliche Belastung dar, da die Bauteile ausschließlich von außen in einer explosionsgeschützten Strahlkabine bearbeitet werden können. Dazu werden, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, Stahllanzen verschiedener Längen eingesetzt, die händisch und über längere Zeiträume um das Bauteil bewegt werden müssen. Daher wurde bereits vor Anwendung des Automatisierungsansatzes dieser Dissertation in der Instandhaltung der LHT die manuelle Ausführung durch die teilautomatisierte ersetzt – unter Verwendung eines speziell konzipierten Strahlroboters [SLF14]. Dieser Instandhaltungsprozess eignet sich besonders als Fallbeispiel.

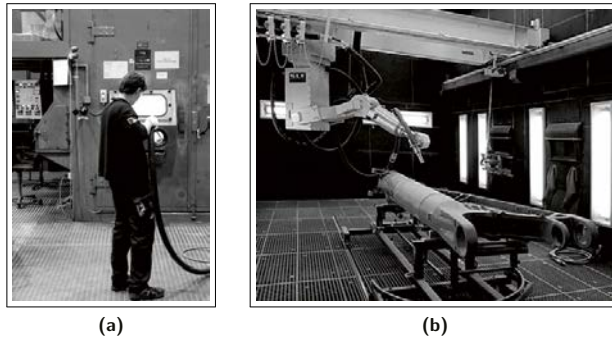


Abbildung 7.1.: Prozessdurchführung der Oberflächenentschichtung: (a) ausschließlich manuelle Durchführung unter Verwendung von Strahllanzen, die von außen in die Stahlkabine eingebracht und händisch um das Bauteil geführt werden müssen; (b) automatisierte Durchführung der Entschichtung durch Verwendung eines acht-achsigen Strahlroboters aus [SLF15][®]

7.1.1. Herkömmlicher Strahlprozess unter Verwendung eines Roboters

Der in Abbildung 7.2 (a) modellierte Strahlprozess beginnt mit der *Arbeitsvorbereitung*. Zunächst meldet der Facharbeiter den Beginn der Bearbeitung eines Bauteils über eine Benutzerschnittstelle im MES-System an und beschafft sich über die verschiedenen, betriebsinternen Informationssysteme relevante Dokumente mit Bearbeitungsvorgaben und Richtlinien. Unter Berücksichtigung dieser Informationen erfolgt die manuelle Durchführung des Arbeitsauftrags. Im Teilprozess *Spannen und Ausrichten* muss folgend die Positionierung des Fahrwerksgroßbauteils in der Roboterzelle erfolgen. Die daran anschließende automatisierte Durchführung des Strahlprozesses erfordert die exakte Reproduzierung der dem Bearbeitungsprogramm zugehörigen Positionierung. Die Vorgabe einer solchen erfolgt durch Formalisierung von Zielparametern, in Form der Angabe von Abständen der äußeren Bauteilkanten zur jeweils nächstliegenden Wand der Zelle in allen drei kartesischen Koordinatenachsen. Diese Abstände können zur Prüfung der Positionierung mit einem Laserdistanzmessgerät gemessen werden. Die zur Positionierung notwendige Adaption einer Bauteilaufnahme und die Wahl einzusetzender Betriebsmittel aus einer Vielzahl von Prismen, Distanzblechen, Anschlägen oder Gurten, obliegt ausschließlich dem Facharbeiter. In der Regel ist eine mehrmalige Iteration der Arbeitsschritte *Vorrichtungsaufbau* - *Bauteil ausrichten* - *Bauteil fixieren* - *Positionierung prüfen* erforderlich, bis die gemessenen Abstände mit den in Papierform hinterlegten Sollwerten übereinstimmen. Einschränkend kommt hinzu, dass die Großbauteile nur außerhalb der Roboterzelle mit einem Kran auf der Vorrichtung umpositioniert werden können. Im Anschluss an die Bauteilpositionierung kann der Facharbeiter – über das proprietäre HMI des Roboterherstellers – das entsprechende Bearbeitungsprogramm in einer Liste suchen und den Prozess starten. Daraufhin wird das selektierte Programm automatisch durch den Strahlroboter ausgeführt. Während der Bearbeitungszeit, die zwischen 30 min und 120 min beträgt, steht der Facharbeiter für andere Tätigkeiten an benachbarten Anlagen der Werkstatsumgebung zur Verfügung.

Die durchzuführende Entschichtung der gesamten Bauteiloberfläche erfordert die Bearbeitung in mindestens einer weiteren Positionierung. Dementsprechend müssen die zuvor beschriebenen Arbeitsschritte, beginnend mit *Spannen und Ausrichten*, wiederholt werden. Abschließend wird der Auftrag dem MES-System als abgeschlossen gemeldet.

In der Modellierung wurden die manuelle Qualitätskontrolle und eine gegebenenfalls notwendige, wiederholte Durchführung des Bearbeitungsprozesses bewusst vernachlässigt. Sie nehmen keinen direkten Einfluss auf die Anwendung und Beurteilung des Automatisierungsansatzes dieser Arbeit. Es wird folglich angenommen, dass ein gestartetes Roboterprogramm stets zu dem geforderten Bearbeitungsergebnis führt.

Verglichen mit der ausschließlich manuellen Ausführung des Strahlprozesses nach Abbildung 7.1 (a) führt die Nutzung des Strahlroboters in Abbildung 7.1 (b) zu einer Steigerung des Automatisierungsgrades und einer Reduktion der physischen Belastung für den Facharbeiter. Seine Verfügbarkeit für andere Tätigkeiten während der automatisierten Entschichtung führt bereits zu Effizienzsteigerungen. Wie in Abbildung 7.2 (a) erkennbar, muss trotz Automatisierung eine Vielzahl an manuell auszuführenden Arbeitsschritten verrichtet werden. Deren Komplexität bezogen auf den ausschließlich manuellen Bearbeitungsprozess hat sich durch die Integration des Strahlroboters signifikant erhöht. Des Weiteren muss der Strahlprozess um weitere anspruchsvolle Teilprozesse, wie z. B. eine Programmierung, erweitert werden. Während für die manuelle Durchführung die Fixierung eines Bauteils in der Strahlkabinen in beliebiger Positionierung ausreichte, gilt es nun, für den teilautomatisierten Prozess eine vorgegebene Positionierung wiederholgenau zu reproduzieren. Darüber hinaus werden die Facharbeiter mit der Bedienung und Programmierung moderner Roboter und Betriebsmittel über proprietäre Benutzerschnittstellen konfrontiert. Sie verfügen zwar über eine hohe Prozessspezialisierung, aber über eine niedrige Qualifikation im Umgang mit Informationssystemen und über keine im Umgang mit Robotern. Diese Gegebenheiten stellen die Facharbeiter vor große Herausforderungen und führen zu hohem Fehlerpotenzial während der Durchführung der einzelnen Prozessschritte.

7.1.2. Optimierung des Strahlprozesses

Der herkömmliche Strahlprozess nach 7.1.1 wird unter Anwendung des in Kapitel 3 vorgestellten Automatisierungskonzeptes optimiert. Auf diese Weise soll der Facharbeiter bei der Ausführung des Strahlprozesses und der Interaktion mit den erforderlichen Arbeitsmitteln unterstützt werden.

Für die Anwendung auf den Strahlprozess müssen im ersten Schritt die einzelnen Komponenten des Automatisierungsansatzes auf die Anforderungen und Rahmenbedingungen des Prozesses angepasst und deren Informatisierung prozessspezifisch konzipiert werden. Anschließend müssen sie gemeinsam mit den weiteren Ressourcen zu einem benutzerzentrierten IuK-System fusioniert werden.

Optimierung der Integration des Strahlroboters Für eine Optimierung der Integration des Strahlroboters in den Instandhaltungsprozess müssen vor allem zwei Gesichtspunkte Beachtung finden. Erster ist die Bedienung durch niedrig qualifiziertes Bedienpersonal. Für deren Optimierung bedarf es vor allem einer Homogenisierung der Interaktion zwischen Facharbeiter und Strahlroboter. Dieser Aspekt wird vor allem durch die Bereitstellung einer zentralen, standardisierten Benutzerschnittstelle umgesetzt und bei der Informatisierung des Prozesses aufgegriffen.

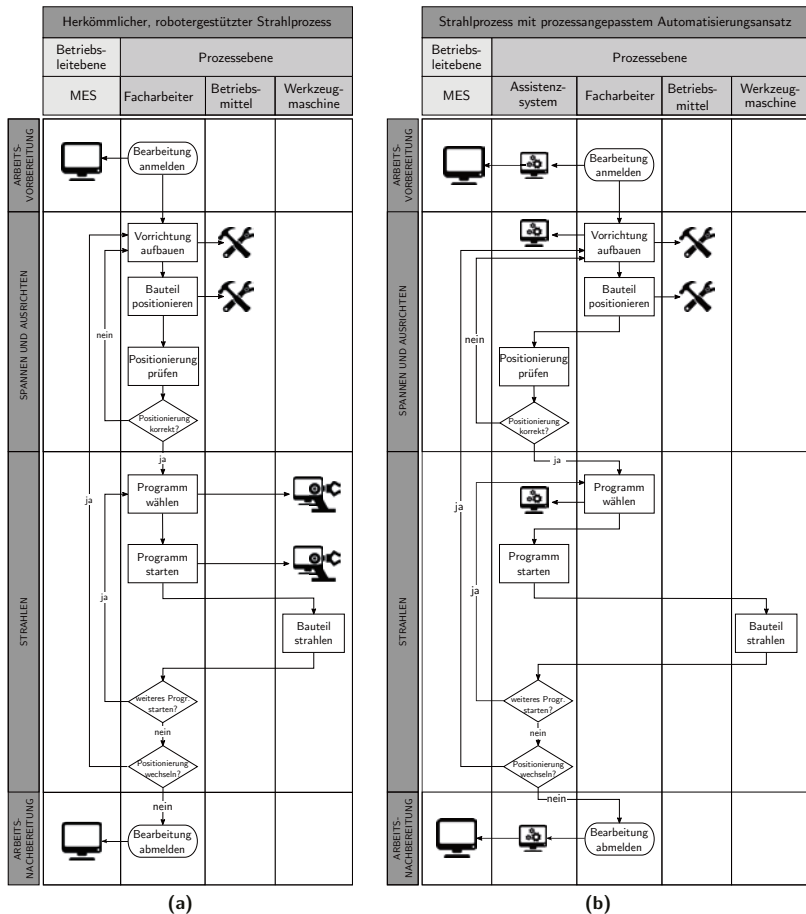


Abbildung 7.2.: Prozessablaufdiagramm des robotergestützten Strahlprozesses: (a) herkömmliche Prozessdurchführung; (b) Prozessdurchführung unter Anwendung des Automatisierungsansatzes dieser Arbeit

Des Weiteren müssen die mit der Integration des Strahlroboters einhergehenden, zusätzlichen Arbeitsschritte betrachtet werden, die mit einer Komplexitätssteigerung des Prozesses verbunden sind. Diesbezüglich lässt sich vor allem der Prozess zur Erstellung der Bearbeitungsprogramme optimieren. Dazu kann der in Abschnitt 4.4 vorgestellte Entwurf zur Optimierung der Roboterprogrammierung herangezogen werden. Auf diese Weise wird die Playback-Programmierung durch eine intuitive Offline-Programmierung erweitert, die es ermöglicht Roboterprogramme durch Wiederverwendung bereits existierender Programmmodule zu erstellen. Eine automatisierte Generierung ganzer Roboterprogramme für symmetrische Bearbeitungspositionen kann darüber hinaus den Aufwand nahezu halbieren. Für ein Großbauteil liegt der Programmieraufwand bei etwa 16-20 Stunden, sodass für ein Spektrum von 200 zu programmierenden Bauteilen auf diese Weise eine Zeiterparnis von über 1.500 Stunden erzielt werden kann. Dies minimiert die mit der Online-Programmierung einhergehende Verschwendung resultierend aus der Unproduktivität der Produktionsanlage drastisch.

Positionierung der Fahrwerksgroßbauteile Die Anwendung des Entwurfs zur reproduzierbaren Positionierung, nach Abschnitt 4.3.3, bietet eine Lösungsmöglichkeit für die Komplexitätsbeherrschung und systematische Wiederverwendung des Prozesswissens. Der Einsatz einer flexiblen, mobilen und kodierbaren Bauteilaufnahme, die durch weitere Vorrichtungs-elemente an definierten Schnittstellen bauteilspezifisch individualisiert werden kann, ermöglicht eine Formalisierung und Informatisierung des Prozesswissens. Zur Informatisierung wurde das in Abbildung 4.3 dargestellte Template herangezogen. Sie setzt sich für den Teilprozess *Spannen und Ausrichten* aus zwei Komponenten zusammen. Eine Komponente stellt eine Bibliothek von Adaptionsvorrichtungen dar, in der jede Vorrichtung mit ihrer eindeutigen Identifikationsnummer, einer bildlichen und einer textuellen Beschreibung zentral verwaltet werden kann. Auf diese Weise können auch diejenigen Betriebsmittel in das IuK-System integriert werden, die bislang nicht digital verwaltet werden oder als System realisiert sind. Die zweite Komponente bildet die Informatisierung in Form einer Eingabemaske, in der die Bauteilaufnahme mit ihren Konfigurationsparametern und Schnittstellen visualisiert wird. So können die notwendigen Informationen durch den Facharbeiter kontextspezifisch eingegeben und damit in Form von Wissen expliziert werden. Eine entsprechende Eingabemaske ist in Abbildung 7.3 skizziert. Das IuK-System bietet darüber hinaus eine umgehende Validierung in Bezug auf einen gültigen Wertebereich der Benutzereingaben. Mögliche Fehler können sofort dem Benutzer zur wiederholten Eingabe mitgeteilt werden. Die Angabe der zu verwendenden Adaptionsvorrichtungen kann für jede Schnittstelle, durch Zuordnung von Vorrichtungen aus der Bibliothek, intuitiv durchgeführt werden. Die Visualisierung von Grundgerüst, Konfigurationsparametern und Schnittstellen ermöglicht sowohl die Explizierung des Wissens, als auch die kontextspezifische Bereitstellung der Informationen.

Integration eines Systems zur Verifikation der Bauteilpositionierung Die Standardisierung und Informatisierung der Positionierung eines Bauteils führt zu einer deutlichen Reduktion der Komplexität des Teilprozesses *Spannen und Ausrichten*. Dennoch birgt der Übergang zum nachfolgenden Teilprozess der automatisierten Bearbeitung, bei dem der Mensch als Schnittstelle zwischen allen Prozessressourcen fungiert, ein nicht unerhebliches Fehlerpotenzial. So kann ein fehlerhaft positioniertes Bauteil oder ein falsches gewähltes

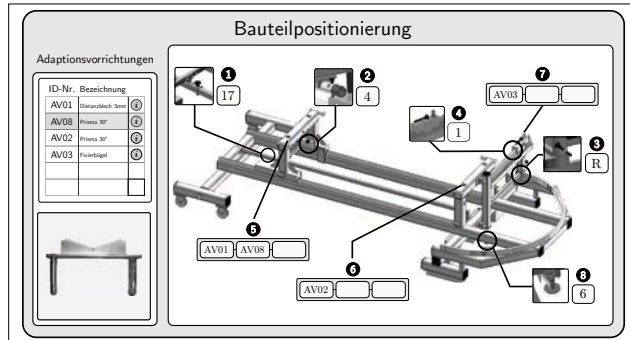


Abbildung 7.3.: Entwurf einer Informatisierung des Teilprozesses *Spannen und Ausrichten*; rechts: Visualisierung der adaptierbaren Bauteilaufnahme, ihrer Konfigurationsparameter und Schnittstellen; links: zusammenfassende Auflistung der für eine Positionierung zu verwendenden Adaptionsvorrichtungen

Bearbeitungsprogramm zu einer Kollision von Strahlroboter und Großbauteil oder Betriebsmitteln führen. Zur Reduktion der Wahrscheinlichkeit derartiger Schäden sieht der Automatisierungsansatz dieser Arbeit die Absicherung einer solchen kritischen Schnittstelle vor. Durch ein entsprechendes System sollen mögliche Fehler vor der Programmausführung identifiziert und so zusätzlich das Vertrauen der Facharbeiter in die Verwendung moderner Produktionssysteme gestärkt werden.

Zur Absicherung dieser kritischen Schnittstelle, in Form einer Verifikation der Bauteilpositionierung, kann das in Abschnitt 5.3 entworfene Bildverarbeitungssystem herangezogen und in den Instandhaltungsprozess integriert werden. Das Systemkonzept ermöglicht zum einen die schnelle Adaption an die Rahmenbedingungen der heterogenen Umgebung der Roboterzelle und den volatilen Zustand der Bauteile. Zum anderen werden dadurch die Anforderungen bezüglich einer benutzerzentrierten Informatisierung erfüllt, da sowohl die Explizierung von Daten neuer Referenzpositionierungen als auch die Verifikation einer solchen vollautomatisiert erfolgen kann. Die hardwaretechnische Realisierung des Bildverarbeitungssystems ist exemplarisch in Abbildung 7.4 (a) abgebildet. Dargestellt ist eine Industriekamera, die gemäß Abbildung 5.5 seitlich an einem Fenster der Roboterzelle montiert wurde. Für die softwaretechnische Realisierung bedurfte es der Entwicklung eines speziellen Bildverarbeitungsalgorithmus, im Hinblick auf die Anforderungen des Instandhaltungsprozesses. Gemäß des in Abschnitt 5.3.3 dargestellten Entwurfs wurde daher ein Verfahren entwickelt, das auch unter den suboptimalen Rahmenbedingungen die robuste Segmentierung eines in der Roboterzelle positionierten Bauteils mit Betriebsmitteln ermöglicht [SEF14]*.

Die Resultate der Verifikation einer Bauteilpositionierung veranschaulicht exemplarisch Tabelle 7.1. Dargestellt sind die Ergebnisse der Bildauswertung für drei segmentierte Großbauteile eines Fahrwerks. Für jedes Bauteil wurden die separat aufgenommenen Prüfdaten durch den entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmus mit den Referenzdaten aller Bauteile verglichen. Es zeigt sich, dass der Vergleich von Prüf- mit zugehörigen Referenzdaten eines Bauteils zu Übereinstimmungswerten von >95% führt. Vergleiche mit den Daten

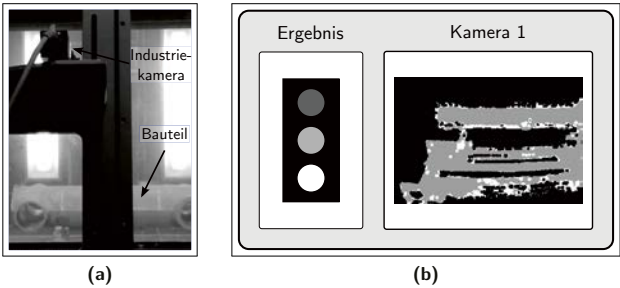





Abbildung 7.4.: (a) Außerhalb der Roboterzelle montierte Industriekamera für die Bildaufnahme der Bauteilpositionierung; (b) Entwurf einer Informatisierung der Ergebnisse anhand einer Ampel und der schematischen Visualisierung von Abweichungen zwischen Referenz- und Prüf-Bild (graue Pixel: Übereinstimmung, weiße Pixel: Abweichung)

anderer Bauteile ergeben, abhängig von der Ähnlichkeit ihrer Kontur, Werte zwischen 87% und 74%. Die Ergebnisse der Bildauswertung stellen daher, ergänzt durch die Werte einer etwaigen Verschiebung, eine geeignete Grundlage dar, um die Übereinstimmung einer Positionierung mit deren Referenz anhand einer Fuzzy-Logik zu bewerten und damit eine Verifikation vorzunehmen [SEF14]*. Die Genauigkeit liegt im Zentimeterbereich und entspricht damit den Anforderungen des berührungslosen Prozesses.

Zur Umsetzung der im letzten Kapitel geforderten Nachvollziehbarkeit der Verifikation, bei der Integration des Absicherungswerkzeugs in das Assistenzsystem, werden sowohl das Ergebnis der Verifikation als auch die Unterschiede zwischen Referenz- und Prüf-Bild in einer Benutzeroberfläche angezeigt. Für die Visualisierung des in drei Bereiche klassifizierten Ergebnisses der Verifikation eignet sich die Verwendung einer Ampel. Eine solche ist leicht verständlich, im Gegensatz zur Angabe von Korrelationskoeffizient und Verschiebungsvektor, die kontext- und bauteilspezifisch interpretiert werden müssen. Ergänzend wird der Facharbeiter durch die schematische Darstellung der Abweichungen zwischen Referenz- und Prüf-Bild nach Abbildung 7.4(b) in die Lage versetzt, das Ergebnis zu interpretieren und eventuelle Korrekturen vorzunehmen.

Tabelle 7.1.: Ergebnisse der Verifikation der Positionierung dreier Fahrwerksbauteile

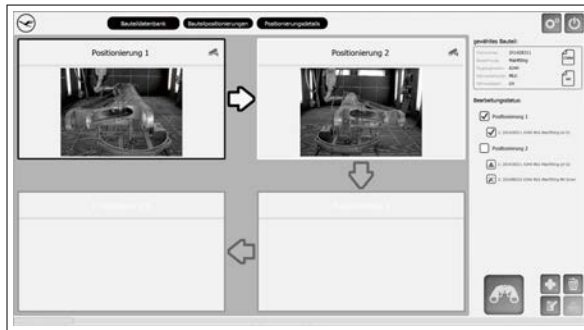
	Bauteil 1	Bauteil 2	Bauteil 3	Prüfobjekt
Bauteil 1	96,0%	86,2%	74,3%	
Bauteil 2	86,2%	96,1%	74,1%	
Bauteil 3	74,3%	74,1%	95,5%	

Informatisierung des Strahlprozesses Für die durchgängige Informatisierung des Instandhaltungsprozesses müssen die Komponenten des Automatisierungsansatzes in einem Informations- und Kommunikationssystem integriert werden, das sowohl prozessbeteiligte Maschinen und weitere IuK-Systeme über entsprechende Schnittstellen, als auch den Facharbeiter über eine zentrale Benutzerschnittstelle integriert. Deren Aufbau veranschaulicht Abbildung 7.5 anhand exemplarisch dargestellter Ansichten. Erkennbar im einheitlichen Aufbau aller Ansichten ist das stets vorhandene rechte Segment des HMI. Dieses setzt sich aus der Darstellung der allgemeinen Informationen zum ausgewählten Bauteil und dessen aktuellem Bearbeitungsstatus sowie einer Bedienkonsole zusammen. Diese erlaubt die intuitive Bedienung aller Funktionen des HMI anhand weniger Bedienknöpfe. Die dargestellten Informationen eines Bauteils werden ergänzt durch Verknüpfungen zu den für die Bearbeitung notwendigen Dokumentationen, in Form des CMM und der Arbeitskarte des Prozesses, welche zu jedem Zeitpunkt aus den bereitstellenden Systemen abgerufen und angezeigt werden können. Der aktuelle Bearbeitungsstatus gibt Aufschluss über abgeschlossene, fehlerhafte und noch auszuführende Programme. Die dargestellte Ablaufstruktur stellt jedoch keine starre Vorgabe für den Facharbeiter dar und schränkt ihn folglich nicht in seiner Flexibilität bei der Prozessdurchführung ein.

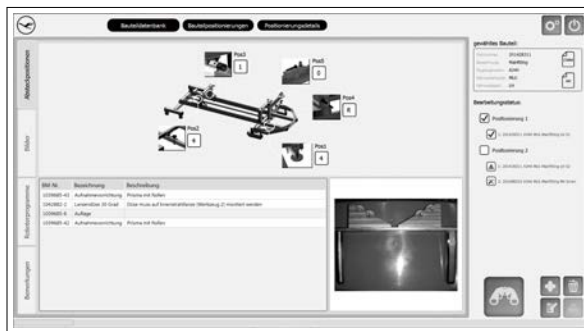
Die Visualisierung der Ablaufreihenfolge aller für die Bearbeitung einzunehmender Positionierungen zeigt Abbildung 7.5 (a). Diese Ansicht wird dem Facharbeiter nach der Auswahl des zu bearbeitenden Bauteils angezeigt und kann zu jedem Zeitpunkt über das obige Navigationsmenü des HMI aufgerufen werden. Die Bereitstellung des Wissens zur Bauteilpositionierung zeigt Abbildung 7.5 (b). Im exemplarisch dargestellten Reiter werden die Informationen anhand des informatisierten Templates angezeigt. Sie können in weiteren zwei Reitern optional durch Bildaufnahmen und Freitext ergänzt werden. Im verbleibenden Reiter können jeder Positionierung ein oder mehrere auszuführende Bearbeitungsprogramme aus dem Verzeichnis der Robotersteuerung zugeordnet werden. In Kombination mit einer Verifikation der Bauteilpositionierung vor dem Start eines ausgewählten Programms kann so die Schnittstelle im Übergang zur automatisierten Bearbeitung vollständig abgesichert werden. Die Verwaltung von Adaptionsvorrichtungen in einer Bibliothek ist in Abbildung 7.5 (c) dargestellt.

Eine Differenzierung der Benutzer, gemäß des Entwurfs in Abschnitt 6.3, erfolgt in zwei Benutzerklassen. *Einrichtern*, die sowohl für die Erstellung von Bearbeitungsprogrammen als auch für die Explizierung des Wissens für eine Prozessdurchführung verantwortlich sind, stehen dabei alle Funktionen des IuK-Systems zur Verfügung. Für *Bediener*, die über einen geringen Qualifikations- und Spezialisierungsgrad verfügen, werden im HMI hingegen nur jene Informationen bereitgestellt, die zur reinen Prozessdurchführung erforderlich sind. Aufgrund der Absicherung der kritischen Schnittstelle im Übergang zur automatisierten Bearbeitung benötigt ein Bediener zudem keine besonderen Kenntnisse für die Durchführung des Strahlprozesses unter Verwendung des Strahlroboters, die über die herkömmliche manuelle Bearbeitung der Bauteile hinausgehen.

Die Unterschiede der automatisierten Prozessdurchführung zur herkömmlichen, nicht-automatisierten, zeigt die Betrachtung beider Modellierungen in Abbildung 7.2. Gegenüber der Modellierung des herkömmlichen Prozesses wurde die Modellierung des automatisierten Prozesses in Abbildung 7.2 (b) um die Ebene des Assistenzsystems ergänzt. Diese repräsentiert das im Rahmen der Automatisierung kreierte IuK-System. Dies fungiert als Schnittstelle zwischen allen am Prozess beteiligten Entitäten. Der Vergleich einzelner Tätigkeiten verdeutlicht die Auswirkungen der Automatisierung auf die Prozessdurchführung.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 7.5.: Zentrale Benutzeroberfläche des LuK-Systems: (a) Visualisierung der Reihenfolge notwendiger Bearbeitungspositionen; (b) Wissensbereitstellung zur Bauteilpositionierung; (c) Verwaltung der Adaptionsvorrichtungen in einer Betriebsmitteldatenbank

Während beim herkömmlichen Strahlprozess mit Roboter alle Tätigkeiten, mit Ausnahme der automatisierten Bearbeitung, dem Facharbeiter obliegen, der in der Schnittstelle zwischen den Ressourcen agieren muss, wird dieser durch das Assistenzsystem beim automatisierten Prozess erkennbar unterstützt und entlastet. Einzelne Tätigkeiten können gänzlich dem Assistenzsystem übertragen werden. Dazu zählt die Prüfung der Positionierung, der Start des korrekten Roboterprogramms oder die Entscheidung, ob weitere Programme auszuführen oder Umpositionierungen vorzunehmen sind. Bei allen übrigen Arbeitsschritten wird der Facharbeiter durch die kontextspezifische Bereitstellung von Informationen unterstützt und anhand einer definierten Ablauffolge durch den Instandhaltungsprozess geleitet. Folgend gilt es nun, die Auswirkungen dieser unterstützten Prozessdurchführung auf die Effizienz des robotergestützten Strahlprozesses zu untersuchen.

7.2. Experimentelle Validierung

Die prototypische Realisierung des auf den Strahlprozess adaptierten Informations- und Kommunikationssystems ermöglicht die Stützung der Hypothese dieser Arbeit. Zur fundierten und umfassenden Auswertung wurde die Entwicklung bis auf den Technologiereifegrad TRL 7 durchgeführt. Damit werden, vor allem im Bereich der Luft- und Raumfahrt, Prototypen bezeichnet, die 1-5 Jahre in der Einsatzumgebung verwendet werden [DIN14e][#]. Anhand von Versuchen sollen die mit der Anwendung des Automatisierungskonzeptes einhergehenden Effizienzsteigerungen gemessen und bewertet werden. Nach der DIN EN ISO 9000 [DIN14d][#] wird Effizienz definiert als das „Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen“ [DIN14d, S.31][#]. Der Aufbau der Versuche orientiert sich an der Art der zu evaluierenden Effizienzsteigerungen. Sie setzen sich zusammen aus

- der Minimierung der Prozessdurchführungszeit,
- der Fehlervermeidung und
- der Erhöhung der Flexibilität.

Die Minimierung der Prozessdurchführungszeit soll vor allem durch die kontextspezifische Wiederverwendung von Wissen und die Standardisierung von Arbeitsschritten erzielt werden. Die größten Potenziale wurden für die Rüstzeitminimierung im Teilprozess *Spannen und Ausrichten* identifiziert. Folglich ist dieser Kern der Versuche. Darüber hinaus wird auch die Auswirkung der Optimierung auf die Bearbeitungszeiten der weiteren manuellen Tätigkeiten des Prozesses untersucht. Vor allem aus dem Leiten des Facharbeiters durch den Prozess und der Verwendung einer zentralen, standardisierten Benutzerschnittstelle sollen hier Effizienzsteigerungen erzielt werden.

Eine weitere Form der Effizienzsteigerung soll durch die Fehlervermeidung erzielt werden. Bezogen auf diesen Aspekt wurden im Rahmen dieser Arbeit vor allem der Übergang zwischen einer manuellen Bauteilpositionierung und der automatisierten Bearbeitung identifiziert, bei dem der Facharbeiter eine kritische Schnittstelle darstellt. Daher wurde zur Fehlerminimierung des Strahlprozesses, neben der informationsgestützten Durchführung der manuellen Tätigkeiten, ein System integriert, das eine Verifikation der Bauteilpositionierung durchführt und die kritische Schnittstelle absichern kann. Anhand einer Auswer-

tung von Produktionsdaten aus dem Einsatz des Prototypen soll die damit einhergehende Fehlerminimierung aufgezeigt werden.

Ein weiterer Aspekt des Automatisierungsansatzes, durch den ebenfalls Effizienzsteigerungen erzielt werden sollen, ist die Durchführbarkeit des Prozesses durch prozessfremde und niedrig qualifizierte Facharbeiter. Da dadurch eine deutlich größere Menge an Facharbeitern für dessen Durchführung herangezogen werden kann, wird die Flexibilität des Prozesses erhöht. Entscheidend für diesen Aspekt ist, dass die Prozessdurchführung mit Unterstützung des Assistenzsystems auch für gering qualifizierte Facharbeiter möglich ist. Dies soll daher Gegenstand der Versuche sein.

7.2.1. Experimenteller Aufbau

Für die Darstellung des experimentellen Aufbaus müssen die einbezogenen Anwender und Bauteile, die Art der Prozessdurchführung und die dazu verwendeten Ressourcen betrachtet werden. Des Weiteren werden in diesem Abschnitt die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Versuche sowie die Klassifikation von Fehlern vorgestellt.

Anwender Die ausgewählten Anwender für die Versuche werden nach Tabelle 7.2 in drei Klassen eingeordnet und hinsichtlich ihres Qualifikations- und Spezialisierungsgrads nach Abschnitt 2.2.6 differenziert. Facharbeiter der Klasse *Einrichter* weisen eine hohe Spezialisierung in Bezug auf die Prozessausführung sowie die Bedienung und Programmierung des Strahlroboters auf. Die Facharbeiter der Klasse *erfahrene Bediener* sind durch eine hohe Erfahrung bezüglich der klassischen, manuellen Durchführung des Strahlprozesses charakterisiert. Im Gegensatz zu Einrichtern verfügen sie über keine Kenntnisse im Hinblick auf die Verwendung des Strahlroboters. Ihre Spezialisierung soll daher – bezogen auf die robotergestützte Prozessdurchführung – als mittel klassifiziert werden. Zur letzten Klasse der prozessfremden Bediener zählen Anwender, die zwar über Erfahrung in der Handhabung von Flugzeuggroßbauteilen und der Ausführung anderweitiger Instandhaltungsprozesse verfügen, den Strahlprozess aber bislang nicht ausgeführt haben.

Bauteile Zur Durchführung der Versuche wurden acht verschiedene Bauteile der Fahrwerke des Herstellers Messier-Dowty verwendet. Deren Dimensionen zeigt Tabelle A.1. Abhängig von ihrer Dimension und der Komplexität ihrer Geometrie wurden sie in drei Komplexitätsklassen eingeteilt. Die Skizze eines Vertreters jeder Klasse zeigt Abbildung 7.6. In

Tabelle 7.2.: Differenzierung der Anwendertypen in drei Klassen

	Einrichter	erfahrene Bediener	prozessfremde Bediener
Prozesserfahrung	hoch	mittel	keine
Spezialisierungsgrad	hoch	mittel	keiner
Qualifikationsgrad	gelernt/ angelern	angelern	ungelernt

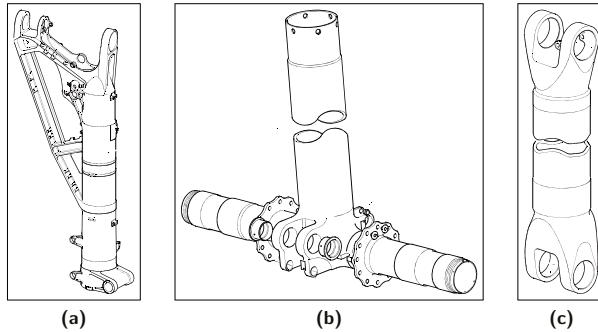


Abbildung 7.6.: Repräsentative Fahrwerksbauteile des Herstellers Messier-Dowty [MD02] für die vorgenommene Klassifikation: (a) hohe Komplexität: A340 MLG Main Fitting ; (b) mittlere Komplexität: A320 MLG Sliding Tube; (c) niedrige Komplexität: A340 MLG Side Stay Lower

den durchgeführten Versuchen wurden jeweils drei Bauteile (1-3) hoher und mittlerer (4-6) und zwei Bauteile (7-8) niedriger Komplexität berücksichtigt.

Betriebsmittel und Informationsbereitstellung Als Betriebsmittel zur Prozessdurchführung stehen einem Facharbeiter die Bauteilaufnahme mit Adaptionsvorrichtungen nach Abschnitt 4.3 und ein Laserdistanzmessgerät zur Verfügung. Die Bereitstellung von Informationen nach Tabelle 7.3 erfolgt entweder in Form händisch erstellter Notizen oder durch das Assistenzsystem.

Eingangs- und Ausgangsgrößen Die Eingangsgrößen der durchgeführten Versuche sind die zu bearbeitenden Bauteile nach Tabelle A.1, die Klassifikation des ausführenden Facharbeiters nach Tabelle 7.2 und die Vorgaben zur Bearbeitung eines Bauteils gemäß Tabelle 7.3. Als Ausgangsgrößen werden die Bearbeitungszeiten der einzelnen Tätigkeiten des Strahlprozesses betrachtet.

Darüber hinaus wird für die Untersuchung der Fehlervermeidung durch das Bildverarbeitungssystem eine Auswertung über einen Produktionszeitraum von zwei Monaten herangezogen. Für diese werden alle Positionierungen der mit Unterstützung des Assistenzsystems bearbeiteten Bauteile berücksichtigt. Sie erfolgt sowohl durch Einrichter als auch durch erfahrene Bediener. Die Verifikation einer Positionierung wird erst durchgeführt, wenn der Facharbeiter angibt, das Bauteil korrekt positioniert zu haben. Das jeweilige Ergebnis des Bildverarbeitungssystems und die abschließende Klassifikation der Positionierung durch den Facharbeiter stellen die Ausgangsgrößen dar.

7.2.2. Durchführung

Für die Durchführung der Versuche wird der Strahlprozess in der Produktionsumgebung durch vier verschiedene Facharbeiter ausgeführt, zwei Einrichter und zwei erfahrene Bediener. Diese bearbeiten alle acht Bauteile auf herkömmliche Art unter Verwendung des Strahlroboters und mit Unterstützung des Assistenzsystems.

Tabelle 7.3.: Informationsbereitstellung für die manuell auszuführenden Tätigkeiten

Tätigkeit	Informationsbereitstellung und Hilfsmittel	
	ohne Automatisierung	mit Automatisierung
Strukturierung der Bearbeitung	Suche im Ordner nach Papierdokumentationen	Vorgabe durch Assistenzsystem
Vorrichtungsaufbau und Bauteilpositionierung	Händisch notierte Abstände von Bauteilkanten zu Wänden der Strahlkabine	Visualisierte Parameter von Bauteilaufnahme und Vorrichtungen, Bilder der Soll-Positionierung
Manuelle Prüfung der Bauteilpositionierung	Prüfung aller Abstände mittels Laserdistanzmessgerät	Prüfung von Bauteilaufnahme und Adaptionsvorrichtungen anhand der Kodifizierung
Auswahl und Start eines Roboterprogramms	Suche im HMI des Roboters nach Programmen	Vorgabe durch Assistenzsystem
An- und Abmelden der Bearbeitung	HMI des MES-Systems	Assistenzsystem

Des Weiteren wird der Strahlprozess für alle acht betrachteten Bauteile jeweils durch zwei prozessfremde Bediener nach Tabelle 7.2 durchgeführt. Sie erhalten im Vorfeld eine Einführung in den Prozess und die Betriebsmittel und können für dessen Ausführung auf das Assistenzsystem zurückgreifen.

7.2.3. Auswertung

Die Auswertung der Versuche erfolgt hinsichtlich der drei verschiedenen zu evaluierenden Effizienzsteigerungen.

Minimierung der Prozessdurchführungszeit Für die Evaluation der Minimierung der Prozessdurchführungszeit wurden, neben den manuell auszuführenden Arbeitsschritten des Strahlprozesses nach Abbildung 7.1, auch die strukturierenden und organisierenden Tätigkeiten ausgewertet und in der Darstellung als *Strukturierung der Bearbeitung* zusammengefasst. Dieser Schritt beinhaltet das Sammeln von Bearbeitungsvorgaben und die Strukturierung der daran anschließenden Bauteilbearbeitung. Abbildung 7.7 fasst alle für die Auswertung der Versuche betrachteten manuellen Tätigkeiten des Strahlprozesses zusammen. Sie werden unterschieden zwischen Tätigkeiten, deren Einfluss auf die Prozessdauer abhängig von den Charakteristiken und dem Zustand der zu bearbeitenden Bauteile ist, und solchen, deren Einfluss davon unabhängig ist. Auf diese Weise können die Versuchsdaten differenziert ausgewertet werden.

Die Tätigkeiten, deren Einfluss auf die Prozessdauer bauteilunabhängig ist, erstrecken sich über den gesamten Instandhaltungsprozess. Gegenstand dieser sind sowohl strukturieren-

Tätigkeiten	ARBEITSVORBEREITUNG		SPANNEN UND AUSRICHTEN			STRAHLEN		A. NACHBER
	Bearbeitung anmelden	Bearbeitung strukturieren	Vorrichtung aufbauen	Bauteil positionieren	Positionierung man. prüfen	Programm wählen	Programm wählen	Bearbeitung abmelden

Abbildung 7.7.: Manuell auszuführende Tätigkeiten des Strahlprozesses mit ihrem Einfluss auf die Prozessdurchführungszeit; grau:bauteilunabhängig, weiß:bauteilabhängig

de und organisierende Maßnahmen, als auch Interaktionen mit Ressourcen, wie einem System auf MES-Ebene oder dem Strahlroboter. Die Messwerte dieser geben folglich Aufschluss über die Effizienzsteigerungen, die aus der durchgehenden Formalisierung und Informatisierung des Prozesses resultieren. Dazu zählen die Strukturierung organisatorischer Arbeitsabläufe, das Leiten des Facharbeiters durch den Instandhaltungsprozess und die Homogenisierung der Interaktionen mittels der zentralen Benutzerschnittstelle.

Die Auswertung der Ausgangsgrößen der Versuche für die bauteilunabhängigen, manuellen Tätigkeiten zeigt Abbildung 7.8. Dargestellt sind für jede dieser sechs Tätigkeiten i die über alle Versuche v gemittelten Durchführungzeiten

$$\bar{t}_i = \frac{1}{32} \sum_{v=1}^{32} t_{v,i}$$

mit \bar{t}_i^* und ohne \bar{t}_i Berücksichtigung des Assistenzsystems. Die Verwendung der zentralen Benutzerschnittstelle zur Interaktion mit weiteren Ressourcen führt mindestens zu einer Halbierung der Durchführungszeit der manuellen Tätigkeiten. Dies belegen die Messwerte sowohl für die Interaktionen mit dem System auf MES-Ebene zur An- und Abmeldung der Bearbeitung, als auch mit dem Strahlroboter zum Starten eines Bearbeitungsprogramms. Weitaus größere Effizienzsteigerungen resultieren aus der Anwendung des Automatisierungsansatzes für die organisierenden und strukturierenden Tätigkeiten. Während die Facharbeiter für die Suche der Bearbeitungsvorgaben und die Strukturierung der Prozessdurchführung ohne Unterstützung im Mittel knapp zwei Minuten benötigen, kann diese Zeit bei Verwendung des Assistenzsystems fast auf ein Fünftel reduziert werden. Auch für diejenigen Arbeitsschritte, bei denen durch Anwendung des Automatisierungsansatzes sowohl die Interaktion mit Ressourcen als auch die Wissensbereitstellung optimiert wurde, zeigen die Messwerte Effizienzsteigerungen in signifikanter Größenordnung auf. So kann durch Informatisierung der Bauteilpositionierung die Dauer der manuellen Prüfung gegenüber der klassischen Vorgehensweise ohne Unterstützung mehr als halbiert werden. Die Suche eines Bearbeitungsprogramms im proprietären HMI des Roboterherstellers entfällt durch die Verwendung der zentralen Benutzerschnittstelle in Gänze.

Die Summe der mittleren Prozessdurchführungszeiten aller bauteilunabhängigen Tätigkeiten

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^6 \bar{t}_i$$

wird von $\bar{t}=06:07$ min auf $\bar{t}^*=01:43$ min minimiert. Die Summe der Prozessdurchführungszeiten aller bauteilunabhängigen Tätigkeiten der Versuche weisen eine Standardabweichung

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{32} \sum_{v=1}^{32} \left(\bar{t} - \sum_{i=1}^6 t_{v,i} \right)^2}$$

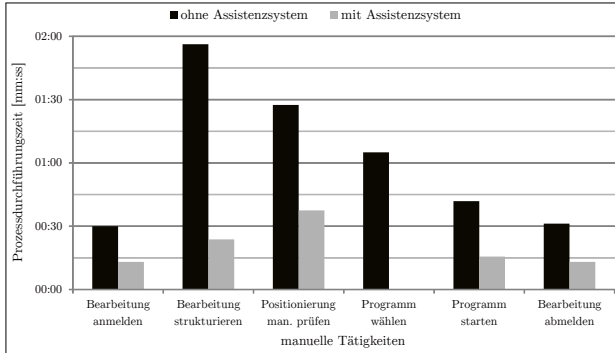


Abbildung 7.8.: Prozessdurchführungszeiten der Versuche für die manuell auszuführenden, bauteilunabhängigen Tätigkeiten des Strahlprozesses

von $\sigma=00:48$ min beziehungsweise $\sigma^*=00:26$ min auf. Insgesamt kann für die bauteilunabhängigen Tätigkeiten eine Effizienzsteigerung von 72% erzielt werden.

Die Tätigkeiten des Strahlprozesses mit bauteilabhängigem Einfluss auf die Prozessdurchführungszeit konzentrieren sich auf den Teilprozess *Spannen und Ausrichten*. Im Rahmen dessen Automatisierung wurden der *Aufbau einer Vorrichtung* zur Bauteilaufnahme und die *Positionierung eines Bauteils* durch die systematische Wiederverwendung des Prozesswissens optimiert. Die Ausgangsgrößen der durchgeführten Versuche geben folglich Aufschluss über die Effizienzsteigerungen, die sich aus der Prozessoptimierung durch Wiederverwendung ergeben.

Die Auswertung der Messdaten der Versuche für die Bauteilpositionierung mit Vorrichtungsaufbau ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Die Abbildungen 7.9 (a) und 7.9 (b) zeigen für alle acht betrachteten Bauteile i die mittleren Prozessdurchführungszeiten

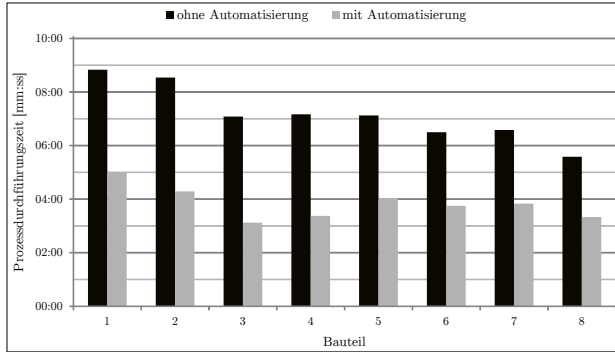
$$\bar{t}_i^k = \frac{1}{2} \sum_{v=1}^2 t_{v,i}^k$$

mit \bar{t}_i^{k*} und ohne \bar{t}_i^k Automatisierung für Einrichter und erfahrene Bediener der Benutzerklassen k , mit

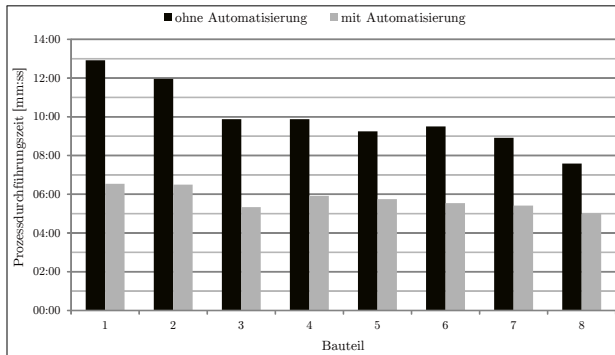
$$k := \begin{cases} e, & \text{wenn Einrichter} \\ b, & \text{wenn erfahrener Bediener} \end{cases}$$

Die Daten zeigen, dass für alle bearbeiteten Bauteile die Durchführungszeiten durch die Automatisierung um mehr als 40% reduziert werden – unabhängig von der Klassifikation des Benutzers. Die Prozessoptimierung durch Wiederverwendung führt somit auch für die bauteilabhängigen Tätigkeiten des Strahlprozesses zu signifikanten Effizienzsteigerungen.

Des Weiteren ist bei Betrachtung der visualisierten Messwerte erkennbar, dass die Prozessoptimierung durch Wiederverwendung nicht nur zu einer Verkürzung der einzelnen Zeiten, sondern auch zu einer deutlichen Minimierung deren Schwankungen führt. Die Standard-



(a)



(b)

Abbildung 7.9.: Prozessdurchführungszeiten der Versuche für den Vorrichtungsaufbau und die Bauteilpositionierung: (a) Prozessdurchführung durch Einrichter; (b) Prozessdurchführung durch erfahrene Bediener

abweichungen

$$\sigma^k = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (\bar{t}^k - \bar{t}_i^k)^2}$$

der gemittelten Messwerte einer Benutzerklasse über alle Bauteile

$$\bar{t}^k = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (\bar{t}_i^k)$$

bestätigen diesen Eindruck für die Daten beider Benutzerklassen. Für die der Einrichter verringert sich die Standardabweichung durch die Automatisierung von $\sigma^e=01:01$ min auf $\sigma^{e*}=00:34$ min, für die der erfahrenen Bediener von $\sigma^b=01:34$ min auf $\sigma^{b*}=00:31$ min. Folglich reduziert die Automatisierung auch den Einfluss der Komplexität eines Bauteils auf

die Prozessdurchführung und trägt so zu einer besseren Planbarkeit des Strahlprozesses bei.

Fehlervermeidung Zur Fehlervermeidung wurde sowohl die Komplexität des als kritisch klassifizierten Teilprozesses *Spannen und Ausrichten* reduziert, als auch ein System zur Absicherung der Interaktionen des Facharbeiters, der als kritische Schnittstelle agiert, in die Werkstattfertigungsumgebung integriert. Dadurch sollen zufällige, unbeabsichtigte Fehler in Form einer fehlerhaften Bauteilpositionierung detektiert werden. Zur Evaluation des Bildverarbeitungssystems und der damit zu erzielenden Fehlerminimierung werden die Produktionsdaten über einen Zeitraum von zwei Monaten betrachtet. Unter Verwendung des Prototypen wurden in dieser Phase 16 verschiedene Bauteile in insgesamt 74 Positionierungen entschichtet. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt Tabelle 7.4. Dargestellt sind die Anteile korrekter und nicht korrekter manueller Positionierungen des Bauteils und das Ergebnis deren Verifikation. Dies ist hierbei nach Abschnitt 5.3 in drei Bereiche unterteilt: die korrekte und die nicht korrekte Verifikation einer Positionierung sowie die erneut zu prüfende Positionierung.

Von allen überprüften Positionierungen werden in der Summe 89,2% richtig klassifiziert, die sich aus 85,1% korrekt und 4,1% nicht korrekt positionierten Bauteilen zusammensetzen. Bei 8,2% aller Verifikationen ist eine erneute manuelle Prüfung durch den Anwender erforderlich. In den Versuchen hat sich gezeigt, dass die wiederholte Verifikation, die bedingt ist durch eine erneute manuelle Prüfung und entsprechende Korrektur, zu einer richtigen Klassifikation führt. Lediglich für zwei Positionierungen erfolgte die falsche Klassifikation einer korrekten Positionierung, die jedoch keine negativen Auswirkungen hat. Die Anforderung an das System ist nicht die Durchführung einer 100%-Kontrolle, sondern die Unterstützung des Facharbeiters zur Fehlerminimierung. Im Kontext dieser Anforderung und der Rahmenbedingungen stellen eine falsche Klassifikation von weniger als 3% aller korrekten Positionierungen ein gutes Ergebnis dar.

Entscheidend für die Absicherung der kritischen Schnittstelle durch das Bildverarbeitungssystem ist, dass keine nicht korrekte Positionierung als korrekt verifiziert wird. Dieser Fehler kann definiert werden als

$$\varepsilon = \frac{\sum \text{korrekte Verifikation nicht korrekter Positionierungen}}{\sum \text{nicht korrekte Positionierungen}}$$

und bewertet den Fehler seitens des Facharbeiters, der zu einer Kollision führen würde. Diesen gilt es in diesem Kontext zu minimieren. Die Messwerte zeigen, dass über den betrachteten Zeitraum 4 Positionierungen fehlerhaft durchgeführt wurden. Sie hätten bei der nicht-automatisierten Prozessdurchführung zu einer Kollision von Strahlroboter und Bauteil oder Bauteilaufnahme geführt. Daraus folgt für den Fehler

$$\varepsilon = \frac{4}{4} = 100\%.$$

Im Falle der Automatisierung wurden alle Fehler durch das Bildverarbeitungssystem identifiziert mit

$$\varepsilon^* = \frac{0}{4} = 0\%.$$

Tabelle 7.4.: Auswertung der Verifikation von Bauteilpositionierungen

Verifikation der Positionierung	Bauteilpositionierung		Σ
	korrekt	nicht korrekt	
korrekt	85,1% (63)	0% (0)	85,1% (63)
prüfen	6,8% (5)	1,4% (1)	8,2% (6)
nicht korrekt	2,7% (2)	4,1% (3)	6,8% (5)
Σ	94,6% (70)	5,4% (4)	

Durch die Integration des Bildverarbeitungssystems in den Strahlprozess können somit zufällige, unbeabsichtigte Fehler zuverlässig detektiert und Auswirkungen dieser verhindert werden. Dieser Aspekt des Automatisierungsansatzes führt daher zu einer Effizienzsteigerung durch eine signifikante Fehlervermeidung.

Erhöhung der Flexibilität Zur Evaluation der mit der Automatisierung des Strahlprozesses einhergehenden Erhöhung der Flexibilität gilt es, die Durchführbarkeit des Strahlprozesses durch prozessfremde und gering qualifizierte Facharbeiter zu untersuchen. Dazu wurden in Versuchen die bauteilabhängigen Tätigkeiten für alle acht betrachteten Bauteile von zwei gering qualifizierten, prozessfremden Facharbeitern durchgeführt. Abbildung 7.10 zeigt deren gemittelte Prozessdurchführungszeiten, die denen der Einrichter und der erfahrenen Bedienern gegenübergestellt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass Einrichter gegenüber den Benutzern der beiden anderen Klassen im Mittel deutlich schneller bei der Prozessdurchführung sind. Ihre Zeit ist etwa 33% geringer als die der erfahrenen und 40% geringer als die der prozessfremden Bediener. Die Unterschiede zwischen den Klassen der Bediener fallen deutlich geringer aus. Im Mittel sind erfahrene Bediener lediglich um knapp 9% schneller gegenüber den prozessfremden. Die Zeiten der prozessfremden Bediener unterliegen mit einer Standardabweichung $\sigma^{f*}=00:48$ min größeren Schwankungen gegenüber den erfahrenen mit $\sigma^{b*}=00:31$ min und den Einrichtern mit $\sigma^{e*}=00:34$ min.

Die Versuche zeigen, dass die Automatisierung auch gering qualifizierten, prozessfremden Facharbeitern ermöglicht, den Strahlprozess – nach einer Einweisung – eigenständig durchzuführen. Dies kann für die Unternehmen nicht nur mit einer Kostenreduktion verbunden sein, sondern führt für sie zu einem Zuwachs an Flexibilität bei der Planung und Durchführung der Prozesse. Für diese kann auf eine deutlich größere Anzahl geeigneter Facharbeiter zurückgegriffen werden, als bei der Durchführbarkeit ausschließlich durch Einrichter. Des Weiteren kann bei Engpässen auch auf prozessfremdes Personal zurückgegriffen werden. Auch für die zukünftige Gestaltung der Instandhaltung spielt die Erhöhung der Flexibilität eine wichtige Rolle. Auf diese Weise könnten zukünftig auch mehrere zusammenhängende Prozesse durch ein und denselben Facharbeiter ausgeführt werden.

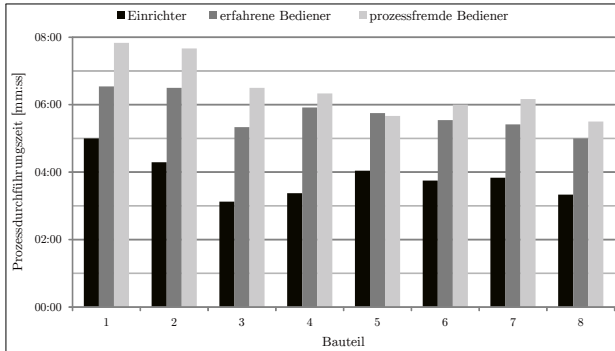


Abbildung 7.10.: Bearbeitungszeiten für die automatisierte Positionierung von acht Bauteilen durch Facharbeiter der drei Benutzerklassen

7.3. Übertragung des Ansatzes auf einen zerspanenden Instandhaltungsprozess

Mit der Übertragung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Automatisierungskonzeptes auf einen weiteren Prozess soll die flexible Anwendbarkeit aufgezeigt werden. Dazu wird der in den Unterkapiteln 2.5 und 3.1 analysierte und modellierte Instandhaltungsprozess herangezogen. Gegenstand ist die Reparatur lokaler Beschädigungen in den Bohrungen und deren Planflächen von Fahrwerksbauteilen mittels einer CNC-Fräsmaschine. Nachfolgend wird eine Automatisierung entworfen, die abschließend anhand einer Simulation validiert wird.

7.3.1. Entwurf einer Automatisierung

Analog zur Automatisierung des Strahlprozesses müssen für die der Fräsbearbeitung die einzelnen Komponenten des Automatisierungsansatzes auf deren Anforderungen und Rahmenbedingungen adaptiert und ihre Informatisierung konzipiert werden.

Prozessoptimierung durch Wiederverwendung Im Gegensatz zur berührungslosen Oberflächenbearbeitung erfordert die Ausarbeitung lokaler Beschädigungen an den Bohrungen eines Bauteils eine weitaus größere Anzahl unterschiedlicher Positionierungen. Damit verbunden sind eine hohe Prozesskomplexität, ein großer Bedarf an Prozesswissen und ein hohes Potenzial für zufällige, unbeabsichtigte Fehler. Der Einsatz von Baukastenvorrichtungen nach dem T-Nutsystem stellt eine geeignetes Hilfsmittel zur Komplexitätsreduktion unter Beibehaltung der Flexibilität dar. Gleichzeitig bietet dieser eine adäquate Grundlage für eine Informatisierung. Für diese gilt es im ersten Schritt, alle Betriebsmittel mit einer eindeutigen Identifikationsnummer zu versehen. Zur kontextspezifischen Explizierung des Wissens für die Bauteilpositionierung müssen sowohl die zu verwendenden Vorrichtungselemente und deren Anordnung als auch das Ausrichten des Bauteils informatisiert werden. Dies kann für erstgenannte Informationen mittels der Identifikationsnummer, der Angabe

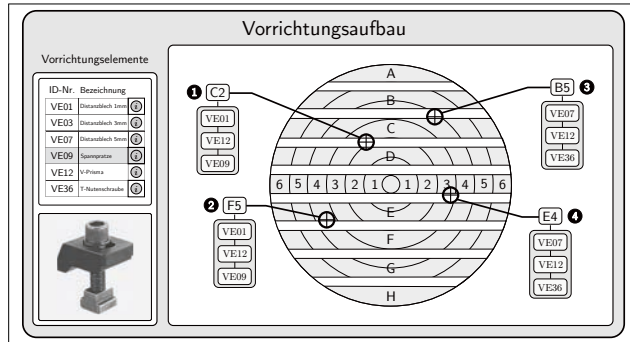


Abbildung 7.11.: Entwurf einer Informatisierung des Teilprozesses *Spannen und Ausrichten*

der Schnittstelle in Form einer T-Nut des Maschinentisches und der Angabe einer Koordinate des Tisch-Koordinatensystems erfolgen. Den Entwurf einer Informatisierung zeigt Abbildung 7.11. Die Bauteilausrichtung kann durch Anschläge, deren Auswahl und Position nach vorherigem Entwurf spezifiziert wird, und durch Bilddaten informatisiert werden.

Fehlervermeidung Analog zum Strahlprozess birgt der Übergang zwischen der manuellen Bauteilpositionierung und der automatisierten Bearbeitung auch beim Fräsprozess ein hohes Potenzial für das Auftreten zufälliger, unbeabsichtigter Fehler. Die eingesetzten CNC-Fräsmaschinen messen vor dem Zerspanen, anhand eines automatischen Tastzyklus, die exakte Bauteilpositionierung, um das Bearbeitungsprogramm daran zu adaptieren. Für eine Fehlerminimierung muss diese daher nicht im Submillimeterbereich verifiziert werden. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass es beim Tastzyklus nicht zu Kollisionen zwischen Maschine und Bauteil oder Betriebsmitteln kommt. Des Weiteren muss gewährleistet werden, dass sich die zu bearbeitende Region vollständig im Arbeitsraum der Maschine befindet. Für diese Aufgaben kann das in Abschnitt 5.3 entworfene Bildverarbeitungssystem mit dem in [SEF14]⁴ entwickelten Algorithmus herangezogen werden.

Informatisierung Im Gegensatz zur Informatisierung der Oberflächenentschichtung, deren Ablauf entsprechend der Positionierungen strukturiert werden kann, muss die Strukturierung des Fräsprozesses hinsichtlich der zu bearbeitenden lokalen Regionen erfolgen. Dazu stellt die Visualisierung der Zeichnung eines Bauteils nach Abbildung 7.12, in der alle bearbeitbaren Regionen flexibel markiert werden können, eine geeignete Lösung dar. Einer Region können im HMI des Assistenzsystems die entsprechenden Programme für Tastzyklus und Zerspanung aus der CNC-Steuerung, Prozesswissen zur Positionierung und Daten für deren Verifikation zugeordnet werden.

Für die Durchführung kann der Facharbeiter die zu bearbeitende Region wählen und die definierten Parameter der Tast- und Bearbeitungsprogramme über die Eingabemaske spezifizieren. Anschließend wird er durch den Teilprozess der Bauteilpositionierung geleitet. Nach deren automatischer Prüfung kann die automatisierte Bearbeitung gestartet werden.

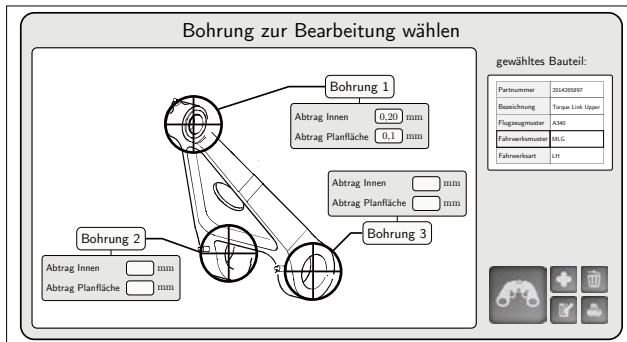


Abbildung 7.12.: Entwurf einer Informatisierung der Zerspanung von Bohrungen eines Bauteils

7.3.2. Simulation

Anhand einer Simulation sollen die mit der Automatisierung des zerspanenden Instandhaltungsprozesses einhergehenden Effizienzsteigerungen evaluiert und das Konzept validiert werden. Dabei kann auf die Ergebnisse des vorhergehenden Fallbeispiels zurückgegriffen werden, dessen Lösungskomponenten auf das hier betrachtete übertragen wurden.

In Bezug auf die Effizienzsteigerungen durch die Minimierung der Prozessdurchführungszeit können auch für dieses Fallbeispiel die Tätigkeiten zwischen bauteilunabhängigen und -abhängigen unterschieden werden. Die erstgenannten gleichen denen des Strahlprozesses, sodass die Ergebnisse seiner experimentellen Validierung nach Abschnitt 7.2.3 auch für den hier betrachteten Prozess Gültigkeit besitzen.

Die bauteilabhängigen Tätigkeiten des Teilprozesses *Spannen und Ausrichten* beider Fallbeispiele unterscheiden sich jedoch, ebenso wie die dazu eingesetzten Betriebsmittel und die Informatisierung. Daher wurden anhand eines weiteren Experiments, analog zu Unterkapitel 7.2, diese Tätigkeiten auf ihre Effizienzsteigerungen hin untersucht. Gegenstand ist die Messung der Prozessdurchführungszeit für die Bauteilpositionierung mit und ohne Automatisierung. Dazu wurden vier Bauteile gemäß Tabelle A.2 durch zwei Facharbeiter der Klasse *Einrichter* positioniert. Die Automatisierung dieses Teilprozesses wurde entsprechend des Entwurfs in Abbildung 7.11 durch einen Demonstrator mit dem Technologie-Reifegrad TRL 5 realisiert. Er bezeichnet einen Versuchsaufbau in der Einsatzumgebung [DIN14][#]. Die Auswertung der Messdaten ist in Abbildung 7.13 dargestellt. Sie zeigt, dass für alle positionierten Bauteile die Durchführungszeiten durch die Automatisierung im Mittel um 48% minimiert werden. Auch deren Schwankung wird durch die Automatisierung reduziert. Die Standardabweichung der Durchführung ohne Automatisierung beträgt $\sigma^e=00:36$ min, die der automatisierten Durchführung $\sigma^{e*}=00:23$ min. Die Ergebnisse stützen die der Versuche des ersten Fallbeispiels und damit die Validierung des Konzeptes dieser Arbeit. Sie zeigen, dass sich mit der Übertragung des Automatisierungskonzeptes auf weitere Instandhaltungsprozesse Effizienzsteigerungen in signifikanter Größenordnung erzielen lassen.

Sowohl die Integration des Bildverarbeitungssystems zur Fehlervermeidung als auch die

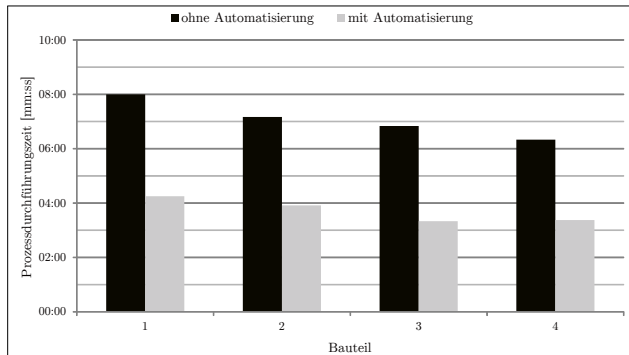


Abbildung 7.13.: Prozessdurchführungszeiten der Versuche für den Vorrichtungsaufbau und die Bauteilpositionierung

Durchführbarkeit des automatisierten Prozesses durch gering qualifiziertes und prozessfremdes Personal gleichen dem ersten Fallbeispiel. Daher kann für die Effizienzsteigerungen durch Fehlervermeidung und die Erhöhung der Flexibilität auf die Ergebnisse aus 7.2.3 verwiesen werden.

Das hier betrachtete Fallbeispiel zur Reparatur von Flugzeugbauteilen stellt darüber hinaus ein Beispiel für einen Prozess dar, der zukünftig durch einen prozessfremden Facharbeiter durchgeführt werden könnte. Prädestiniert dafür wäre ein Facharbeiter der Befundung. Das Automatisierungskonzept ermöglicht es ihm, die auf dem Befund basierende Reparatur, in Form der automatisierten Zerspanung, eigenständig durchzuführen.

7.4. Zusammenfassung

In diesem Kapitel erfolgte die Validierung des Automatisierungskonzeptes anhand eines Fallbeispiels. Dazu wurde dessen Anwendung auf einen berührungslosen Instandhaltungsprozess aufgezeigt. Zur Validierung wurden Experimente in der Produktionsumgebung mit acht betrachteten Bauteilen und einer Menge von Anwendern verschiedener Benutzerklassen entworfen. Die damit gewonnenen Messdaten wurden hinsichtlich Effizienzsteigerungen ausgewertet. Auf diese Weise konnte fundiert belegt werden, dass sich sowohl für alle Tätigkeiten des Fallbeispiels als auch durch alle Lösungskomponenten des Automatisierungskonzeptes Effizienzsteigerungen in signifikanter Größenordnung erzielen lassen. Sie ergeben sich aus der Minimierung der Prozessdurchführungszeit, der Fehlervermeidung und der Erhöhung der Flexibilität.

Zur Stützung dieser Ergebnisse und zur Validierung der Flexibilität und Übertragbarkeit des Konzeptes wurde ein weiteres Fallbeispiel, in Form eines berührenden Instandhaltungsprozesses, betrachtet. Die durchgeführte Simulation konnte die Ergebnisse des berührungslosen Prozesses bestätigen und die Übertragbarkeit demonstrieren. Die Ergebnisse dieses Kapitels hinsichtlich einer Effizienzsteigerung fassen die Tabellen 7.5 und 7.6 zusammen.

Tabelle 7.5.: Ergebnisse der experimentellen Validierung am Fallbeispiel der Oberflächenentschichtung

Kenngröße	Tätigkeit	Benutzer	Automatisierung		relative Optimierung
			ohne	mit	
mittlere Prozess-durchführungs-zeit \bar{t}	bauteil-unabh.	—	06:07 min	01:43 min	72%
	bauteil-abh.	Einrichter	07:11 min	03:51 min	46%
	bauteil-abh.	Bediener erfahren	09:59 min	05:45 min	42%
	bauteil-abh.	prozess-fremd	—	06:28 min	—
mittlere Standard-abweichung σ^k	bauteil-unabh.	—	00:48 min	00:26 min	45%
	bauteil-abh.	Einrichter	01:00 min	00:34 min	43%
	bauteil-abh.	Bediener erfahren	01:35 min	00:31 min	67%
	bauteil-abh.	prozess-fremd	—	00:48 min	—
Fehler-vermeidung	Verifikation Bauteil-pos.	Einrichter, Bediener erfahren	0%	100%	—

Tabelle 7.6.: Simulationsergebnisse des Fallbeispiels der Zerspansung

Kenngröße	Tätigkeit	Benutzer	Automatisierung		relative Optimierung
			ohne	mit	
mittlere Prozess-durchführungs-zeit \bar{t}	bauteil-abh.	Einrichter	07:05 min	03:43 min	48%
mittlere Standard-abweichung σ^k	bauteil-abh.	Einrichter	00:36 min	00:23 min	36%

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein Gesamtkonzept zur Automatisierung von Instandhaltungsprozessen mit kleinen Losgrößen vorgestellt. Grundlage dafür ist die Beschreibung der Instandhaltung und ihrer Prozesse in der MRO-Luftfahrtbranche. Der Instandhaltungsprozess zur zustandsabhängigen Bearbeitung großer Bauteilspektren ist gekennzeichnet durch eine Einzelfertigung in Losgröße-1. Die auf Prozessebene – mangels digitaler Unterstützung – unsystematisch erfolgende, wiederkehrende Bearbeitung gleicher Bauteile führt zu hohen Bearbeitungszeiten, einer schwierigen Planbarkeit und zu Verschwendung von Ressourcen. Der große Anteil an manuellen Tätigkeiten ist verbunden mit einem erhöhten Potenzial an zufälligen, unbeabsichtigten Fehlern. Aufbauend auf den Defiziten sowie den Anforderungen und Rahmenbedingungen der Prozesse wurden Methodiken entwickelt, die eine Automatisierung der Instandhaltungsprozesse dahingehend ermöglichen, dass diese zu einer Effizienzsteigerung für das MRO-Unternehmen führt.

Das Konzept zur Automatisierung von Instandhaltungsprozessen kleiner Losgrößen greift den Trend in der Automatisierungstechnik nach mehr Flexibilität auf und genügt den unterschiedlichen Ansprüchen der Prozesse. Es schließt eine noch bestehende Lücke zwischen aktueller Forschung und den Bedürfnissen der MRO-Unternehmen. Eine durchgängige, digital unterstützte Prozessdurchführung ermöglicht vor allem die Ausnutzung von Prozess- und Erfahrungswissen für die zustandsabhängige Bearbeitung. Das Konzept setzt sich zusammen aus der Optimierung durch Wiederverwendung, der Absicherung von Schnittstellen mit hohem Fehlerpotenzial und der Informatisierung.

Durch die systematische Wiederverwendung von Prozesswissen und einzelner Arbeitsartefakte erfolgt die Reduzierung von Verschwendung in Teilprozessen. Diese gilt es hierfür flexibel zu standardisieren und zu formalisieren, um das Wissen im Rahmen der Informatisierung bereitzustellen. Eine modulbasierte Entwicklung und die Verwendung einer Bibliothek ermöglichen die systematische Wiederverwendung einzelner Artefakte.

Die Absicherung der kritischen Schnittstelle aller Instandhaltungsprozesse mit mechanischer Bauteilbearbeitung, in Form des Übergangs zwischen manueller Bauteilpositionierung und maschinisierter oder automatisierter Bearbeitung, erfolgt durch ein System zur Verifikation der Bauteilpositionierung. Das Systemkonzept für ein solches setzt sich aus einer 2D-Bildaufnahme mittels Industriekameras und einer Bildverarbeitung zusammen, um den Anforderungen der Prozesse hinsichtlich hoher Robustheit und Zuverlässigkeit, maximaler Flexibilität und einfacher Handhabbarkeit gerecht zu werden.

Die Informatisierung integriert alle Lösungskomponenten der Automatisierung in einem Informations- und Kommunikationssystem auf Prozessebene. Die Bereitstellung einer zentralen, prozessangepassten Benutzerschnittstelle homogenisiert nicht nur die Interaktion mit den weiteren prozessbeteiligten Ressourcen. Sie ermöglicht auch, den Anwender durch den Instandhaltungsprozess zu leiten und ihm kontextspezifisch die für die Durchführung notwendigen Informationen bereitzustellen.

Die Anwendung der Entwürfe der einzelnen Lösungskomponenten konnte anhand von Teilprozessen der Instandhaltung aufgezeigt werden. Sie wurden abschließend zur Validierung

des Konzeptes für zwei Fallbeispiele konkretisiert. Mittels eines Prototypen erfolgte die Automatisierung des ersten in der Produktionsumgebung. Es wurden Experimente entworfen und deren Ergebnisse gemeinsam mit einer Langzeitauswertung evaluiert. Die Resultate belegen, dass sich deutliche Effizienzsteigerungen erzielen lassen. Anhand des zweiten Fallbeispiels wurde die Übertragung und Adaption der Lösungskomponenten aufgezeigt. Die erzielten Ergebnisse konnten durch eine Simulation bestätigt werden. Dazu wurde ein Demonstrator in der Produktionsumgebung herangezogen.

Zusammenfassend führt der Einsatz einer prozessangepassten Automatisierungslösung in Form eines Informations- und Kommunikationssystems, das die gezielte Unterstützung des Facharbeiters durch die systematische Wiederverwendung von Prozesswissen und die Integration eines Systems zur Fehlervermeidung ermöglicht, zu Effizienzsteigerungen von Instandhaltungsprozessen im MRO.

Das Automatisierungskonzept dieser Dissertation folgt dem Trend der Softwareentwicklung hin zur Prozess-Technologie, bei der ein Mehrwert einer Softwarelösung nicht aus deren Funktionsanzahl, sondern der Bereitstellung der richtigen Funktionen am richtigen Ort und zum richtigen Zeitpunkt erzielt werden soll [TKR08]. Das dazu erforderliche hohe Maß an Individualität der Softwarelösung kann dennoch mit einigen Nachteilen verbunden sein. Als wesentliche sind ein hoher finanzieller Aufwand und lange Entwicklungszeiten sowie eine Personengebundenheit durch erforderliche Schulungen und Benutzerdokumentationen zu nennen ([Öst90], [Krc05]). Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen jedoch, dass für die effiziente Automatisierung der Instandhaltungsprozesse die Entwicklung von Individualsoftware unabdingbar ist. Für die effiziente Gestaltung der Entwicklung empfiehlt sich die unternehmensweite Analyse und Abstraktion der Instandhaltungsprozesse. Auf diese Weise können deren Gemeinsamkeiten und die ihrer Anforderungen identifiziert werden. Hierzu eignet sich die Vorgehensweise nach Kapitel 4. Das systematische Vorgehen erlaubt schließlich den unternehmensspezifischen Entwurf generischer Module der einzelnen Lösungskomponenten. Deren Wiederverwendung und Adaption an die unternehmensinternen Prozesse führt zu einer kostengünstigen Anwendbarkeit und Übertragbarkeit des Konzeptes auf weite Teile der Instandhaltung.

Die mit der Automatisierung eines Instandhaltungsprozesses einhergehende Informatisierung auf Prozessebene schafft die Voraussetzungen, um die Instandhaltung in horizontaler und vertikaler Richtung zu vernetzen. Diesbezüglich sind vor allem die Ansätze des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 hinsichtlich einer intelligenten, durchgängigen Datennutzung sowie der weiteren Flexibilisierung und Dezentralisierung der Produktion vielversprechend. Im Rahmen weiterführender Forschungstätigkeiten gilt es daher, deren Übertragung auf die spezifischen Anforderungen der MRO-Branche zu untersuchen und entsprechende Automatisierungsansätze zu entwerfen.

A. Bauteilspezifikation der Validierung

Tabelle A.1.: Bauteile der Versuche des Strahlprozesses in Unterkapitel 7.2

Nr.	Flugzeugtyp	Bauteil	Dimensionen [mm]			Komplexität
			Höhe	Rotations- durchmesser	Ausladung	
1	A340	MLG Main Fitting	3150	2500	1400	hoch
2	A340	MLG Sliding Piston	2410	650	-	hoch
3	A340	NLG Main Fitting	1470	1400	-	hoch
4	A340	MLG Boogie Beam	2250	500	-	mittel
5	A340	NLG Sliding Tube	1650	1000	-	mittel
6	A320	MLG Sliding Tube	1410	1300	-	mittel
7	A340	MLG Axle	1800	160	118	niedrig
8	A320	NLG Turning Tube	940	280	140	niedrig

Tabelle A.2.: Bauteile der Versuche des Strahlprozesses in Unterkapitel 7.3

Nr.	Flugzeugtyp	Bauteil	Dimensionen [mm]			Komplexität
			Höhe	Rotations- durchmesser	Ausladung	
1	A340	Torque Link Upper	800	550	-	hoch
2	A340	Side Stay Lower	1500	180	-	hoch
3	B737	Side Strut Upper	810	120	-	mittel
4	A320	Turning Tube	940	280	140	niedrig

Literaturverzeichnis

Das Literaturverzeichnis enthält nicht vom Verfasser stammende Quellen.
Sie werden mit [<KURZBELEG>] referenziert.

- [ABLB11] AYENI, P. ; BAINES, T. ; LIGHTFOOT, H. ; BALL, P.: State-of-the-art of ‘Lean’ in the aviation maintenance, repair, and overhaul industry. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 225 (2011), Nr. 11, S. 2108–2123
- [ACR04] ALEOTTI, J. ; CASELLI, S. ; REGGIANI, M.: Leveraging on a virtual environment for robot programming by demonstration. In: *Robotics and Autonomous Systems* 47 (2004), Nr. 2, S. 153–161
- [Bal82] BALZERT, H.: Die Entwicklung von Software-Systemen. Prinzipien, Methoden, Sprachen, Werkzeuge. In: *Bibliographisches Institut Mannheim* (1982)
- [Bau14] BAUERNHANSL, T.: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien und Migration*. Springer, 2014
- [BB06] BURGER, W. ; BURGE, M.J.: *Digitale Bildverarbeitung: Eine algorithmische Einführung mit Java*. Springer, 2006
- [BCK+07] BLUTNER, D. ; CRAMER, S. ; KRAUSE, S. ; MÖNKS, T. ; NAGEL, L. ; REINHOLZ, A. ; WITTHAUT, M.: Assistenzsysteme für die Entscheidungsunterstützung. Endbericht der Arbeitsgruppe 5 / TU Dortmund. 2007. – Technical Report SFB 559 (Modellierung großer Netze der Logistik)
- [Bec05] BECKER, T.: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Springer, 2005
- [Bec06] BECKER, H.: *Phänomen Toyota: Erfolgsfaktor Ethik*. Springer, 2006
- [BEC09] BEELAERTS VAN BLOKLAND, W. ; ELFERINK, N.H. ; CURRAN, R.: Measuring Value Creation; A Case Study in the MRO Business. In: *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO)* (2009), September
- [BKR12] BECKER, J. ; KUGELER, M. ; ROSEMAN, M.: *Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung*. Springer, 2012
- [BLF12] BEYERER, Jürgen ; LEÓN, Fernando P. ; FRESE, Christian: *Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. Springer, 2012

- [BM92] BESL, P.J. ; MCKAY, N.D.: A method for registration of 3-D shapes. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 14 (1992), Nr. 2, S. 239–256
- [Boe07] BOEHNKE, K.: Object localization in range data for robotic bin picking. In: *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering 2007* IEEE, 2007, S. 572–577
- [Bre11] BREHMEIER, R.: *Entwicklung und Umsetzung einer multifunktionalen Bauteilaufnahme für eine Roboterstrahlanlage*, Fachhochschule Lübeck, Diplomarbeit, 2011
- [Bre12] BREMER, C.: Adaptive Machining for Efficient Manufacture and Repair of CFRP Components. In: *CFK-Convention Stade/Germany*, 2012
- [BSHL12] BADKE-SCHAUB, P. ; HOFINGER, G. ; LAUCHE, K.: *Human Factors: Psychologie sicheren Handelns in Risikobereichen*. Springer, 2012
- [BTVG06] BAY, H. ; TUYTELAARS, T. ; VAN GOOL, L.: Surf: Speeded up robust features. In: *Computer Vision-ECCV 2006*. Springer, 2006, S. 404–417
- [BVÖ00] BACH, V. ; VÖGLER, P. ; ÖSTERLE, H.: *Business Knowledge Management in der Praxis: Prozessorientierte Lösungen zwischen Knowledge Portal und Kompetenzmanagement*. Springer, 2000
- [BvP05] BÖCKLE, G. ; VAN DER LINDEN, F.J. ; POHL, K.: *Software product line engineering: foundations, principles and techniques*. Springer Science & Business Media, 2005
- [BWW03] BULLINGER, H.-J. ; WARNECKE, H.J. ; WESTKÄMPER, E.: *Neue Organisationsformen im Unternehmen: Ein Handbuch für das moderne Management*. Springer, 2003
- [Cam11] CAMPHAUSEN, B.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Bachelor Kompaktwissen*. Oldenbourg Verlag, 2011
- [CG00] CHANG, K. ; GHOSH, J.: Three-dimensional model-based object recognition and pose estimation using probabilistic principal surfaces. In: *Electronic Imaging International Society for Optics and Photonics*, 2000, S. 192–203
- [CM92] CHEN, Y. ; MEDIONI, G.: Object modelling by registration of multiple range images. In: *Image and vision computing* 10 (1992), Nr. 3, S. 145–155
- [DD95] DEMENTHON, D.F. ; DAVIS, L.S.: Model-based object pose in 25 lines of code. In: *International journal of computer vision* 15 (1995), Nr. 1-2, S. 123–141
- [DF10] DE FLORIO, F.: *Airworthiness: An Introduction to Aircraft Certification*. Elsevier, 2010
- [Dic08] DICKMANN, P.: *Schlanker Materialfluss: mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. Springer, 2008

- [Die02] DIETZSCH, A.: *Systematische Wiederverwendung in der Software-Entwicklung*. Springer, 2002
- [Dix09] DIX, A.: *Human-computer interaction*. Springer, 2009
- [Dos14] DOSE, S.: *Entwicklung einer intuitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle für die automatisierte Kleinserienmontage*, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2014
- [Drä89] DRÄGER, U.: *Ein betriebstypologisches Verfahren zur Segmentierung des Anwendungssoftware-Marktes*. Informatik-Forschungsgruppe VIII der Friedrich-Alexander-Univ. Erlangen-Nürnberg, 1989
- [DS03] DIAPER, D. ; STANTON, N.: *The handbook of task analysis for human-computer interaction*. CRC Press, 2003
- [DS10] DYCKHOFF, H. ; SPENGLER, T.S.: *Produktionswirtschaft: eine Einführung*. Springer, 2010
- [DSAS11] DEMANT, C. ; STREICHER-ABEL, B. ; SPRINGHOFF, A.: *Industrielle Bildverarbeitung*. Springer, 2011
- [DSO13] DOMASCHKE, T. ; SCHÜPPSTUHL, T. ; OTTO, M.-A.: Automatische adaptive Oberflächeninspektion von Triebwerksbauteilen im μm -Bereich. In: *3. VDI-Fachtagung - Industrielle Robotik*. Baden Baden, 2013
- [Dum13] DUMKE, R.: *Software Engineering: Eine Einführung für Informatiker und Ingenieure: Systeme, Erfahrungen, Methoden, Tools*. Springer, 2013
- [EKH05] EKVALL, S. ; KRAGIC, D. ; HOFFMANN, F.: Object recognition and pose estimation using color cooccurrence histograms and geometric modeling. In: *Image and Vision Computing* 23 (2005), Nr. 11, S. 943–955
- [FGSW04] FELDMANN, K. ; GERGS, H.-J. ; SLAMA, S. ; WIRTH, U.: *Montage strategisch ausrichten – Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen*. Springer, 2004
- [FSS08] FUNKEN, C. ; SCHULZ-SCHAEFFER, I.: *Digitalisierung der Arbeitswelt*. Springer, 2008
- [GO72] GROSSE-OSTRINGHAUS, W.: *Typologie der Fertigung unter dem Gesichtspunkt der Fertigungsablaufplanung*. Gießen University, 1972
- [GP88] GRAVEL, M. ; PRICE, W.L.: Using the kanban in a job shop environment. In: *The International Journal Of Production Research* 26 (1988), Nr. 6, S. 1105–1118
- [Gro82] GROCHLA, E.: *Grundlagen der organisatorischen Gestaltung*. Poeschel Stuttgart, 1982

- [Gru10] GRUSS, R.: *Schlanke Unikatfertigung: Zweistufiges Taktphasenmodell zur Steigerung der Prozesseffizienz in der Unikatfertigung auf Basis der Lean Production*. Springer, 2010
- [GT11a] GAN, Z. ; TANG, Q.: *Visual Sensing and its Applications: Integration of Laser Sensors to Industrial Robots*. Springer, 2011
- [GT11b] GÜNTHER, H.-O. ; TEMPELMEIER, H.: *Produktion und Logistik*. Springer, 2011
- [Gün07] GÜNTHER, W.A.: *Neue Wege in der Automobillogistik*. Springer, 2007
- [GW07] GONZALEZ, R.C. ; WOODS, R.E.: *Digital Image Processing Third Edition*. Pearson Education, 2007
- [Haa13] HAAG, H.: *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*, Universität Stuttgart, Diss., 2013
- [Hal94] HALBACH, W.R.: *Interfaces: Medien-und kommunikationstheoretische Elemente einer Interface-Theorie*. Wilhelm Fink Verlag, 1994
- [Haq03] HAQUE, B.: Lean engineering in the aerospace industry. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 217 (2003), Nr. 10, S. 1409–1420
- [Hau10] HAUG, F.: *Ansichtsbasierte 6 DoF Objekterkennung mit lokalen kovarianten Regionen*, Universität Heidelberg, Diss., 2010
- [Her75] HERZIG, N.: *Die theoretischen Grundlagen betrieblicher Instandhaltung*. Hain, 1975
- [Her09] HERCZEG, M.: *Software-Ergonomie: Theorien, Modelle und Kriterien für gebrauchstaugliche interaktive Computersysteme*. Oldenbourg Verlag, 2009
- [Hes00] HESSE, S.: *Fertigungsautomatisierung: Automatisierungsmittel, Gestaltung und Funktion*. Vieweg, 2000
- [HG07] HESSELER, M. ; GÖRTZ, M.: *Basiswissen ERP-Systeme: Auswahl, Einführung & Einsatz betriebswirtschaftlicher Standardsoftware*. W3L-Verlag, 2007
- [HHW08] HEIN, B. ; HENSEL, M. ; WÖRN, H.: Intuitive and model-based on-line programming of industrial robots: A modular on-line programming environment. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2008 IEEE*, 2008, S. 3952–3957
- [Hin13] HINSCH, M.: *Industrielles Luftfahrtmanagement*. Springer, 2013
- [HL05] HEINRICH, L.J. ; LEHNER, F.: *Informationsmanagement: Planung, Überwachung und Steuerung der Informationsinfrastruktur*. Oldenbourg Verlag, 2005

- [HLG15] HEINRICH, B. ; LINKE, P. ; GLÖCKLER, M.: *Grundlagen Automatisierung*. Springer Vieweg, 2015
- [HNT99] HANSEN, M.T. ; NOHRIA, N. ; TIERNEY, T.: Wie managen Sie das Wissen in Ihrem Unternehmen? In: *Harvard Business Manager* 21 (1999), S. 85–98
- [HO13] HINSCH, M. ; OLTHOFF, J.: *Impulsgeber Luftfahrt: Industrial Leadership durch luftfahrtspezifische Aufbau- und Ablaufkonzepte*. Springer, 2013
- [Hor87] HORN, B.K.: Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. In: *JOSA A* 4 (1987), Nr. 4, S. 629–642
- [Hor07] HORNBERG, A.: *Handbook of machine vision*. John Wiley & Sons, 2007
- [HS11] HESSE, S. ; SCHNELL, G.: *Sensoren Für Die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011
- [HZCG03] HUANG, H. ; ZHOU, L. ; CHEN, X.Q. ; GONG, Z.M.: SMART robotic system for 3D profile turbine vane airfoil repair. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21 (2003), Nr. 4, S. 275–283
- [Jac13] JACOBI, H.-F.: Computer Integrated Manufacturing (CIM). In: *Digitale Produktion*. Springer, 2013, S. 51–92
- [JM98] JAMES-MOORE, M.: *The relevance of Lean manufacturing to low volume high value products, with specific reference to civil aerospace*, University of Warwick, Diplomarbeit, 1998
- [JMNS13] JÄHNE, B. ; MASSEN, R. ; NICKOLAY, B. ; SCHARFENBERG, H.: *Technische Bildverarbeitung – Maschinelles Sehen*. Springer, 2013
- [Kat01] KATZY, B.: Produktionsmanagement für die Produktion in Unternehmensnetzwerken. In: *BURCKHARDT, W. (Hrsg.) Das große Handbuch Produktion, Landsberg/Lech*. (2001)
- [Kau96] KAUTZ, W.-E.: *Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme: Konzept zur technisch-ökonomisch begründeten Auswahl*. Wiesbaden : Gabler, 1996
- [KB08] KAMISKE, G.F. ; BRAUER, J.P.: *Qualitätsmanagement von A bis Z: Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements*. Hanser, 2008
- [KEH+05] KOEPPE, R. ; ENGELHARDT, D. ; HAGENAUER, A. ; HEILIGENSETZER, P. ; KNEIFEL, B. ; KNIPFER, A. ; STODDARD, K.: Robot-robot and human-robot cooperation in commercial robotics applications. In: *Robotics Research*. Springer, 2005, S. 202–216
- [KFJ96] KLEINALTENKAMP, M. ; FLIESS, S. ; JACOB, F.: *Customer Integration – Von der Kundenorientierung zur Kundenintegration*. Gabler, 1996
- [KGJ09] KUMMER, S. ; GRÜN, O. ; JAMMERNEGG, W.: *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*. Pearson Studium, 2009 (Bd. 1)

- [KKS05] KREWET, C. ; KUHLENKÖTTER, B. ; SCHÜPPSTUHL, T.: Optimierung robotergestützter Fertigungsprozesse. In: *Effiziente Optimierung von Bearbeitungsprogrammen für komplexe Werkstückgeometrien. wt Werkstattstechnik online* 95 (2005), Nr. 3, S. 108–112
- [KKW12] KÖNIG, A. ; KLEINMANN, K. ; WEBER, W.: Verbesserung des Einrichtprozesses von Industrierobotern durch akustisches Echtzeit-Feedback. In: *Automation 2012* Bd. VDI Berichte, VDI Verlag GmbH, 2012, S. 287–290
- [Kle92] KLEIN, J.: Konzeption eines Informationsmanagementsystems zur Gewährleistung der Datenintegrität in heterogenen betrieblichen Informationssystemen. In: *Datenintegrität in heterogenen Informationssystemen*. Springer, 1992, S. 54–193
- [Kle07] KLETTI, J.: *Manufacturing Execution Systems-MES*. Springer, 2007
- [Klo13] KLOOSS, K.: Flugzeugbauer wollen Werkstätten der Lüfte werden. In: *manager magazin* (2013), Juni
- [KLV09] KRÜGER, J. ; LIEN, T.K. ; VERL, A.: Cooperation of human and machines in assembly lines. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 58 (2009), Nr. 2, S. 628–646
- [KM08] KLEEMANN, F. ; MATUSCHEK, I.: Informalisierung als Komplement der Informatisierung von Arbeit. In: *Digitalisierung der Arbeitswelt: Zur Neuordnung formaler und informeller Prozesse in Unternehmen* (2008), S. 43–67
- [Krä02] KRÄMER, K.: *Automatisierung in Materialfluss und Logistik: Ebenen, Informationslogistik, Identifikationssysteme, intelligente Geräte*. Deutscher Universitätsverlag, 2002
- [Krc05] KRCMAR, H.: *Informationsmanagement*. Springer, 20005
- [KWH13] KAGERMANN, H. ; WAHLSTER, W. ; HELBIG, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. In: *Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4* (2013)
- [Lan07] LANG, S.: *Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion*. Meisenbach, 2007
- [Lev93] LEVINE, T.: Reusable software components. In: *ACM SIGAda Ada Letters* 13 (1993), Nr. 3, S. 62–73
- [Li99] LI, J.-W.: *A simulation study of the effects of applying JIT manufacturing techniques in a job shop environment with Kanban-based production control*, Massey University, Palmerston North, New Zealand, Diss., 1999
- [Löm04] LÖMKER, F.: *Lernen von Objektbenennungen mit visuellen Prozessen*, Universität Bielefeld, Diss., 2004
- [Lóp97] LÓPEZ, L.M.A.: *Design and implementation of cellular manufacturing in a job shop environment*, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 1997

- [Lou09] LOUIS, P.: *Manufacturing Execution Systems*. Springer, 2009
- [Low04] LOWE, D.G.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: *International journal of computer vision* 60 (2004), Nr. 2, S. 91–110
- [LRZ06] LINDEMANN, U. ; REICHWALD, R. ; ZÄH, M.F.: *Individualisierte Produkte-Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Springer, 2006
- [LSF04] LAMPE, M. ; STRASSNER, M. ; FLEISCH, E.: A ubiquitous computing environment for aircraft maintenance. In: *Proceedings of the 2004 ACM symposium on Applied computing* ACM, 2004, S. 1586–1592
- [Mah14] MAHLER, C.: *Automatisierungsmodule für ein funktionsorientiertes Automatisierungsengineering*, Institut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Diss., 2014
- [Mat05] MATHAISEL, D.: A lean architecture for transforming the aerospace maintenance, repair and overhaul (MRO) enterprise. In: *International Journal of Productivity and Performance Management* 54 (2005), Nr. 8, S. 623–644
- [May05] MAYR, H.: *Projekt Engineering: Ingenieurmäßige Softwareentwicklung in Projektgruppen*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2005
- [MD02] MESSIER-DOWTY: *Airbus A340-500 & A340-600 Component Maintenance Manual*. 2002
- [Men13] MENSEN, H.: *Handbuch der Luftfahrt*. Springer, 2013
- [Meu07] MEURSING, M.H.: Anpassungsstrategien in der Automobilindustrie. In: A.G., Willibald (Hrsg.): *Neue Wege in der Automobillogistik: die Vision der Supra-Adaptivität*. Berlin : Springer, 2007, S. 449–457
- [MHPH07] MEYER, C. ; HOLLMANN, R. ; PARLITZ, C. ; HÄGELE, M.: Programmieren durch Vormachen für Assistenzsysteme – Schweiß- und Klebebahnen intuitiv programmieren. In: *it-Information Technology* 49 (2007), Nr. 4, S. 238–246
- [Mor88] MORAVEC, H.: *Mind children: The future of robot and human intelligence*. Harvard University Press, 1988
- [Neb11] NEBL, T.: *Produktionswirtschaft*. Oldenbourg, 2011
- [Noa95] NOACK, H.E.: Neue Strukturen der Leittechnik für Rohrnetze – Einfluss neuer Technologien. In: *ITG Fachbericht* (1995), S. 145–145
- [Nor13] NORTH, K.: *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen*. Gabler Verlag, 2013
- [NPM09] NETO, P. ; PIRES, J.N. ; MOREIRA, A.: High-level programming for industrial robotics: using gestures, speech and force control. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2009)*, 2009

- [NSKW05] NICOLAI, T. ; SINDT, T. ; KENN, H. ; WITT, H.: Case study of wearable computing for aircraft maintenance. In: *International Forum on Applied Wearable Computing 2005*, VDE Verlag, 2005
- [NSW⁺06] NICOLAI, T. ; SINDT, T. ; WITT, H. ; REIMERDES, J. ; KENN, H.: Wearable computing for aircraft maintenance: Simplifying the user interface. In: *International Forum on Applied Wearable Computing 2006*, VDE Verlag, 2006, S. 1–12
- [OJ13] OLSEN, R. ; JOHANSEN, K.: Assembly cell concept for human and robot in cooperation. In: *22nd International Conference on Production Research: Challenges for sustainable operations*, 2013
- [OM02] OBDRZALEK, S. ; MATAS, J.: Object Recognition using Local Affine Frames on Distinguished Regions. In: *BMVC* Bd. 2, 2002, S. 113–122
- [Ōno88] ŌNO, T.: *Toyota production system: beyond large-scale production*. Productivity press, 1988
- [Öst90] ÖSTERLE, H.: Integrierte Standardsoftware: Entscheidungshilfen für den Einsatz von Softwarepaketen. In: *Band 2: Auswahl, Einführung und Betrieb von Standardsoftware*. AIT, Angewandte Informationstechnik, 1990
- [PBF07] PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHOUSEN, J. ; GROTE, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. Springer, 2007
- [Per13] PEROVIĆ, B.: *Vorrichtungen im Werkzeugmaschinenbau*. Springer, 2013
- [Pfe07] PFEIFFER, S.: *Montage und Erfahrung: Warum ganzheitliche Produktionssysteme menschliches Arbeitsvermögen brauchen*. Rainer Hampp Verlag, 2007
- [PHC13] PAUL, M. ; HAQUE, S.M. ; CHAKRABORTY, S.: Human detection in surveillance videos and its applications - a review. In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2013 (2013), Nr. 1, S. 1–16
- [Pil06] PILLER, F.: *Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*. Deutscher Universitätsverlag, 2006
- [PRR10] PROBST, G. ; RAUB, S. ; ROMHARDT, K.: *Wissen managen*. Bd. 6. Springer, 2010
- [PS05] PFEIFER, T. ; SCHMITT, R.: *Autonome Produktionszellen: Komplexe Produktionsprozesse flexibel automatisieren*. Springer, 2005
- [PSR15] PREECE, J. ; SHARP, H. ; ROGERS, Y.: *Interaction Design-beyond human-computer interaction*. John Wiley & Sons, 2015
- [Ram89] RAMMERT, W.: Technisierung & Medien in Sozialsystemen-Annäherung an eine soziolog. Theorie d. Technik. In: *P. Weingart (Hg., 1989), Technik als sozialer Prozeß, Suhrkamp, F. a. M* (1989), S. 128–173

- [Rap10] RAPP, T.: *Produktstrukturierung: Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen*. BoD – Books on Demand, 2010
- [Ras00] RASCH, A.A.: *Erfolgspotential Instandhaltung: Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements*. Bd. 21. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co KG, 2000
- [Rat93] RATHNOW, P.J.: Integriertes Variantenmanagement. In: *Bestimmung, Realisierung und Sicherung der optimalen Variantenvielfalt, 1st edn*. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen (1993)
- [Ree93] REESE, J.: Standardisierung, Typisierung, Normung. In: WITTMANN, W. et a. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Betriebswirtschaft*. Schäffer-Poeschel, 1993 (5. Auflage), S. 3941–3949
- [Rei77] REICHWALD, R.: *Arbeit als Produktionsfaktor*. UTB für Wissenschaft, 1977
- [RFW90] RUTHENBERG, R. ; FRISCHKRON, H. ; WILSCHEK, R.: Gewinnsteigernde Instandhaltung. In: *Verlag TÜV, Rheinland eV* (1990)
- [Rie12] RIEMPP, G.: *Integrierte Wissensmanagement-Systeme: Architektur und praktische Anwendung*. Springer, 2012
- [RL01] RUSINKIEWICZ, S. ; LEVOY, M.: Efficient variants of the ICP algorithm. In: *IEEE Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling 2001*, 2001, S. 145–152
- [RS11] REMÉNYI, C. ; STAUCHDACHER, S.: MRO: Organisation der Produktion sowie von Produktionsplanung und -steuerung. In: *wt Werkstatttechnik online* 101 (2011), S. 242–248
- [Sah12] SAHAY, A.: *Leveraging information technology for optimal aircraft maintenance, repair and overhaul (MRO)*. Elsevier, 2012
- [SAR08] SIMON, E.J. ; ALBUQUERQUE, J.P. de ; ROLF, A.: Notwendige und vorläufige Formalisierungslücken in Organisationen. In: *Digitalisierung der Arbeitswelt*. Springer, 2008, S. 239–261
- [Say11] SAYLER, S.: *Universelle Manipulationsstrategien für die industrielle Montage*. KIT Scientific Publishing, 2011
- [SB13] SIEGERT, H.-J. ; BOCIONEK, S.: *Robotik: Programmierung intelligenter Roboter*. Springer-Verlag, 2013
- [SBW⁺12] STANDER, A. ; BOERSMA, M. ; WENNINK, B. ; VRIES, M. de ; BOER, R.J. de ; OVEREIJNDER, M.: Applying proven methods in a new environment: the case of LEAN in Business Aviation MRO. In: *Proceedings of the Third International Air Transport and Operations Symposium 2012* IOS Press, 2012, S. 265

- [Sch80] SCHOMBURG, E.: *Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau*, RWTH Aachen, Diss., 1980
- [Sch90] SCHEER, A.-W.: *CIM Computer Integrated Manufacturing: Der computergesteuerte Industriebetrieb*. Springer, 1990
- [Sch97] SCHNEEWEISS, C.: *Einführung in die Produktionswirtschaft*. Springer, 1997
- [Sch06a] SCHMID, S.: *Automatisierte Ordnungs- und Kommissionierzelle zur hochflexiblen Bereitstellung von Werkstücken in der Montage*, Universität Stuttgart, Diss., 2006
- [Sch06b] SCHÖNSLEBEN, P.: *Integrales Logistikmanagement*. Springer, 2006
- [Sch10] SCHWOCK, S.: Flexibles Vorrichtungssystem. In: *Intelligent produzieren*. Springer, 2010, S. 269–274
- [Sch14] SCHUH, G.: *Produktkomplexität managen: Strategien-Methoden-Tools*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014
- [SGG⁺13] SPATH, D. ; GANSCHAR, O. ; GERLACH, S. ; HÄMMERLE, M. ; KRAUSE, T. ; SCHLUND, S.: *Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0*. Fraunhofer Verlag Stuttgart, 2013
- [SGK09] SUN, Y. ; GIBLIN, D.J. ; KAZEROUNIAN, K.: Accurate robotic belt grinding of workpieces with complex geometries using relative calibration techniques. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 25 (2009), Nr. 1, S. 204–210
- [SH09] SCHÜMMER, T. ; HAAKE, J.M.: Unterstützung für das Lernen sozialer Praxis in NGOs. In: *Lernen im digitalen Zeitalter-DeLFI 2009-die 7. E-Learning-Fachtagung Informatik* (2009)
- [SIKP07] SKOGLUND, A. ; ILIEV, B. ; KADMIRY, B. ; PALM, R.: Programming by demonstration of pick-and-place tasks for industrial manipulators using task primitives. In: *International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation 2007 IEEE*, 2007, S. 368–373
- [SJ13] SCHEER, A.-W. ; JOST, W.: *ARIS in der Praxis: Gestaltung, Implementierung und Optimierung von Geschäftsprozessen*. Springer, 2013
- [SKS14] SCHWIENBACHER, C. ; KOETTER, T. ; SCHUEPPSTUHL, T.: Repair of Aircraft Combustors with Industrial Robots. In: *ISR/Robotik 2014* (2014)
- [SLF14] SLF OBERFLÄCHENTECHNIK GMBH: Vom Roboter zum automatisierten Strahlkonzept (Wirtschaftlicher Strahlprozess für Großkomponenten). In: *JOT - Journal für Oberflächentechnik* (2014), Juli, S. 56–57

- [SM06] SPRINGER, R. ; MEYER, F.: Flexible Standardisierung von Arbeitsprozessen. Erfahrungen aus der betrieblichen Praxis. In: *Clement, U. ; Lacher, M. (Hg.): Produktionssysteme und Kompetenzerwerb. Zu den Veränderungen moderner Arbeitsorganisation und ihren Auswirkungen auf die berufliche Bildung.* Stuttgart: Franz Steiner (2006), S. 43–54
- [Spr05] SPRINGER, R.: Aktuelle Diskussion um Gruppenarbeit. Teil 3: Flexible Standardisierung – am Beispiel der Automobilindustrie. In: *Antoni, C.H.; Eyer, E. (Hg.): Das flexible Unternehmen. Düsseldorf: symposion* (2005), S. 1–24
- [SR14] SÜSSE, H. ; RODNER, E.: *Bildverarbeitung und Objekterkennung.* Springer, 2014
- [SS09] SPECHT, D. ; STEFANSKA, R.: Lean Production als Produktionskonzept für die Unikat- und Einzelfertigung. In: *Weiterentwicklung der Produktion.* Springer, 2009, S. 31–42
- [SS14] SCHLOSSER, C. ; SCHÜPPSTUHL, T.: Numerical controlled robot crawler: new resource for industries with large scale products. In: *Production Engineering* 8 (2014), Nr. 6, S. 719–725
- [SSG08] SCHMIDT, L. ; SCHLICK, C. ; GROSCHE, J.: *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme.* Springer, 2008
- [Ste12] STEINBERGER, G.: *Methodische Untersuchungen zur Integration automatisch erfasster Prozessdaten von mobilen Arbeitsmaschinen in ein Informationsmanagementsystem „Precision Farming“*, Technische Universität München, Diss., 2012
- [Sto11] STOTZ, M.: *Adaptive Segmentierung von Tiefenbildern für die 3-D-Objektlageerkennung auf Basis von kombinierten regelgeometrischen Elementen*, Universität Stuttgart, Diss., 2011
- [SV14] SOBRAL, A. ; VACAVANT, A.: A comprehensive review of background subtraction algorithms evaluated with synthetic and real videos. In: *Computer Vision and Image Understanding* 122 (2014), S. 4–21
- [Sve98] SVEIBY, K.E.: *Wissenskapital, das unentdeckte Vermögen: Immaterielle Unternehmenswerte aufspüren, messen und steigern.* Verlag Moderne Industrie, 1998
- [Sys07] SYSKA, A.: *Produktionsmanagement.* Springer, 2007
- [TA12] THOMMEN, J.P. ; ACHLEITNER, A.K.: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht.* Gabler, 2012 (Springer)
- [TBH08] THOMAS, A. ; BYARD, P. ; HENRY, P.: Self-maintenance works for repair firm [aerospace industry]. In: *Engineering & Technology* 3 (2008), Nr. 7, S. 69–71

- [Thi05] THIEMERMANN, S.: *Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter*, Universität Stuttgart, Diss., 2005
- [TKR08] TEICH, I. ; KOLBENSCHLAG, W. ; REINERS, W.: *Der richtige Weg zur Softwareauswahl: Lastenheft, Pflichtenheft, Compliance, Erfolgskontrolle*. Springer, 2008
- [TW13] TRUMMER, A. ; WIEBACH, H.: *Vorrichtungen der Produktionstechnik: Entwicklung, Montage, Automation*. Springer, 2013
- [UHR13] UHLMANN, E. ; HEITMÜLLER, F. ; MANTHEI, M. ; REINKOBER, S.: Applicability of Industrial Robots for Machining and Repair Processes. In: *Procedia CIRP* 11 (2013), S. 234–238
- [UK14] UHLMANN, E. ; KRÜGER, J.: Industrieroboter. In: *Dubbel*. Springer, 2014, S. 1601–1609
- [Ulr09] ULRICH, A.: *Entwicklungsmethodik für die Planung verfahrenstechnischer Anlagen*, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Diss., 2009
- [Urb04] URBANSKY, S.: *Integrierter Ansatz zur systemunabhängigen Wiederverwendung von Lerninhalten*, Technische Universität Dresden, Diss., 2004
- [URBVD11] UHLMANN, E. ; RÖHNER, M. ; BAUMGARTEN, J. ; VAN DUIKEREN, B.: Markt- und Trendstudie Maintenance, Repair and Overhaul 2011. In: *Fraunhofer-Institut für Produktinsanlagen und Konstruktionstechnik IPK* (2011)
- [USR⁺15] UHLMANN, E. ; STARK, R. ; RETHMEIER, M. ; BAUMGARTEN, J. ; BILZ, M. ; GEISERT, C. ; GRAF, B. ; GUMENYUK, A. ; GROSSER, H. ; HEITMÜLLER, F. u. a.: Maintenance, Repair and Overhaul in Through-Life Engineering Services. In: *Through-life Engineering Services*. Springer, 2015, S. 129–156
- [Wan09] WANNENWETSCH, H.: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik: Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion*. Springer, 2009
- [WB05] WECK, M. ; BRECHER, C.: *Werkzeugmaschinen 1 – Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. Springer, 2005
- [Web09] WEBER, W.: *Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung*. Hanser Verlag, 2009
- [Wec06] WECK, M.: *Werkzeugmaschinen 4 – Automatisierung von Maschinen und Anlagen*. Bd. 4. Springer, 2006
- [Wei13] WEIDAUER, J.: *Elektrische Antriebstechnik: Grundlagen, Auslegung, Anwendungen, Lösungen*. Wiley, 2013
- [WF02] WOSCH, T. ; FEITEN, W.: Reactive motion control for human-robot tactile interaction. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2002* Bd. 4 IEEE, 2002, S. 3807–3812

- [Wil91] WILLIAMS, T.J.: *A Reference Model for Computer Integrated Manufacturing (CIM): A Description from the Viewpoint of Industrial Automation: Prepared by CIM Reference Model Committee International Purdue Workshop on Industrial Computer Systems*. Instrument Society of America, 1991
- [Wil01] WILDEMAN, H.: *Logistik Prozessmanagement – Organisation und Methoden*. München : TCW Transfer-Centrum-Verlag, 2001
- [Win14] WINDELBAND, L.: Zukunft der Facharbeit im Zeitalter „Industrie 4.0 “. In: *Journal of Technical Education (JOTED)* 2 (2014), Nr. 2, S. 137–160
- [Wis94] WISSENSCHAFTLICHE KOMMISSION WIRTSCHAFTSINFORMATIK: Profil der Wirtschaftsinformatik. Ausführungen der Wissenschaftlichen Kommission der Wirtschaftsinformatik. In: *Wirtschaftsinformatik* 36 (1994), Nr. 1
- [WJR90] WOMACK, J.P. ; JONES, D.T. ; ROOS, D.: *The machine that changed the world*. Simon and Schuster, 1990
- [WKG⁺06] WERSING, H. ; KIRSTEIN, S. ; GÖTTING, M. ; BRANDL, H. ; DUNN, M. ; MIKHAILOVA, I. ; GOERICK, C. ; STEIL, J. ; RITTER, H. ; KÖRNER, E.: A biologically motivated system for unconstrained online learning of visual objects. In: *Artificial Neural Networks – ICANN 2006*. Springer, 2006, S. 508–517
- [WKW13] WEIDNER, R. ; KONG, N. ; WULFSBERG, J.P.: Human Hybrid Robot: a new concept for supporting manual assembly tasks. In: *Production Engineering* 7 (2013), Nr. 6, S. 675–684
- [WMR10] WINTER, E. ; MOSENA, R. ; ROBERTS, L.: *Gabler Wirtschaftslexikon: Die ganze Welt der Wirtschaft: Betriebswirtschaft, Volkswirtschaft, Wirtschaftsrecht, Recht und Steuern*. Gabler Verlag, 2010
- [WN14] WINDMANN, S. ; NIGGEMANN, O.: Intelligente Assistenzsysteme für die Automation. In: *atp edition – Automatisierungstechnische Praxis* 56 (2014), Nr. 04, S. 54–61
- [WPG14] WENZELMANN, C. ; PLASS, C. ; GAUSEMEIER, J.: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. Carl Hanser Verlag, 2014
- [WSCL13] WESTKÄMPER, E. ; SPATH, D. ; CONSTANTINESCU, C. ; LENTES, J.: *Digitale Produktion*. Springer, 2013
- [WW14] WEIDNER, R. ; WULFSBERG, J.P.: Aufbau und Implementierung eines aktiven Gelenkarms für Human Hybrid Robots (HHR). In: *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014), Nr. 3, S. 174–179
- [WY11] WANG, W. ; YUN, C.: A Path Planning Method for Robotic Belt Surface Grinding. In: *Chinese journal of aeronautics* 24 (2011), Nr. 4, S. 520–526

- [WYS08] WANG, W. ; YUN, C. ; SUN, K.: An experimental method to calibrate the robotic grinding tool. In: *IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL) 2008* IEEE, 2008, S. 2460–2465
- [WZZ08] WANG, J. ; ZHANG, H. ; ZHANG, G.: A force control assisted robot path generation system. In: *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering 2008* IEEE, 2008, S. 528–533
- [Zin14] ZINGSHEIM, D.: *Entwicklung eines Konzepts zur Optimierung der maschinellen Bearbeitung von kleinen und mittelgroßen Fahrwerksbauteilen*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2014. – Bachelorarbeit
- [ZV06] ZÄH, M. ; VOGL, W.: Interactive laser-projection for programming industrial robots. In: *Proceedings of the 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* IEEE Computer Society, 2006, S. 125–128
- [ZVM04] ZÄH, M. ; VOGL, W. ; MUNZERT, U.: Beschleunigte Programmierung von Industrierobotern. Augmented-Reality-Einsatz zur intuitiven Mensch-Maschine-Interaktion. In: *wt Werkstattstechnik online* 94 (2004), Nr. 9, S. 438–441

Referenzierte Normen und Richtlinien

Dieses Verzeichnis enthält referenzierte Normen und Richtlinien.
Sie werden mit [<KURZBELEG>]# referenziert.

- [DIN83] DIN: *66001: Sinnbilder fühlhebeldmessgeräte Datenfluss- und Programmablaufpläne*. Berlin: Beuth, Dezember 1983
- [DIN85] DIN: *2270:1985-04 Fühlhebeldmessgeräte*. Berlin: Beuth, April 1985
- [DIN98] DIN V: *19233: Leittechnik - Prozessautomatisierung - Automatisierung mit Prozessrechnersystemen, Begriffe*. Berlin: Beuth, Juli 1998
- [DIN99] DIN EN ISO: *9241: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit; Leitsätze*. Berlin: Beuth, Januar 1999
- [DIN03] DIN: *8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth, September 2003
- [DIN08] DIN EN ISO: *9241: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. Berlin: Beuth, September 2008
- [DIN09] DIN: *6300: Vorrichtungen für die Fixierung der Lage von Werkstücken während formändernder Fertigungsverfahren - Benennungen und deren Abkürzungen*. Berlin: Beuth, April 2009
- [DIN11] DIN EN ISO: *9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. Berlin: Beuth, Januar 2011
- [DIN12] DIN: *31051: Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin: Beuth, September 2012
- [DIN14a] DIN EN: *60079-0: Explosionsgefährdete Bereiche*. Berlin: Beuth, Juni 2014
- [DIN14b] DIN EN: *62264-1: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen. Teil 1: Modelle und Terminologie*. Berlin: Beuth, Juli 2014
- [DIN14c] DIN EN ISO: *6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen*. Berlin: Beuth, Oktober 2014
- [DIN14d] DIN EN ISO: *9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth, August 2014
- [DIN14e] DIN ISO: *16290: Raumfahrtsysteme - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien*. Berlin: Beuth, Dezember 2014

- [Eur14] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY: *Part-145: Commission Regulation (EC) on the continuing airworthiness of aircraft and aeronautical products, parts and appliances, and on the approval of organisations and personnel involved in these tasks [Implementing Rule Continuing Airworthiness]*. 2014
- [VDI93] VDI: *2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth, Mai 1993
- [VDI97] VDI: *2222: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Blatt 1*. Berlin: Beuth, Juni 1997
- [VDI08] VDI: *4499: Digitale Fabrik - Blatt 1: Grundlagen*. Berlin: Beuth, Februar 2008
- [VDI14] VDI/VDE: *3682: Formalisierte Prozessbeschreibungen. Blatt 1*. Berlin: Beuth, April 2014
- [VDI15] VDI: *4006: Menschliche Zuverlässigkeit - Blatt 1: Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung*. Berlin: Beuth, März 2015

Referenzierte Patente

Dieses Verzeichnis enthält referenzierte Patente.
Sie werden mit [<KURZBELEG>]^P referenziert.

- [Göb10] GÖBEL, V.: *Vorrichtung und Verfahren zur Überwachung*. <https://www.google.com/patents/DE102008046621A1?c1=de>. Version: März 2010. – DE Patent App. DE200,810,046,621
- [Kei12] KEIBEL, A.: *Verfahren und Vorrichtung zum Steuern eines Handhabungsgeräts relativ zu einem Objekt*. <https://www.google.com/patents/DE10351669B4?c1=de>. Version: September 13 2012. – DE Patent 10,351,669

Referenzierte Internetquellen und Software

Dieses Verzeichnis enthält referenzierte Internetquellen und Software.
Sie werden mit [KURZBELEG]® referenziert.

- [Ade] ADEPT TECHNOLOGY: *SmartController EX*. <https://www.adept.de/>
- [Aer09] AEROSTRATEGY: *Aerospace Globalization 2.0: Implications for Canada's Aerospace Industry*. http://www.aiac.ca/uploadedFiles/Resources_and_Publications/Reference_Documents/The%20Implications%20of%20Globalization%20%20For%20Canadian%20Aerospace%282%29.pdf.
Version: November 2009
- [AIR15] AIRBUS: *Global Market Forecast 2015-2034*. <http://www.airbus.com/company/market/forecast/>. Version: September 2015
- [Ali14] ALIXPARTNERS: *Commercial Growth Continues; Defense Scrambles – Global Aerospace and Defense Industry Outlook*. <http://www.alixpartners.com/en/Publications/AllArticles/tabid/635/articleType/ArticleView/articleId/1392/Commercial-Growth-Continues-Defense-Scrambles.aspx>.
Version: September 2014
- [Boe14] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES: *Current Market Outlook 2014-2033*. http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/cmo/pdf/Boeing_Current_Market_Outlook_2014.pdf. Version: September 2014
- [Bre06] BREMER, Claus: AROSATEC Publishable Final Report. (2006), November, Nr. FP6-502937. http://cordis.europa.eu/project/rcn/72829_en.html
- [Bun15] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Luftfahrttechnologien*. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Technologie/Schluesselformen/luftfahrttechnologien.html>. Version: September 2015
- [Cle15] CLEARWATER INTERNATIONAL: *Global aerospace report 2014*. <http://clearwaterinternational.com/wp-content/uploads/2014/06/Aerospace-Report-Master-2014.pdf>. Version: September 2015
- [Cog] COGNEX CORPORATION: *VisionPro*. <http://www.cognex.com>
- [Del15] DELOITTE: *2015 Global aerospace and defence industry outlook*. <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Manufacturing/gx-mnfg-2015-global-a-and-d-outlook.pdf>. Version: September 2015

- [EAS] EASY-ROB: *3D Robot Simulation Tool*. <http://www.easy-rob.com>
- [Hin15] HINSCH, M.: *MSG-3 – Eine Einführung in die Bestimmung grundlegender Instandhaltungsmaßnahmen bei Verkehrsflugzeugen*. <http://www.aeroimpulse.de/MSG-3-Einfuehrung.pdf>. Version: September 2015
- [IBM] IBM: *MAXIMO for Aviation MRO*. http://www-01.ibm.com/support/knowledgecenter/SS5RRF_7.6.0/com.ibm.mavm.doc_7.6.0/plum/r_mavm_apps.html
- [Luf15] LUFTHANSA TECHNIK AG: *Integrated Management Manual of the Lufthansa Technik Group*. <http://www.lufthansa-technik.com/documents/100446/205976/LHT+Group+Management+Manual>. Version: September 2015
- [Mica] MICROFOST CORPORATION: *Office*. <https://products.office.com/de-de/home>
- [Micb] MICROSOFT CORPORATION: *Microsoft Dynamics NAV*. <http://www.microsoft.com/de-de/dynamics>
- [MIR] MIRO TECHNOLOGIES: *GOLDesp MRO & Supply*. <http://www.mirotechnologies.com/goldesp-suite/goldesp-mro/>
- [MVT] MVTEC SOFTWARE GMBH: *Halcon*. <http://www.halcon.com>
- [Neu] NEUROCHECK GMBH: *NeuroCheck*. <http://www.neurocheck.de>
- [ORA] ORACLE: *cMRO - Complex Maintenance, Repair, and Overhaul*. <http://www.oracle.com/us/solutions/ent-performance-bi/054011.html>
- [SAP] SAP DEUTSCHLAND SE & CO. KG: *SAP*. <http://www.sap.com>
- [SLF15] SLF OBERFLÄCHENTECHNIK GMBH: *Strahlanlagen*. http://www.slf.eu/pdf_files/anlagenbau/prospekt_strahlen_d_rz_mail.pdf. Version: September 2015
- [UNI14] UNISON LTD.: *Advanced Tube Bending Technology Helps British Airways Maintain Latest-generation Aircraft / UNISON Ltd*. Version: Mai 2014. http://www.aviationpros.com/press_release/11457748. 2014. – Forschungsbericht

Veröffentlichungen des Verfassers

Dieses Verzeichnis enthält die Veröffentlichungen des Verfassers.
Sie werden mit [KURZBELEG]* referenziert.

- [SEF14] STEINBACH, J.P. ; ERNST, T. ; FAY, A.: Positionierungsverifikation komplexer Großbauteile in der Roboterzelle zur Erweiterung eines Prozessführungssystems für die Automatisierung von MRO-Prozessen. In: *Forum Bildverarbeitung 2014* KIT Scientific Publishing, 2014, S. 249
- [SEFH14] STEINBACH, J.P. ; ERNST, T. ; FAY, A. ; HARTUNG, F.: Approach of background subtraction to verify the correct positioning of parts with complex shapes and in small lot sizes in a robot cell. In: *Jahreskolloquium „Bildverarbeitung in der Automation“ (BVAu 2014)*. Lemgo, November 2014
- [SFEH15] STEINBACH, J.P. ; FAY, A. ; ERNST, T. ; HARTUNG, F.: Generalisierter Ansatz zur Automatisierung bestehender Wartungs- und Überholungsprozesse in der Luftfahrtbranche. In: *5. VDI-Fachtagung Industrielle Robotik 2015*. Baden-Baden, Juni 2015

Bildungsweg

- 03/2010 – 03/2015 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter**, *Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Professur für Automatisierungstechnik*, Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay
- 10/2004 – 02/2010 **Studium der Technomathematik**, *Universität Bremen*, Diplom mit Abschlussnote sehr gut
Vertiefungsrichtungen:
 - numerische Mathematik, Optimierung und optimale Steuerung
 - Luft- und Raumfahrttechnik Navigation von Luft- und Raumfahrzeugen
- 07/2004 **Allgemeine Hochschulreife**, *Altes Gymnasium Oldenburg*

Praktische Erfahrung

- seit 04/2015 **Requirements Engineer**, T-Systems on site services GmbH, Wolfsburg
Anforderungs- und Projektmanagement
- 01/2011 – 03/2015 **Industriekooperation**, Lufthansa Technik AG Hamburg
Konzeption und Implementation einer robotergestützten Prozessautomatisierung
- 02/2009 – 01/2010 **Diplomand**, *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*
Implementation eines Navigationsfilters für das Flugexperiment SHEFEX 2

Auszeichnungen

- 06/2010 **ZARM Förderpreis 2010**, *Zentrum für angewandte Mikrogravitation Bremen*
Auszeichnung der Diplomarbeit mit dem bundesweit ausgeschriebenen Förderpreis (1.Preis)

Online-Buchshop für Ingenieure

■ ■ VDI nachrichten

BUCHSHOP

Online-Shops



**Fachliteratur und mehr -
jetzt bequem online recher-
chieren & bestellen unter:
www.vdi-nachrichten.com/
Der-Shop-im-Ueberblick**



**Täglich aktualisiert:
Neuerscheinungen
VDI-Schriftenreihen**



Im Buchshop von vdi-nachrichten.com finden Ingenieure und Techniker ein speziell auf sie zugeschnittenes, umfassendes Literaturangebot.

Mit der komfortablen Schnellsuche werden Sie in den VDI-Schriftenreihen und im Verzeichnis lieferbarer Bücher unter 1.000.000 Titeln garantiert fündig.

Im Buchshop stehen für Sie bereit:

VDI-Berichte und die Reihe **Kunststofftechnik**:

Berichte nationaler und internationaler technischer Fachtagungen der VDI-Fachgliederungen

Fortschritt-Berichte VDI:

Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte aus sämtlichen ingenieurwissenschaftlichen Fachrichtungen

Newsletter „Neuerscheinungen“:

Kostenfreie Infos zu aktuellen Titeln der VDI-Schriftenreihen bequem per E-Mail

Autoren-Service:

Umfassende Betreuung bei der Veröffentlichung Ihrer Arbeit in der Reihe Fortschritt-Berichte VDI

Buch- und Medien-Service:

Beschaffung aller am Markt verfügbaren Zeitschriften, Zeitungen, Fortsetzungsreihen, Handbücher, Technische Regelwerke, elektronische Medien und vieles mehr – einzeln oder im Abo und mit weltweitem Lieferservice

VDI nachrichten

BUCHSHOP

www.vdi-nachrichten.com/Der-Shop-im-Ueberblick

Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
 - 2 Fertigungstechnik
 - 3 Verfahrenstechnik
 - 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
 - 6 Energietechnik
 - 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
 - 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
 - 10 Informatik/Kommunikation
 - 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
 - 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
 - 15 Umwelttechnik
 - 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
 - 21 Elektrotechnik
 - 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-346320-6