

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation

Ein Assistenzsystem zur digitalen
Werker-Unterstützung in der industriellen
Produktion

Alexander Bannat

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Rigoll
2. Jun.-Prof. Dr. rer. nat. Martin Kleinsteuber

Die Dissertation wurde am 22.04.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 05.11.2014 angenommen.

Zusammenfassung

Diese Dissertation befasst sich mit der Entwicklung eines Werkerassistenzsystems, das eine abstrakte Repräsentation für Montageablaufpläne, eine Komponente zur Erfassung der Werkeraktionen und eine Darstellungseinheit für Arbeitsanweisungen beinhaltet. Das entwickelte Assistenzsystem kann einen Werker bei seiner Tätigkeit unterstützen, damit er seine Montageaufgabe erfolgreich bearbeiten und erfüllen kann.

Zunächst wird ein Einblick in für diese Arbeit relevante Aspekte der industriellen Produktion gegeben. Das entwickelte Konzept zur regelbasierten Definition von Montageablaufplänen wird anhand einer Beispielimplementierung vorgestellt.

Anschließend werden zwei Ansätze zur Erfassung der Werker-Tätigkeit vorgestellt. Diese umfassen eine Auswertung von 3D-Merkmalen mittels Zustandsautomat, sowie eine statistische Auswertung von 2D-Bewegungsvektoren. Jeder Ansatz wird in Probandenversuchen evaluiert.

Im dritten Schwerpunkt dieser Arbeit werden zwei Konzepte zur Darstellung von Arbeitsanweisungen während einer manuellen Montage vorgestellt. Jedes Konzept wird in Probandenversuchen evaluiert und die Ergebnisse diskutiert.

Die Dissertation schließt mit einer Zusammenfassung über die entwickelten Konzepte und Komponenten sowie den Ergebnissen zu den Versuchen. Schließlich wird ein Ausblick gegeben.

Abstract

This thesis is focusing on the development of a worker assistant system. The system features an abstract representation of work plans, a component for detecting the workflow of the worker and a display unit for presenting operating instructions. The developed assistant system is capable of supporting a worker in his assembly task.

First, an overview about relevant aspects of industrial production is given. The developed rule-based approach for defining workplans is explained within a sample implementation.

Afterwards, two approaches for detecting the workers workflow are presented. These include the analysis of 3D-features using state machines, as well as a statistical analysis of 2D-motion flow vectors. Each approach is evaluated in user trials.

The third part is focused on two concepts for the presentation of operating instructions during a manual assembly task. Each concept is evaluated in user trials and the results are discussed.

The thesis concludes with a summary of the developed concepts and integrated components as well as the results of the experiments. Finally, an outlook is given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	2
1.3	Gliederung	4
2	Relevante Aspekte der industriellen Produktion	5
2.1	Einfluss verschiedener Losgrößen auf die Produktionsverfahren	5
2.1.1	Serien- und Sortenproduktion von Losen	6
2.1.2	Einzelproduktion von Losen	7
2.1.3	Kleinserienfertigung	7
2.1.4	Mittelserienfertigung	7
2.1.5	Großserienfertigung und Massenproduktion	8
2.2	Strukturformen verschiedener Montagesysteme	8
2.2.1	Einzelplatzmontage	9
2.2.2	Linienmontage	11
2.2.3	Baustellenmontage	12
2.2.4	Montageinsel	14
2.2.5	Automatisierte Montagesysteme	16
2.2.6	Hybride Montagesysteme	16
2.3	Forschungsprojekte als Anwendungsszenarien	18
2.3.1	CoTeSys-Projekte in der Kognitiven Fabrik	18
2.3.2	EU-Projekt CustomPacker	20
2.4	Zusammenfassung der Grundbegriffe	22

3	Wissensbasierte Repräsentation von Montageablaufplänen	23
3.1	Montageablaufpläne in der industriellen Produktion	23
3.2	Montageablaufplan-Konzept	25
3.3	Regelbasierte Interpretation von Montageablaufplänen	27
3.3.1	Logische Programmierung	27
3.3.2	Jess Expertensystem	30
3.3.2.1	Modellierung der Jess Facts	32
3.3.2.2	Modellierung der Jess Rules	36
3.3.2.3	Modellierung der Jess Queries	40
3.3.3	Implementierung eines Testsystems	41
3.3.3.1	Eingaben	43
3.3.3.2	Ausgaben	44
3.3.3.3	Erweiterbarkeit	45
3.4	Diskussion	46
4	Automatische Ermittlung von Arbeitsschritten	49
4.1	Erfassung von Benutzeraktionen	49
4.2	Tiefenbild-basierte Arbeitsschritterkennung	51
4.2.1	Versuchsaufbau	51
4.2.2	Merkmale aus Tiefenbildern	52
4.2.2.1	Microsoft Kinect	53
4.2.2.2	Hand-Tracking mit Kinect	54
4.2.2.3	Generierte Merkmale	58
4.2.3	Bestimmung des Arbeitsschrittes mittels Zustandsautomaten	62
4.2.4	Probandenversuche und Ergebnisse	66
4.2.4.1	Parameter zur Bewertung der Handverfolgung	66
4.2.4.2	Evaluation der Handverfolgung	69
4.2.5	Fazit	72
4.3	Videobild-basierte Arbeitsschritterkennung	74
4.3.1	Versuchsaufbau	74
4.3.2	Merkmalsgewinnung aus Kamerabildern	80
4.3.2.1	Bewegungserkennung im 2D-Bild	80
4.3.2.2	Aufbereitung der Filtermaske	83
4.3.2.3	Connected Components Algorithmus	84
4.3.2.4	Optischer Fluss	89
4.3.3	Bestimmung des Arbeitsvorgangs mittels Hidden-Markov- Modellen	96

4.3.3.1	Themenbezogene Arbeiten	97
4.3.3.2	Theoretische Grundlagen	97
4.3.3.3	Technische Realisierung der HMM-basierten Arbeitsschritterkennung	104
4.3.4	Probandenversuche und Ergebnisse	110
4.3.5	Fazit	112
4.4	Diskussion	113
5	Visualisierung von Montageablaufplänen	117
5.1	Digitale Werker-Unterstützung	117
5.1.1	Abstrakte Repräsentation eines Montageablaufplans	119
5.1.2	Bewertung mittels System Usability Scale	124
5.2	Montageablaufplan-GUI	125
5.2.1	GUI Konzept	126
5.2.1.1	Hauptmenü der GUI	127
5.2.1.2	Menü-Leiste	128
5.2.1.3	Navigationsmenü der GUI	129
5.2.1.4	Hauptbereich	130
5.2.2	GUI Implementierung	132
5.2.2.1	Startansicht der GUI	133
5.2.2.2	Übersicht der Arbeitsschritte	134
5.2.2.3	Beschreibung der detaillierten Arbeitsanweisung	136
5.2.3	Probandenversuche und Ergebnisse	137
5.2.3.1	Vorversuch	138
5.2.3.2	Hauptevaluierung	141
5.2.4	Fazit	148
5.3	Kontaktanaloge Visualisierung von Montageablaufplänen	148
5.3.1	Visualisierungskonzepte	149
5.3.1.1	Context-Bubble	151
5.3.1.2	Kontaktanalogen Pick-by-Light	154
5.3.1.3	Visual Guidance	156
5.3.2	Technische Realisierung	158
5.3.2.1	Versuchsaufbau	158
5.3.2.2	Kalibrierung	159
5.3.2.3	Realisierung der Konzepte	164
5.3.3	Probandenversuche und Ergebnisse	169
5.3.3.1	Versuchsdurchführung	171

INHALTSVERZEICHNIS

5.3.4	Fazit	177
5.4	Diskussion	178
6	Zusammenfassung und Ausblick	181
6.1	Zusammenfassung	181
6.2	Ausblick	185
	Glossar	187
	Abkürzungsverzeichnis	193
	Symbolverzeichnis	195
	Abbildungsverzeichnis	199
	Tabellenverzeichnis	203
	Literaturverzeichnis	205
	Verweise auf nicht öffentlich zugängliche Quellen	213

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

In den vergangenen Jahren ist das Thema vernetzter Industriemaschinen in Fertigungsbetrieben immer mehr in das Interesse der Forschung und Entwicklung gerückt. Unter dem Begriff Industrie 4.0 werden Konzepte zusammengefasst, die es erlauben sollen in einer automatischen Produktion Produkte mit Losgröße 1 zu erzeugen [1]. Der Montageablaufplan eines Werkstücks soll hier nicht von einem übergeordneten Leitsystem verwaltet, sondern mit dem zu bearbeitenden Objekt mitgeführt werden. Die eingesetzten Maschinen in einer solchen Umgebung sind als intelligente Agenten realisiert, die selbständig den Plan lesen, und anschließend die der Arbeitsstation zugeordneten Montageaufgaben ausführen können. Dabei trägt das Werkstück seinen Montageablaufplan im sogenannten „digitalen Produktgedächtnis“ [1] von Arbeitsstation zu Arbeitsstation mit sich. Auf dem Weg zu einer kostengünstigen Produktion ist die Automatisierung von Prozessen und Arbeitsschritten somit ein wichtiger Faktor, wodurch Durchlaufzeiten verkürzt werden können. Bei in Massenproduktion hergestellten Produkten ist die Einrichtungszeit, die zur Konfiguration und Programmierung von Maschinen benötigt wird, recht hoch. Dies gleicht sich jedoch durch die Anzahl der danach produzierten Güter wieder aus, da hierfür eine geringe Dauer erforderlich ist.

Im Prototypenbau bzw. bei der Erzeugung von Produkten mit kleinen Losgrößen sind Menschen unentbehrlich. Im Rahmen dieser Dissertation wird unter dem Begriff *Werker* der arbeitende Benutzer [2] verstanden. Lediglich aus Gründen der Vereinfachung wird die männliche Form des Begriffs Werker verwendet, obwohl der Bezug auf beide Geschlechter gemeint ist.

Mit ihrer Begabung zur Problemlösung, ihrer Geschicklichkeit und ihren kognitiven

Fähigkeiten sind Menschen am besten geeignet, um die für die Aufgabe der manuellen Montage erforderliche Flexibilität, Zuverlässigkeit und Anpassungsfähigkeit mit sich zu bringen. Ferner sind Werker sicherer im Umgang mit fehlerbehafteten Situationen, bei welchen unvorhergesehene Ereignisse und Situationen eintreten können. Hier sind sie besser in der Lage, ihre Fähigkeiten auf sich ändernde Aufgaben und Umgebungen anzupassen, als es mit Maschinen möglich wäre.

Bei der Produktion von komplexen Produkten in kleinen Stückzahlen kann sich der Montagevorgang je Los sowohl in der Dauer der Bearbeitung als auch in der Art der Durchführung unterscheiden. Ein Werkerassistenzsystem kann dazu eingesetzt werden, dem Menschen digitale Instruktionen anzuzeigen, damit er seine Montageaufgabe erfolgreich durchführen kann. Die Information, die ein solches Werkerassistenzsystem präsentiert, sollte aus dem Montageablaufplan des Produkts abgeleitet werden, damit bereits bei der Planung einer Produktvariante kein neuer Montageablaufplan erstellt werden muss. Ist der Montageablaufplan so gestaltet, dass dieser zusätzlich zur Montager Reihenfolge auch Arbeitsanweisungen für die manuelle Montage beinhaltet, so kann direkt hieraus die für den Menschen wichtige Information abgeleitet und von einem Assistenzsystem interpretiert werden.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Diese Dissertation befasst sich mit der Entwicklung eines Werkerassistenzsystems, das eine abstrakte Repräsentation für Montageablaufpläne, eine Komponente zur Erfassung der Werkeraktionen und eine Darstellungseinheit von Arbeitsanweisungen beinhaltet. Dieses Assistenzsystem soll den Werker bei seiner Tätigkeit in der industriellen manuellen Montage unterstützen, damit er seine Montageaufgabe erfolgreich bearbeiten kann. In Abbildung 1.1 sind die im Kontext dieser Dissertation untersuchten und realisierten Systemkomponenten schematisch dargestellt. Die Arbeit fokussiert sich auf drei Aufgabenschwerpunkte: die Repräsentation des Montageablaufplans (schwarz eingefärbt), die Erfassung der Werker-Tätigkeit (blau eingefärbt) und die Visualisierung der Assistenzinformation (rot eingefärbt).

Zur Unterstützung des Werkers mit Assistenzinformationen muss ein Assistenzsystem Wissen über den Vorgang haben, der gerade vom Werker durchgeführt wird. Entsprechend ist eine interne Repräsentation für die zu unterstützende Tätigkeit erforderlich. Als Anwendungsgebiet für das vorgestellte Assistenzsystem wurde der Bereich der manuellen Montage im industriellen Umfeld gewählt. Generell werden Montageanweisungen in diesem Anwendungsgebiet meist in Papierform bereitgestellt, die

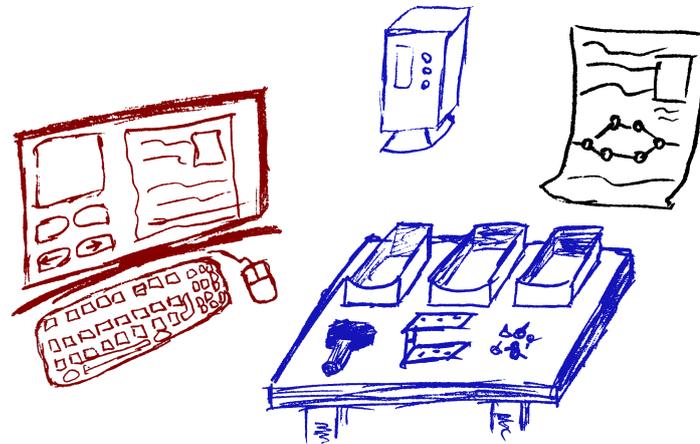


Abbildung 1.1: Komponenten des Werkerassistenzsystems - Die schematische Darstellung zeigt die Komponenten, die das entwickelte Werkerassistenzsystem beinhalten: Montageablaufplan-Repräsentation (schwarz), Erfassung der Werker-Tätigkeit (blau) und Visualisierung von Assistenzinformationen (rot).

jedoch unflexibel in Bezug auf Einzelproduktion und Kleinserienfertigung mit häufigen Wechseln oder Variationen in den Produktfamilien sind. Um in diesem Sektor konkurrenzfähig zu bleiben, muss mehr Flexibilität in die manuellen Arbeitsstationen gebracht werden. Damit auf Variationen bei der Produktion effizient reagiert werden kann, sind einfache Definitionen von Montageablaufplänen und die damit verbundenen Arbeitsanweisungen zu realisieren. Hierzu wird in dieser Dissertation ein Repräsentationsmodell vorgestellt, das skalierbar, adaptierbar und für den Menschen leicht verständlich ist. Dieses Modell wird in Kapitel 3 vorgestellt und anhand einer Testapplikation auf Anwendbarkeit überprüft.

Die zweite Komponente ist die Erfassung der aktuell beobachteten Tätigkeit des Werkers. Das Assistenzsystem muss immer wissen in welchem Arbeitsvorgang sich der Werker gerade befindet. Den notwendigen zu durchlaufenden Arbeitsprozess ermittelt das Assistenzsystem aus der gemachten Beobachtung in Kombination mit dem zuvor beschriebenen Montageablaufplan-Modell. Die Erkennung des aktuellen Arbeitsvorgangs erfolgt nicht-invasiv mittels Kamera-basierter Erfassung des Arbeitsbereichs. Aus den aufgezeichneten Daten werden relevante Informationen für das Assistenzsystem extrahiert und analysiert. Kapitel 4 behandelt die Implementierung von zwei exemplarischen Ansätzen jeweils mit Evaluierung. Die Ergebnisse dieser Versuche werden in Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 präsentiert und diskutiert.

Mit dem Wissen über die Montagetätigkeit und den Beobachtungen des erfassten

Geschehens in der manuellen Montage können dem Werker nun Assistenzinformationen als Unterstützung gegeben werden. Entsprechend ist ein Visualisierungssystem erforderlich, das diese Information aus dem Montageablaufplan extrahiert und darstellt. In Kapitel 5 werden zwei verschiedene Möglichkeiten der Visualisierung von Arbeitsanweisungen vorgestellt und diskutiert. Beginnend bei der klassischen Montage-Anleitung in Papierform wurde ein System entwickelt, das über ein Computerbasiertes GUI-System digitale Anleitungen darstellt. In der zweiten Ausbaustufe dieses Systems wird die Anzeige vom Monitor direkt in den Arbeitsbereich des Werkers mittels kontaktanaloger Informationsdarstellung gebracht. Die Anwendbarkeit dieser Darstellungsformen wurde in Nutzerstudien überprüft und evaluiert.

1.3 Gliederung

Diese Arbeit ist wie folgt gegliedert. In Kapitel 2 wird ein Einblick in relevante Aspekte der industriellen Produktion gegeben. Verschiedene Strukturformen von Arbeitsstationen werden beschrieben und diese Arbeit dazu thematisch eingeordnet.

Kapitel 3 behandelt die Repräsentation von Montageablaufplänen. Zunächst werden regelbasierte Programmiermethoden beschrieben und anschließend das entwickelte Konzept zur regelbasierten Definition von Montageablaufplänen vorgestellt. Dieses Konzept wird für ein Produktbeispiel in einer technischen Anwendung als Demonstrator implementiert und die Ergebnisse diskutiert.

In Kapitel 4 werden zwei Ansätze zur Erfassung der Werkeraktionen vorgestellt. Zum einen wird ein regelbasierter Ansatz beschrieben, der 3D-Merkmale mittels eines Zustandsautomaten auswertet. Das zweite Konzept verwendet ein Hidden-Markov-Modell zur Auswertung von 2D-Bewegungsvektoren. Jeder Ansatz wird gesondert evaluiert und abschließend die Ergebnisse diskutiert.

Kapitel 5 stellt zwei Konzepte zur Darstellung von Arbeitsanweisungen vor. Im ersten Konzept werden ausgehend von Arbeitsanweisungen in Papierform die für die Montage wichtigsten Informationen extrahiert und in ein GUI-System überführt. Die Erweiterung dieses Systems stellt das zweite Konzept dar. Hier erfolgt die Anzeige der Arbeitsanweisung direkt im Sichtbereich des Werkers mittels Beamerprojektion. Jedes Konzept wird in Probandenversuchen evaluiert und die Ergebnisse diskutiert.

Die Dissertation schließt in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung über die entwickelten Konzepte und Komponenten sowie den Ergebnissen zu den Versuchen. Schließlich wird ein Ausblick über mögliche zukünftige Anpassungen gegeben.

Relevante Aspekte der industriellen Produktion

Diese Dissertation befasst sich mit verschiedenen Methoden und Konzepten zur Erstellung eines digitalen Werkerassistenzsystems. Als Szenario wird die industrielle Produktion mit manueller Montage betrachtet. Der Werker soll bei der Durchführung seiner Montageaufgaben unterstützen werden.

Das Gebiet der industriellen Produktion kann vielseitig betrachtet werden. Unter dem Begriff der Fertigung kann die Herstellung einzelner Bauteile, die Montage mehrerer Bauteile zu Baugruppen aber auch die Fertigung von vollständigen Produkten verstanden werden. Dabei können die hergestellten Produkte und Produktfamilien unterschiedliche Losgrößen beinhalten. Außerdem sind Varianten innerhalb der Produktfamilie ebenso zu berücksichtigen. Im Folgenden wird zunächst eine Untergliederung der Produktionsverfahren anhand verschiedener Losgrößen von Produkten vorgenommen. Anschließend werden verschiedene Strukturformen von Arbeitsstationen erläutert. Nach der Einordnung der Forschungsarbeit dieser Dissertation in den Kontext der bearbeiteten Forschungsprojekte schließt dieses Kapitel mit einer Zusammenfassung.

2.1 Einfluss verschiedener Losgrößen auf die Produktionsverfahren

Unter dem Begriff der Produktion versteht man allgemein den Prozess der Kombination von Produktionsfaktoren hin zum fertigen Produkt. Spricht man von der montierenden Produktion, so wird meistens der Begriff der Fertigung gewählt [3].

2. RELEVANTE ASPEKTE DER INDUSTRIELLEN PRODUKTION

In der industriellen Produktion werden Produkte hergestellt. Bei der Montage eines Produkts werden jeweils zugehörige Fertigungsaufträge an die ausführende Abteilung im Unternehmen gestellt. Als Los wird ein Posten eines Produkts oder einer Baugruppe bezeichnet, der im Rahmen eines Fertigungsauftrages ohne Unterbrechung durch die Produktion anderer Produkte erzeugt wird [3].

Der Begriff der Produktion kann in unterschiedliche Produktionsverfahren je nach Komplexität des Fertigungsauftrages unterschieden werden. Die Auswahl des Produktionsverfahrens, das für das herzustellende Los eingesetzt wird, hängt unter anderem von der Anzahl der hergestellten Produkte gleichen Typs ab. Innerhalb eines Fertigungsauftrages wird mit dem Terminus Losgröße die Anzahl der angeforderten Posten des gleichen Produkts bezeichnet. Je nach Mächtigkeit dieser Losgröße werden unterschiedliche Produktionsverfahren eingesetzt.

In Schlegel [4] wurde eine Erhebung über den Anteil der verschiedenen Fertigungsarten in sächsischen Unternehmen erstellt. Schlegel teilt dabei in Abhängigkeit der Losgröße die Produktionsverfahren in die Einzelproduktion und Kleinserienfertigung, die Mittelserienfertigung, die Großserienfertigung und in die Massenproduktion ein. Betrachtet man die Art der Produkte, so ist eine weitere Unterteilung der Produktionsverfahren in Serienproduktion und Sortenproduktion möglich. Somit gibt es viele mögliche Einteilungen der Fertigung von Produkten in Varianten und unterschiedliche Losgrößen. Die kleinsten Elemente, die ein Produkt ergeben, werden in dieser Dissertation *Bauteile* genannt. Werden mehrere Bauteile zu einem Objekt zusammengeführt, entsteht durch diesen Vorgang eine *Baugruppe*. Ein Produkt wird somit aus mehreren Bauteilen und Baugruppen erzeugt.

2.1.1 Serien- und Sortenproduktion von Losen

In der industriellen Produktion gibt es verschiedene Kategorien, anhand derer Unternehmen sich in ihren Produktionsverfahren unterscheiden lassen. Unternehmen, die mehrere Lose eines Produkts herstellen, bedienen sich häufig Produktionsverfahren zur Serienproduktion oder Sortenproduktion.

Unter Serienproduktion versteht man die Fertigung von Produkten mit der Eigenschaft der Prozesswiederholung [3]. Bei dieser Art der Produktion werden Produkte größerer Losgröße hergestellt. Jedoch sind die Stückzahlen begrenzt. Verschiedene Produkte können hier nacheinander auf der gleichen Montagelinie oder parallel an verschiedenen Montagelinien produziert werden. Als Beispiel hierfür kann die Produktion in der Automobilindustrie angeführt werden.

Zur Serienproduktion vergleichbar ist die Sortenproduktion. Auch hier werden Produkte verschiedener Losgröße innerhalb der Montagelinie hergestellt. Die Stückzahlen sind auch bei der Sortenproduktion begrenzt. Hier werden Varianten einer Produktart nacheinander auf der gleichen Montagelinie in Losen hergestellt [3]. Als Beispiel hierfür kann die Produktion von Profilstahl verschiedener Größe genannt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Unterteilung der Produktionsverfahren ist die Unterscheidung basierend auf der Losgröße eines Produkts. Im Folgenden wird auf diese Einteilung näher eingegangen.

2.1.2 Einzelproduktion von Losen

In der Einzelproduktion werden nur spezielle Produkte hergestellt. Entsprechend ist bei dieser Produktionsform die Losgröße 1. Die Anforderungen an ein solches Produkt sind meist speziell auf Kundenwünsche und den Einzelfall zugeschnitten. Dabei spricht man auch von Auftragsfertigung [3]. Die Herstellung dieses Produkts erfordert daher eine hohe Spezialisierung und Flexibilität des herstellenden Betriebes. Meist stellen Sonderanfertigungen Produkte der Gruppe Einzelproduktion dar, da diese für einen Kunden nach dessen Wünschen und Spezifikationen entwickelt und produziert werden. Bei diesem Produktionsverfahren ist der Variantenreichtum hoch, da es je Ausführungsform nur ein Bauteil gibt, das hergestellt werden soll. Die Losgröße bei diesem Produktionsverfahren ist somit eins [4].

2.1.3 Kleinserienfertigung

Bei der Kleinserienfertigung werden Produkte mit geringen Losgrößen hergestellt. Die Kleinserienfertigung kann als Fortführung der Einzelproduktion gesehen werden. Bei diesem Produktionsverfahren sind die Produkte ebenfalls speziell an Kundenwünsche angepasst, werden aber in geringen Mengen benötigt. Auch hier weisen die herzustellenden Produkte eine hohe Variantenvielfalt auf, da sich die zugehörigen Kundenorder untereinander unterscheiden. Nach Schlegel [4] ist die Losgröße bei diesem Produktionsverfahren kleiner 20.

2.1.4 Mittelserienfertigung

Die Mittelserienfertigung stellt das Bindeglied von der Kleinserienfertigung hin zur Großserienfertigung dar. Die nach diesem Produktionsverfahren hergestellten Produkte sind ebenfalls auf Kundenwünsche zugeschnitten. Im Gegensatz zur Einzelproduk-

tion und Kleinserienfertigung sind jedoch die Auftragsvolumen größer. Laut Schlegel [4] werden Produkte hier auf Basis von Rahmenverträgen bestellt. Nach Schlegel [4] ist die Losgröße bei der Mittelserienfertigung im Bereich zwischen 20 und 1000 Losen einzuordnen.

Als Beispiel eines in Mittelserienfertigung hergestellten Produkts können Wechselrichter für Züge genannt werden. Bei solchen Wechselrichtern ist die Basisausführung meist identisch. Die Ausstattung eines solchen Wechselrichters variiert jedoch entsprechend den Anforderungen für den Einsatz in den jeweiligen Zügen. Hier ist entscheidend, in welchem Zugmodell diese Wechselrichter zum Einsatz kommen sollen.

2.1.5 Großserienfertigung und Massenproduktion

Bei der Großserienfertigung werden Produkte mit großen Losgrößen hergestellt. Diese Produkte werden in großen Mengen benötigt und weisen eine geringe Variantenvielfalt auf. Zudem wird bei diesem Produktionsverfahren häufig Lagerware produziert [4].

In der Massenproduktion werden größtenteils identische Erzeugnisse einer Produktlinie hergestellt. Am Beispiel des Kugelschreibers lässt sich dies sehr gut erkennen. Die einzelnen Produktionslinien eines Kugelschreibers unterscheiden sich meist nur in Form oder Ausführung voneinander. Verschiedene Varianten innerhalb der Produktlinie sind minimal, wie z. B. die Farbe des Gehäuses eines Kugelschreibers. Bei der Produktion einer Sorte aus dieser Produktlinie wird im Allgemeinen eine gewisse Menge einer Farbe hergestellt. Ist die Sollmenge erreicht, erfolgt der Wechsel auf die nächste Sorte. Dieser Zyklus kann sich entsprechend fortsetzen. Ferner kann die Herstellung von Verbrauchsmaterial, wie z. B. Schüttgut, der Massenproduktion zugeordnet werden.

Stellt ein Unternehmen nur noch ein bestimmtes Produkt in unbegrenzter Losgröße her, so wird dieses Unternehmen der Massenproduktion zugeordnet [3]. Nach Schlegel [4] treten Losgrößen > 1000 bei der Großserienfertigung und Massenproduktion auf.

2.2 Strukturformen verschiedener Montagesysteme

In Abschnitt 2.1 wurde die Einteilung der Produktionsverfahren anhand der herzustellenden Losgröße beschrieben. Ferner können Produktionsverfahren nach Art der Herstellung in verschiedene Strukturformen der Montagesysteme unterteilt werden. Aus der Komplexität des Produkts, der zu produzierenden Losgröße und anderen Faktoren,

ergeben sich folglich unterschiedliche Anforderungen, die das Montagesystem erfüllen muss. Lotter und Wiendahl geben in [5] einen Überblick über die wichtigsten Strukturformen von Montagesystemen. Die wesentlichen Inhalte dieses Überblicks werden in diesem Abschnitt zusammengefasst.

Mit dem Begriff Montageaufgabe wird die Montage eines komplexen Produkts bezeichnet. Eine Montageaufgabe besteht dabei aus mehreren Montagetätigkeiten, die durchgeführt werden müssen um das Produkt während eines Produktionszyklus herzustellen. Verschiedene anwendbare Strukturformen sind nach Lotter und Wiendahl [5] die Einzelplatzmontage, die Linienmontage, die Baustellenmontage, Montageinseln, automatisierte Montagesysteme und hybride Montagesysteme. Diese Verfahren werden im Folgenden beschrieben.

2.2.1 Einzelplatzmontage

Bei der Einzelplatzmontage werden alle Arbeitsvorgänge an einer Arbeitsstation durchgeführt. Dadurch entsteht die Notwendigkeit, alle für die Fertigstellung des Produkts erforderlichen Bauteile dort verfügbar zu haben. Außerdem müssen benötigte Werkzeuge ebenfalls an der Arbeitsstation vorhanden sein. Daraus ergeben sich Einschränkungen bezüglich der Produktgröße und dem Umfang der durchzuführenden Arbeitsvorgänge. Die involvierten Komponenten müssen dabei für den Werker ergonomisch angeordnet sein.

Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau einer Einzelplatzmontage. Hier ist exemplarisch eine Konfiguration einer Arbeitsstation mit dieser Strukturform dargestellt. Der Durchlauf der Bauteile durch diese Arbeitsstation während eines Arbeitsvorgangs erfolgt manuell. Im gezeigten Beispiel werden Bauteile zunächst von einer Palette in die Arbeitsstation eingeschleust (vgl. Abbildung 2.1 unten links). Die Bauteile sind in blau dargestellt. Anschließend arbeitet der Werker die notwendigen Arbeitsvorgänge ab. In diesem Beispiel wird ein rundes Objekt auf ein Bauteil montiert. Hat der Werker die Baugruppe erstellt, so wird diese mithilfe eines Rollenförderers abtransportiert (vgl. Abbildung 2.1 unten rechts).

Bei dieser Strukturform wird eine Baugruppe oder ein vollständiges Produkt an nur einer Arbeitsstation hergestellt. Somit ist es offensichtlich, dass die Losgröße der Produkte, die pro Schicht produziert wird, geringer ist, als bei anderen Strukturformen. Soll eine höhere Losgröße produzierte werden, so ist es erforderlich, mehrere Arbeitsstationen der Einzelplatzmontage simultan zu betreiben. Damit muss ebenfalls die Anzahl der benötigten Bauteile für die Herstellung des Produkts an jeder dieser Arbeitsstationen vorgehalten werden, was einen großen logistischen Aufwand bedeutet.

2. RELEVANTE ASPEKTE DER INDUSTRIELLEN PRODUKTION

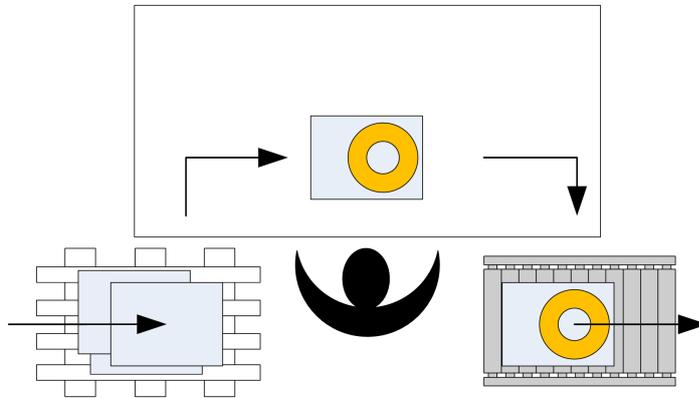


Abbildung 2.1: Einzelplatzmontage - Diese Abbildung zeigt die schematische Darstellung einer Einzelplatzmontage. Hier wird exemplarisch der Durchlauf von Bauteilen während eines Arbeitsvorgangs visualisiert. In diesem Beispiel werden die benötigten Bauteile mittels Palette in die Arbeitsstation eingeschleust. Nach Durchführung des Arbeitsvorgangs wird die erstellte Baugruppe unter Zuhilfenahme eines Rollenförderers abtransportiert. Abbildung in Anlehnung an Lotter und Wiendahl [5].

Diese Konfiguration wird in der Produktion für mittlere Arbeitsumfänge bei geringen Losgrößen gewählt.

In Tabelle 2.1 sind Vor- und Nachteile der Einzelplatzmontage nach Lotter und Wiendahl [5] gegenübergestellt. Die Strukturform der Einzelplatzmontage kann dem Be-

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile der Einzelplatzmontage - In dieser Tabelle ist ein Vergleich zwischen den Vor- und Nachteilen der Einzelplatzmontage gegeben.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ● sehr gute Flexibilitätseigenschaften ● geringer Planungs- und Steuerungsaufwand ● Möglichkeit zur individuellen Leistungsentfaltung der Werker 	<ul style="list-style-type: none"> ● hohe Investitionskosten ● niedrige Auslastung der Montage-Arbeitsmittel ● unterbrochener Materialfluss ● lange Einarbeitungszeiten der Werker ● beschränkte Eignung für Produkte mit hohen Losgrößen oder komplexen Montageaufgaben

griff manuelle Produktion zugeordnet werden. Bei diesem Produktionsverfahren sind ausschließlich menschliche Werker beteiligt. Es erfolgt keine maschinelle Unterstützung des Montagevorgangs z. B. durch Industrieroboter. Es handelt sich also um eine

rein manuell ausgeführte Montagetätigkeit. An dieser Stelle sei anzumerken: elektrifizierte Arbeitsmittel wie z. B. Bohrmaschinen können jedoch eingesetzt werden. Somit bedeutet die manuelle Arbeit die Bedienung oder Führung des Arbeitsmittels durch den Werker, wobei in diesem Kontext das Fehlen von Roboter-Unterstützung gemeint ist.

2.2.2 Linienmontage

Bei der Linienmontage erfolgt die Durchführung der Montageaufgabe an verschiedenen Arbeitsstationen. Die Montageaufgabe wird dabei in Arbeitsvorgänge unterteilt. Die Arbeitsvorgänge müssen sequenziell ausgeführt werden, um die Fertigstellung des Produkts zu gewährleisten. Im einfachsten Fall durchläuft das Produkt linear die einzelnen Arbeitsstationen.

Abbildung 2.2 zeigt die schematische Darstellung der Strukturform Linienmontage. Im abgebildeten Beispiel ist eine Montagelinie dargestellt, die mittels eines Materialflusssystemes die einzelnen Arbeitsstationen sequenziell verbindet. Vor der ersten

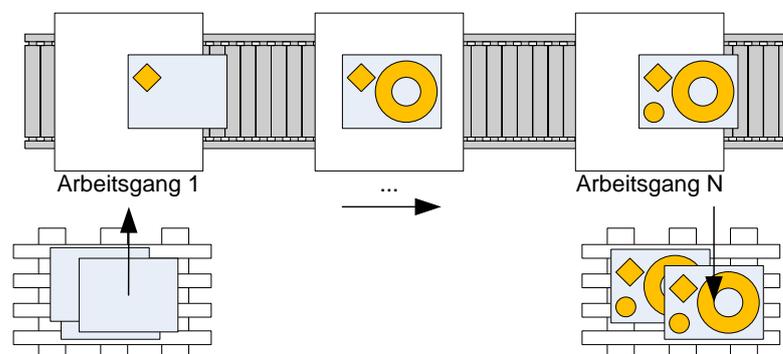


Abbildung 2.2: Linienmontage - Diese Abbildung zeigt die schematische Darstellung einer Linienmontage. Hier ist eine Montagelinie mit in Reihe geschalteten Arbeitsvorgängen zu sehen. Zu Beginn des Materialflusssystemes werden die Bauteile in die Anlage eingeschleust. In diesem Beispiel wird nach Durchlauf der Arbeitsstationen das fertige Produkt wieder auf Paletten verladen. Der Werker wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit in dieser Abbildung weggelassen. Abbildung in Anlehnung an Lotter und Wiendahl [5].

Arbeitsstation müssen die Bauteile in die Anlage eingeschleust werden. Das Produkt durchläuft nun alle Arbeitsstationen, an welchen die sequenziellen Arbeitsvorgänge ausgeführt werden. Abschließend wird das Produkt wieder auf Paletten verladen. Die

2. RELEVANTE ASPEKTE DER INDUSTRIELLEN PRODUKTION

Verbindung aller Arbeitsstationen über ein Materialflusssystem ergibt ebenfalls die zuvor beschriebene logische Abhängigkeit der zugeordneten Arbeitsvorgänge. Der Werker wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abbildung 2.2 weggelassen.

Sofern es die Montagetätigkeit erfordert, kann nach Lotter und Wiendahl [5] ein Linienmontage-System auch Abzweigungen, Alternativ- und Parallelplätze sowie Zusammenführungen enthalten. Schließlich müssen die Arbeitsvorgänge an den beteiligten Arbeitsstation aufeinander abgestimmt sein. Dies begründet sich dadurch, dass der erfolgreiche Arbeitsvorgang an einer Arbeitsstation den erfolgreichen und vollständigen Abschluss des Arbeitsvorgangs der vorherigen Arbeitsstation erfordert.

In Tabelle 2.2 sind Vor- und Nachteile der Linienmontage nach Lotter und Wiendahl [5] aufgeführt. Als Beispiel für eine Montageaufgabe mit der Strukturform Li-

Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile der Linienmontage - In dieser Tabelle ist ein Vergleich zwischen den Vor- und Nachteilen der Linienmontage gegeben.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• hohe Effizienz bei gleichbleibender Qualität• Eignung zur Automatisierung• eindeutiger Materialfluss• kurze Durchlaufzeiten• geringe Einarbeitungszeit der Werker	<ul style="list-style-type: none">• geringe Flexibilität (Losgröße, Varianten und Fertigungsablauf)• hoher Planungs- und Steuerungsaufwand• hohe Investitions- und Betriebskosten für Materialflusssysteme

nienmontage kann die Endmontage in der Fahrzeugindustrie betrachtet werden. Hier müssen zunächst die Fahrzeugachsen verbaut werden, bevor die Räder montiert werden können.

2.2.3 Baustellenmontage

Bei der Baustellenmontage werden mehrere Arbeitsvorgänge an einem festgelegten Montageort durchgeführt. Im Falle von komplexen Produkten kann die vollständige Montage an einem Ort ausgeführt werden. Aus der ortsfesten Bedingung ergibt sich die Anforderung, dass alle benötigten Bauteile und Baugruppen an der entsprechenden Arbeitsstation verfügbar sein müssen, um eine erfolgreiche Produktion zu ermöglichen.

Typische Repräsentanten von Produkten, die mit der Strukturform der Baustellenmontage hergestellt werden, sind komplexe Produkte mit hohem Volumen und kom-

plexen Montagetätigkeiten. Hierzu zählt beispielsweise die Montage von Schaltschränken. Ferner werden solche Produkte meist individuell nach Kundenwunsch hergestellt. Dabei kann es sich auch um Produkte mit Losgröße 1 handeln.

Abbildung 2.3 zeigt eine schematische Darstellung der Baustellenmontage mit exemplarisch gestalteten Konfigurationen von in Reihe angeordneten Arbeitsstationen. An jeder Arbeitsstation werden unterschiedliche Montagetätigkeiten durchgeführt. Diese Montagetätigkeiten können im gewählten Beispiel sequentiell oder parallel durchgeführt werden. In der dargestellten Konfiguration werden Bauteile jeweils

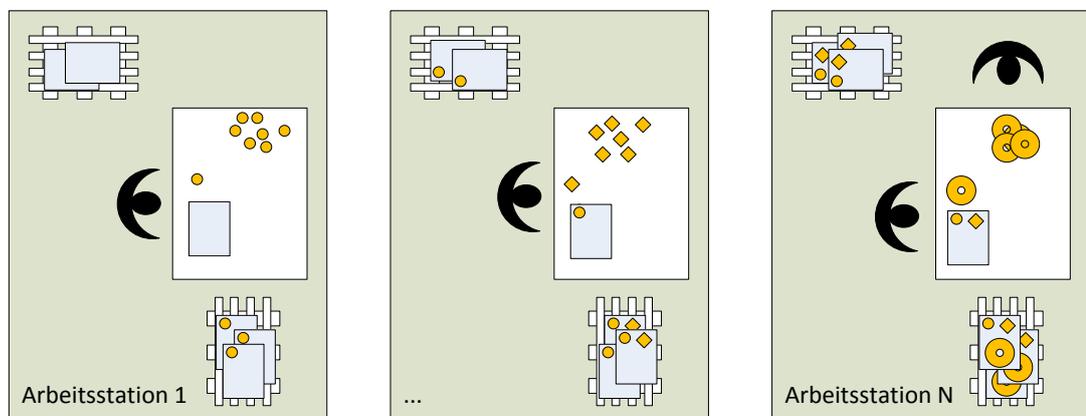


Abbildung 2.3: Baustellenmontage - Diese Abbildung zeigt die schematische Darstellung der Baustellenmontage. Hier ist exemplarisch eine mögliche Konfigurationen von in Reihe angeordneten Arbeitsstationen visualisiert. An jeder Arbeitsstation werden unterschiedliche Montagetätigkeiten durchgeführt. In dieser Abbildung ist dies durch Aufbringen unterschiedlicher geometrischer Formen auf das Produkt visualisiert. Abbildung in Anlehnung an Lotter und Wiendahl [5].

mittels Paletten zum Arbeitstisch verbracht (vgl. Abbildung 2.3 links oben je Arbeitsstation). Fertig gestellte Baugruppen werden ebenfalls mittels Paletten wieder ausgeschleust (vgl. Abbildung 2.3 rechts unten je Arbeitsstation). In diesem Beispiel ist die Montage des Produkts erst erfolgt, wenn das Produkt alle Arbeitsstationen durchlaufen hat. Dies ist hier durch Aufbringen unterschiedlicher geometrischer Formen auf das Produkt visualisiert. Der Materialfluss zwischen den Arbeitsstationen erfolgt durch Transport der Paletten.

Die vom Werker benötigten Arbeitsmittel sind bei dieser Strukturform möglichst universell ausgelegt. Die Arbeitsstationen sind dabei so entworfen, dass das Produkt gut zu erreichen ist. Damit werden komplexe Montagetätigkeiten ermöglicht. Außer-

2. RELEVANTE ASPEKTE DER INDUSTRIELLEN PRODUKTION

dem sollten die Arbeitsmittel mobil sein, da Werker diese zum Einsatzort mitführen müssen.

In Tabelle 2.3 sind Vor- und Nachteile der Baustellenmontage nach Lotter und Wiendahl [5] aufgeführt. Der Anspruch an die Werker ist bei dieser Konfiguration

Tabelle 2.3: Vor- und Nachteile der Baustellenmontage - In dieser Tabelle ist ein Vergleich zwischen den Vor- und Nachteilen der Baustellenmontage gegeben.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">● gute Flexibilitätseigenschaften, besonders bzgl. des Werker-Einsatzes● geringer Planungs- und Steuerungsaufwand● gute Eignung für großvolumige Produkte● gute Eignung für komplexe Montageaufgaben	<ul style="list-style-type: none">● hoher Platzbedarf● lange Durchlaufzeiten● aufwändiger Materialfluss● lange Einarbeitungszeit für die Werker

sehr hoch und erfordert ein hohes Produktverständnis. Die Montageablaufplanung und -steuerung fällt meistens recht grob aus. Die benötigten Bauteile werden zudem vorwiegend gemäß einem Auftrag bereit gestellt.

2.2.4 Montageinsel

Das Prinzip der Montageinsel beschreibt eine Arbeitsstation, der mehrere Montageaufgaben zugewiesen werden. Diese Montageaufgaben können in unterschiedlicher Reihenfolge an der Montageinsel durchgeführt werden und umfassen z. B. die Vor- und Endmontage einer vollständigen Produktfamilie. Dadurch entsteht die Notwendigkeit der vollständigen Verfügbarkeit aller benötigten Arbeitsmittel am Ort der Montage. Innerhalb der Montageinsel ist der Materialfluss häufig als Fließ-System realisiert. Auf den Einsatz eines elektrisch angetriebenen Verkettungsmittels wird soweit wie möglich verzichtet. Entsprechend werden Rollenförderer eingesetzt, auf welchen die Bauteile und Baugruppen von einem Arbeitstisch zum nächsten transportiert werden. Die Bewegung dieser Bauteile wird vom Werker durchgeführt. Die Reihenfolge der Arbeitsvorgänge ist dabei nicht vorgegeben, weshalb eine Baugruppe auch mehrfach den gleichen Arbeitstisch auf dem Fließ-System passieren kann.

Abbildung 2.4 zeigt den schematischen Aufbau einer Montageinsel. Hier ist ein ringförmiges Fließ-System im Zentrum der Arbeitsstation zu sehen. Die Baugruppen

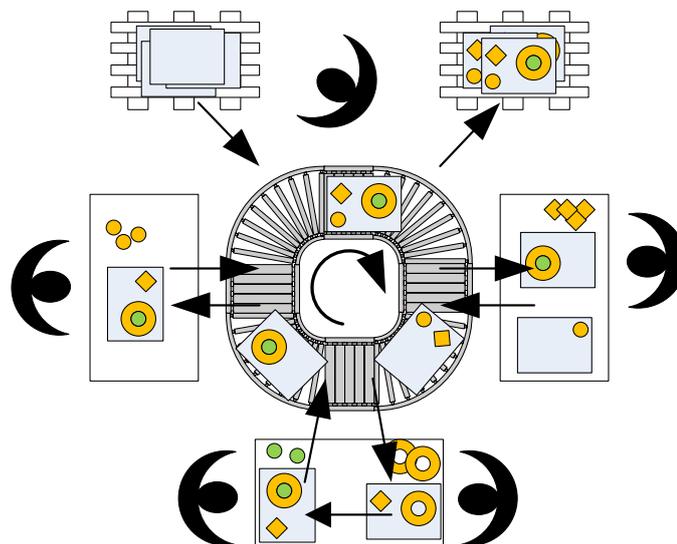


Abbildung 2.4: Montageinsel - Diese Abbildung zeigt die schematische Darstellung einer Montageinsel. Hier ist der exemplarische Durchlauf eines Produktbeispiels zu sehen. Die durchzuführenden Arbeitsvorgänge erfolgen hier an drei Arbeitstischen unabhängig voneinander. Die Reihenfolge der Arbeitsvorgänge ist nicht vorgegeben, weshalb eine Baugruppe auch mehrfach den gleichen Arbeitstisch auf dem Fließ-System passieren kann. Das Einschleusen der Bauteile und das Ausschleusen des fertigen Produkts ist im oberen Teil dargestellt. Abbildung in Anlehnung an Lotter und Wiendahl [5].

des herzustellenden Produkts können hier von den beteiligten Werkern manuell bewegt werden, was durch Einsatz von Muskelkraft erfolgt. Im gezeigten Beispiel sind drei Arbeitstische an das Fließ-System angeschlossen. Das Einschleusen der Bauteile und das Ausschleusen des Produkts wird hier von einem Werker durchgeführt (vgl. Abbildung 2.4 oben).

An jedem angeschlossenen Arbeitstisch werden die notwendigen Arbeitsvorgänge ausgeführt. Diese Arbeitsvorgänge können entweder parallel oder nacheinander durchgeführt werden. Im dargestellten Beispiel sind die Arbeitsvorgänge an den drei Arbeitstischen voneinander unabhängig. Ferner können die Montagetätigkeiten an einem Tisch ebenfalls parallel (vgl. Abbildung 2.4 linker und rechter Arbeitstisch) oder sequentiell (vgl. Abbildung 2.4 Arbeitstisch unten) durchgeführt werden.

In Tabelle 2.4 sind Vor- und Nachteile der Montageinsel nach Lotter und Wiendahl [5] aufgeführt. Im Allgemeinen arbeiten Montageinseln unabhängig von anderen

2. RELEVANTE ASPEKTE DER INDUSTRIELLEN PRODUKTION

Tabelle 2.4: Vor- und Nachteile der Montageinsel - In dieser Tabelle ist ein Vergleich zwischen den Vor- und Nachteilen der Montageinsel gegeben.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• sehr gute Flexibilitätseigenschaften• wenig Schnittstellen zu anderen Arbeitsstationen• gut geeignet für kleine und mittlere Stückzahlen• großer Handlungs- und Optimierungsspielraum für Werker	<ul style="list-style-type: none">• externer und interner Koordinationsbedarf• dezentralisierte Informations- und Kommunikationssysteme• lange Einarbeitungszeiten der Werker• Risiko der Produktivitätsschwankungen

Arbeitsstationen. Produkte, die mittels der Strukturform Montageinsel erzeugt werden, sind z. B. Heimwerkergeräte mit vielen Varianten.

2.2.5 Automatisierte Montagesysteme

Automatisierte Montagesysteme beinhalten keine Werker-Integration innerhalb des Montageprozesses. Bei diesem Konzept wird die Montageaufgabe ausschließlich von Maschinen durchgeführt.

Als Beispiel für diese Strukturform kann der Karosserie-Rohbau in der Automobilindustrie herangezogen werden. Dort verwendete Schweißzellen sind mit Industrierobotern ausgerüstet. Diese führen, aufgrund ihrer hohen Präzision, das Fügen und Befestigen der Bauteile durch. Dabei können Industrieroboter für eine bestimmte oder mehrere verschiedene Aufgaben eingesetzt werden. In der Großgeräte-Montage übernehmen Industrieroboter viele Montage- und Handhabungsaufgaben. Im Gegensatz dazu werden bei der Montage von kleinvolumigen Produkten verkettete Umlaufsysteme eingesetzt [5]. Da bei diesen Montagesystemen keine Beteiligung von Werkern vorgesehen bzw. erforderlich ist, erfolgt an dieser Stelle auch keine Beurteilung dieser Strukturform. Der Vollständigkeit halber sei sie jedoch erwähnt.

2.2.6 Hybride Montagesysteme

Unter hybriden Montagesystemen versteht man die Kombination verschiedener Strukturformen von Montagelinien. Häufig besteht diese Kombination aus der Integration von automatisierten und manuellen Arbeitsstationen. Ferner können dem Begriff

hybride Produktion Montagesysteme zugeordnet werden, bei welchen sowohl maschinell, als auch mit menschlicher Beteiligung Produkte hergestellt werden. Hybride Montagesysteme werden zunehmend bei Produkten mit mittlerer Variantenvielfalt und mittleren Losgrößen eingesetzt [5].

Abbildung 2.5 zeigt den schematischen Aufbau eines hybriden Montagesystems. In diesem Beispiel ist ein Materialflusssystem zentral linear angeordnet. An dieses Mate-

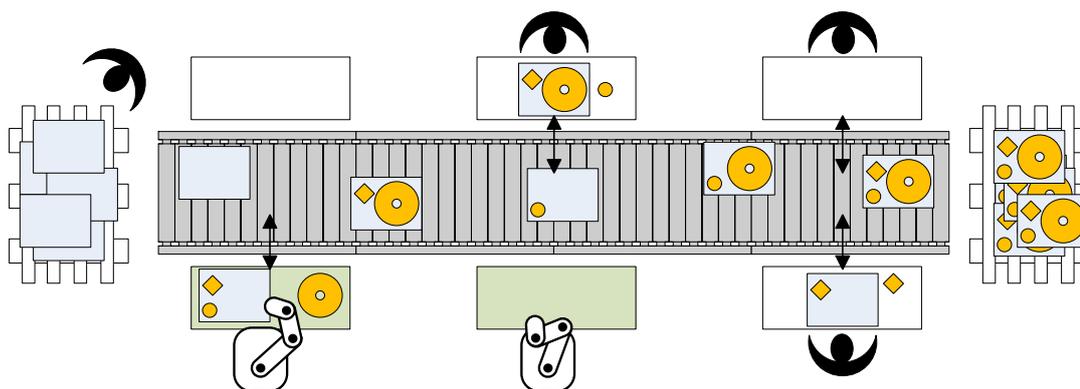


Abbildung 2.5: Hybrides Montagesystem - Diese Abbildung zeigt die schematische Darstellung eines hybriden Montagesystems. Exemplarisch ist hier das Zusammenspiel von automatisierten und manuellen Arbeitsstationen zu sehen. Weiß: manuelle Arbeitsstation, grün: automatisierte Arbeitsstation mit Industrieroboter. Jede Arbeitsstation kann flexibel zu- und abgeschaltet werden, was durch die Doppelpfeile angedeutet ist. Abbildung in Anlehnung an Lotter und Wiendahl [5].

Materialflusssystem sind verschiedene Arbeitsstationen angeschlossen. In Weiß sind manuelle Arbeitsstationen dargestellt, an welchen Werker die Montagetätigkeit ausführen. Ferner sind automatisierte Arbeitsstationen an das Materialflusssystem angeschlossen, an welchen Industrieroboter eingesetzt werden. Diese Industrieroboter-Zellen sind in Grün dargestellt. Jede Arbeitsstation kann flexibel zu- und abgeschaltet werden, was durch die Doppelpfeile in der Abbildung angedeutet ist. Das Einschleusen der Bauteile und das Ausschleusen der Produkte wird in diesem Beispiel manuell von Workern durchgeführt.

In Tabelle 2.5 sind Vor- und Nachteile der hybriden Montagesysteme nach Lotter und Wiendahl [5] aufgeführt. Die Montage eines Fahrzeugsitzes kann als Beispiel für diese Strukturform bei der Automobilfertigung herangezogen werden. Die Sitze werden beim Einbringen in das Fahrzeug von Industrierobotern gehalten. Der Industrieroboter nimmt die Sitzeinheit von der Palette auf und positioniert sie vor dem Fahrzeug. Anschließend führt der Werker die Sitzeinheit manuell in das Innere des Fahrzeugs

2. RELEVANTE ASPEKTE DER INDUSTRIELLEN PRODUKTION

Tabelle 2.5: Vor- und Nachteile der hybriden Montagesysteme - In dieser Tabelle ist ein Vergleich zwischen den Vor- und Nachteilen der hybriden Montagesysteme gegeben.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• hohe und gleichmäßige Ausbringungslleistung• keine logistische Unterbrechung zwischen automatisierten und manuellen Montagevorgängen• Potenzial zur Optimierung des Werker-Einsatzes• Potenzial zur hohen Stückzahlflexibilität	<ul style="list-style-type: none">• noch keine kooperative Roboterstation einsetzbar

und verwendet dabei den Industrieroboter als Handhabungshilfe. Der Industrieroboter wird bei diesem Vorgang durch Krafrückkopplung gesteuert, ist also ein passiv unterstützender Akteur. Dadurch wird der Werker bei der Ausführung seiner Tätigkeit entlastet.

2.3 Forschungsprojekte als Anwendungsszenarien

Die Realisierung der Konzepte des in dieser Arbeit vorgestellten Assistenzsystems wurde im Kontext der nachstehend genannten Forschungsprojekte durchgeführt und getestet.

2.3.1 CoTeSys-Projekte in der Kognitiven Fabrik

Zur Vereinigung von maschineller und manueller Fertigung wurde im Rahmen von CoTeSys: *Cognition for Technical Systems*¹ das Forschungsprojekt Kognitive Fabrik (*Cognitive Factory*) [6] ins Leben gerufen. Hier sollen kognitive Fähigkeiten in technische Systeme integriert und an einer Forschungsanlage realisiert werden. Bei der Kognitiven Fabrik handelt es sich um ein industrielles Produktionssystem mit entsprechend ausgelegten Arbeitsstationen. Diese Fabrikumgebung befand sich am Institut

¹<http://www.cotesys.org>

für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften an der Technischen Universität München.

ACIPE Ein Teilprojekt der Kognitiven Fabrik ist das Projekt ACIPE: *Adaptive Cognitive Interaction in Production Environments*¹. Der Fokus der Forschungsarbeit lag hier auf der Unterstützung von Werkern in der manuellen Montage. Dabei soll der Arbeiter ergonomisch und in intuitiver Weise zur richtigen Zeit mit benötigten Informationen versorgt werden, womit er bei der Durchführung seiner Tätigkeit unterstützt wird. Dadurch soll eine natürliche Interaktion mit dem Assistenzsystem realisiert werden. Abbildung 2.6 zeigt einen Versuchsaufbau aus dem Projekt ACIPE.

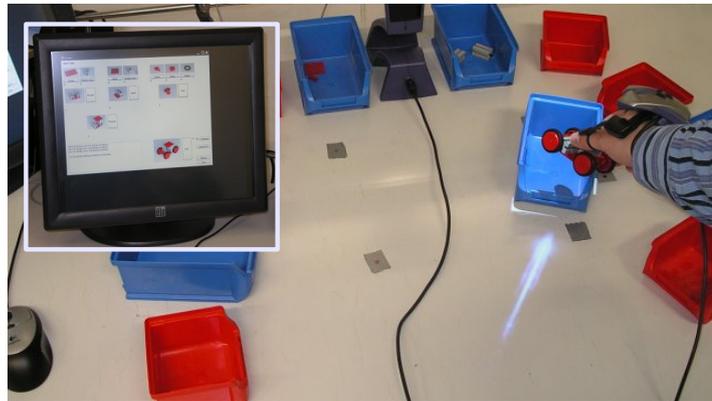


Abbildung 2.6: ACIPE Versuchsaufbau - Diese Abbildung zeigt eine Momentaufnahme einer manuellen Montage. Der Arbeiter bekommt in diesem Beispiel Assistenzinformationen auf einem berührungssensitiven Monitor angezeigt [7].

Herkömmliche Systeme zur digitalen Unterstützung in der manuellen Montage sind noch nicht gut genug, um eine ergonomische Arbeiterführung als Teil einer effizienten Montage zu realisieren. Bei der Verwendung von sequentiellen Montageabläufen kann nicht die erforderliche Steigerung der Produktivität erreicht werden. Geringe situative und flexible Unterstützung durch deterministische Arbeitsanweisungen solcher Systeme reduziert die Akzeptanz der Arbeiter.

Ein möglicher Lösungsansatz ist die Entwicklung von Assistenzsystemen mit adaptiv generierten Arbeitsanweisungen. Die Adaptivität ergibt sich in diesem Zusammenhang aus der Integration von für den Arbeiter relevanten, aus der Produktionsumgebung gewonnenen Daten, was die Entwicklung von Verfahren zur dynamischen Erzeugung

¹<http://www.cotesys.de/research/list-of-projects.html?projectid=23>

2. RELEVANTE ASPEKTE DER INDUSTRIELLEN PRODUKTION

von Montageablaufplänen erfordert. Zusätzlich sind Sensortechnologien erforderlich, die eine Beobachtung des Werkers in Echtzeit ermöglichen.

Eine interaktive Führung des Werkers durch seine Montageaufgabe erfordert eine dynamische Repräsentation der Montageablaufpläne welche aus dem Produktionsablauf abgeleitet werden und korrespondierend zu aktuell vorliegenden Bedingungen und dem Zustand des Produkts angepasst werden müssen.

JAHIR Das Projekt *JAHIR: Joint Action for Humans and Industrial Robots*¹ befasste sich mit der Integration von Industrierobotern in Mensch-dominierten Gebieten von Fertigungsprozessen. Arbeiten zur Mensch-Roboter Kooperation (MRK) bewegen sich auf einer Ebene, bei welcher der Industrieroboter nur eine passiv assistierende Rolle einnimmt, der Werker den Industrieroboter teleoperiert oder der Industrieroboter offline hinterlegte statische Programme abarbeitet. Um die Sicherheit für den Werker zu gewährleisten, sind Industrieroboter und Werker meistens durch Schutzeinrichtungen physikalisch strikt getrennt. Als Beispiel kann dazu die Automobilindustrie genannt werden. Hier werden menschliche Werker vollständig aus der automatisierten Produktionslinie herausgehalten. Auf der anderen Seite sind keine Industrieroboter an der manuellen Montage beteiligt.

Bei diesen Ansätzen wird noch nicht das Potential ausgenutzt, das Industrieroboter und Werker bei gemeinsamer Arbeit erreichen könnten. Solch eine MRK kann eine Steigerung der Effizienz mit sich bringen, da die Stärken beider beteiligten Parteien auf unterschiedliche Weise kombiniert werden können. Der Industrieroboter bringt Vorteile bei repetitiven Arbeiten unter hoher Genauigkeit mit sich. Erweitert durch die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des menschlichen Werkers sind Produktionsszenarien mit wechselnden Umgebungen denkbar, bei welchen individuelle Produkte herstellbar wären (vgl. Einzelproduktion, Abschnitt 2.1.2). Abbildung 2.7 zeigt den Versuchsaufbau aus dem Projekt JAHIR.

2.3.2 EU-Projekt CustomPacker

Das EU-Projekt *CustomPacker: Highly Customizable and Flexible Packaging Station for mid- to upper sized Electronic Consumer Goods using Industrial Robots*² zielte auf die Entwicklung und Integration eines skalierbaren und flexiblen Verpackungsassistenten ab, der menschlichen Werkern als Hilfsmittel dient. Das Produktionsszenario

¹<http://www.cotesys.de/research/list-of-projects.html?projectid=47>

²<http://www.custompacker.eu>



Abbildung 2.7: JAHIR Versuchsaufbau - Diese Abbildung zeigt eine Momentaufnahme eines gemeinsamen Arbeitsschritts von Werker und Industrieroboter. Der Werker wird in diesem Beispiel bei seiner Schraub-Aufgabe vom Industrieroboter durch Halten des elektrischen Bohrschraubers unterstützt.

ist hier die Assistenz bei der Verpackung von mittleren bis großen Produkten, vor allem aber schweren Gütern.

Elektronische Konsumgüter, wie z.B. Geschirrspüler, Fernseher, Toaster oder Mikrowellen, können eine große Anzahl an Varianten aufweisen und werden in den meisten Produktionsstätten händisch verpackt. Nur als Varianten in Massenproduktion mit hohen Losgrößen ist es effizient, eine Automatisierung der Verpackung einzuführen. Allerdings wird die Automatisierung der Verpackungsprozesse außerhalb der Massenproduktion angestrebt, da damit ein Rückgang der Produktionszykluszeit und damit der Kosten für die Produktion möglich wird. Auch für Produktionslinien mit mehreren Produktionsvarianten wäre das denkbar, so dass mehrere Produktionslinien zu einer reduzierten Anzahl von flexiblen Verpackungsstationen zusammengelegt werden könnten. Dies ermöglicht auch eine Optimierung im Hinblick auf die tatsächlichen Anforderungen der (verschiedenen) Waren (d.h. die Zahl der Artikel, die pro Tag produziert werden). Um die Realisierung dieser anspruchsvollen Ziele für eine hoch flexible Verpackungsstation zu erreichen, wurde in CustomPacker versucht, die anpassungsfähige Eigenschaft eines menschlichen Werkers zusammen mit der Präzision und der Fähigkeit zum Transport von Schwerlasten von Robotern zusammen zu bringen. Hier wurde eine Assistenzsystem integriert, das den Werker über die nächsten auszuführenden Verpackschritte informiert und somit eine Kooperation zwischen Mensch und Maschine ermöglicht. Abbildung 2.8 zeigt den Versuchsaufbau aus dem Projekt CustomPacker.



Abbildung 2.8: CustomPacker Versuchsaufbau - Diese Abbildung zeigt einen Werker, der einen Arbeitsablauf programmiert. Der Werker verwendet in diesem Beispiel ein Tablet, um seine Nutzereingaben zu tätigen.

2.4 Zusammenfassung der Grundbegriffe

Die in diesem Kapitel vorgestellten Produktionsverfahren und Struktursysteme für die industrielle Produktion unterscheiden sich jeweils in mehreren Punkten. Bei vielen der vorgestellten Methoden sind Nachteile in der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Produktionslinien zu erkennen. Adaptierbarkeit zu neuen Produktfamilien oder sogar Produkten bzw. Varianten der Losgröße 1 stellt eine Herausforderung an diese Produktionsverfahren dar. Ferner weisen die vorgestellten Strukturformen auch Nachteile in Bezug auf die Einarbeitungszeit der Werker in die Montage neuer Produkte auf.

Ein möglicher Ansatzpunkt, mehr Flexibilität in Bezug auf Variantenreichtum der Produkte zu erlauben, ist die technische Unterstützung des Werkers an seinem manuellen oder hybriden Arbeitsplatz. Da hierzu eine Produktionslinie mit hohem Grad an Abwechslungsreichtum erforderlich ist, siedelt sich diese Arbeit im Bereich der Kleinserienfertigung bis hin zur Einzelproduktion an – mit dem Schwerpunkt auf der rein manuellen Einzelplatzmontage. Die Gestaltung der Arbeitsstation entspricht im Kontext dieser Arbeit im weitesten Sinne dem Layout der Baustellenmontage. Der Werker soll verschiedene Produkte an seinem Arbeitsplatz produzieren und die zu verwendenden Bauteile frei auf dem Tisch verteilen können. Hierzu eignet sich dieses Layout, wobei auch eine Montageinsel ohne Materialflusssystem denkbar wäre.

Wissensbasierte Repräsentation von Montageablaufplänen

Die korrekte Montage von Produkten wird anhand von Ablaufvorschriften durchgeführt, die auch als Montageablaufpläne bekannt sind. Zur Realisierung eines Werkerassistenzsystems ist es notwendig, eine technische Repräsentation zu definieren, die den Fertigungsprozess ganzheitlich oder in relevantem Umfang abbildet, damit es dem Werker eine adäquate Hilfestellung geben kann. Anhand dieser Repräsentation kann anschließend die zu Grunde liegende Ablaufvorschrift für einen Montageablaufplan maschinell interpretiert und weiter verarbeitet werden. Generell wird mit Montageablaufplänen der Ablauf von Montagetätigkeiten beschrieben, die Werker in einer industriellen Produktion auszuführen haben. Dieses Kapitel befasst sich mit Montageablaufplänen in der industriellen Produktion. Ferner wird der im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Ansatz zur abstrakten Repräsentation von Montageablaufplänen beschrieben.

3.1 Montageablaufpläne in der industriellen Produktion

Die Strukturformen der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Montagesysteme sind vom Aufbau ähnlich gestaltet. Bei jeder dieser Strukturformen werden in einem Bereich Bauteile und/oder Baugruppen in die Montagelinie eingeschleust. Die Bearbeitung/Montage erfolgt dann an den angeschlossenen Arbeitsstationen. Ist das produzierte Los vollständig hergestellt, so wird es wieder ausgeschleust.

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Es gibt mehrere Ansätze, um den zwischen dem Ein- und Ausschleusen stattfindenden Montageprozess zu beschreiben. Nach Dangelmaier [8] versteht man unter dem Begriff Montageprozess die Zusammenfassung von Vorgängen, die aus mehreren Bauteilen verschiedener Identität ein Produkt mit neuer Identität erzeugen. Dieser Prozess wird im Folgenden auch mit dem Begriff *Montageaufgabe* bezeichnet. Die wesentliche Eigenschaft von Montageaufgaben liegt darin, dass ein Arbeitsvorgang nur abgeschlossen werden kann, wenn alle erforderlichen Bauteile verfügbar sind. Daraus entsteht die Notwendigkeit, dass alle benötigten Bauteile am Montageort bereit stehen.

Für das Anwendungsgebiet der Montage besteht laut Müller [9] ein Arbeitsvorgang meist aus dem Zusammenfügen von Bauteilen und Baugruppen. Diese Vorgänge werden mittels einer Montageablaufstruktur beschrieben. Innerhalb dieser Beschreibungsform für die Montageaufgabe sind auch die Abhängigkeiten der durchzuführenden Montagetätigkeiten enthalten.

Generell kann nach Spur und Stöferle [10] die Struktur des Montageablaufs in die *Aufgabengliederung* und die *Ablaufgliederung* unterteilt werden. Die Aufgabengliederung spiegelt die Unterteilung der Montageaufgabe in mögliche Montagetätigkeiten wider. Dabei werden Teil- bzw. Unteraufgaben definiert. Somit wird eine zweckgerichtete Planung ermöglicht. Diese Aufteilung der Montagetätigkeiten wird je nach Produktionsverfahren (Einzelproduktion, Kleinserienfertigung, Mittelserienfertigung, Großserienfertigung oder Massenproduktion; vgl. Abschnitt 2.1) unterschiedlich detailliert vorgenommen. In der Großserienfertigung und Massenproduktion erfolgt die Aufgabengliederung auf Ebene der Arbeitsvorgänge [10]. Ein Arbeitsvorgang wird bei dieser Art der Produktion im Allgemeinen mit mehreren Montagetätigkeiten beschrieben. Beispiele hierfür sind Tätigkeiten wie *Greifen* oder *Bringen*. Die bei einer Montagetätigkeit durchzuführenden Aktionen sind auch in VDI Richtlinie 2860 [11] definiert. Ein Beispiel für eine Gliederung in Arbeitsvorgänge zeigt Tabelle 3.1 nach Spur und Stöferle [10]. Nach erfolgreicher Ausführung eines Arbeitsvorgangs muss ein

Tabelle 3.1: Aufteilung von Montageprozessen - Diese Tabelle zeigt ein Beispiel zur Aufteilung von Montageprozessen in Arbeitsvorgänge [10]

lfd. Nr.	Arbeitsvorgang
1	Ober- und Unterteil zusammenlegen; 2 Schrauben M 8 x 20 ansetzen.
2	Elektroschrauber aufnehmen; 2 Schrauben M 8 x 20 anziehen.

definierter Zustand im Montageablaufplan erreicht werden. Somit ist die reibungslose Fortsetzung der Montageaufgabe im darauf folgenden Arbeitsschritt gewährleistet. In

Tabelle 3.1 ist die logische Abfolge der Arbeitsvorgänge anhand der laufenden Nummer zu erkennen. Mit dieser Vorgehensweise könnten Werker einer anderen Arbeitsstation ebenfalls die Montageaufgabe bei der aktuellen laufenden Nummer fortsetzen.

Wurde die Montageaufgabe in Arbeitsvorgänge zerlegt, so muss die logische Reihenfolge der ermittelten Arbeitsvorgänge festgelegt werden. Diese Maßnahme wird als Ablaufgliederung bezeichnet. Die Ablaufgliederung veranschaulicht die logische und zeitliche Aufeinanderfolge der Arbeitsvorgänge. In Tabelle 3.1 ist ersichtlich, dass ein Arbeitsvorgang mit hoher laufender Nummer einem Arbeitsvorgang mit niedriger laufender Nummer folgen muss.

Die technische Abbildung von Vorgängen in der Montage ist ein relevantes Thema für diese Dissertation. Eine Möglichkeit, solche Montageablaufpläne zu repräsentieren, ist die Verwendung von Montagevorranggraphen. Prenting und Battaglin haben Montagevorranggraphen in den sechziger Jahren zum ersten Mal beschrieben [9]. Nach Spur und Stöferle [10] wird ein Vorranggraph von links nach rechts gelesen.

Dangelmaier beschreibt in [8] die Zusammenfassung von elementaren Arbeitsvorgängen in Vorranggraphen. Dazu werden an Fließlinien durchgeführte Arbeitsschritte abgetaktet und einer Menge linear aufeinanderfolgender Arbeitsstationen zugeordnet. Dabei ist ein Vorranggraph ein gerichteter zyklenerfreier Graph, dessen Knoten Arbeitsschritte beschreiben. Verbunden sind die Knoten mit gerichteten Kanten. Diese geben die Abhängigkeitsbeziehungen an [12], in welcher Reihenfolge die Arbeitsschritte erfolgen müssen, um die Montage erfolgreich durchführen zu können. Die zeitliche Abfolge von Arbeitsvorgängen kann ebenfalls mittels Vorranggraphen beschrieben werden. Man bedient sich dazu einer hierarchischen Definition dieser Graphen.

Zur Erstellung eines Vorranggraphen wird nach Lotter und Wiendahl [5] die Montageaufgabe aus der Struktur der zu montierenden Bauteile und den vorhandenen oder neuen Montagetechnologien abgeleitet. Dazu wird das fertige Produkt gedanklich in seine Bauteile zerlegt. So kann mittels Analyse dieser dabei entstehenden Bauteile auf den Montagezeitpunkt zurück geschlossen, und der Vorranggraphen zeitlich invers zum Montagevorgang konstruiert werden. Für unterschiedliche Ausführungen von solchen Produktfamilien können dann mit Abwandlungen an entsprechender Stelle neue Vorranggraphen erstellt werden, die mehrere Varianten beinhalten können.

3.2 Montageablaufplan-Konzept

Aus den Eigenschaften der Montagestrukturplanung und Repräsentation von Montageablaufplänen lassen sich grundlegende Eigenschaften ableiten. Diese Eigenschaf-

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

ten gelten im Allgemeinen für alle vorgestellten Verfahren in der einfachsten Form. Einzel- oder Teilprozesse werden immer in logischer bzw. produktspezifischer Reihenfolge verkettet. Vorbedingungen zur weiteren Durchführbarkeit der Montageaufgabe müssen erfüllt sein, damit Werker ihre Arbeit durchführen können. Außerdem müssen bearbeitete Arbeitsschritte korrekt ausgeführt werden, damit der aktuelle Schritt als vollständig ausgeführt betrachtet werden kann.

Aus dieser Beobachtung ergibt sich eine grundlegende Repräsentationsform, die bei der Beschreibung von Montageprozessen hinzu gezogen werden kann: Ein Arbeitsschritt ist abhängig von den zeitlich davor durchzuführenden Baugruppenmontagen. Als Attribute eines Arbeitsschritts sind Informationen zu definieren, die zur gerade ausgeführten Aktion gehören. Diese Informationen werden in der Definition hinterlegt und können z. B. die vom Werker auszuführende Tätigkeit in Form einer bildlichen Darstellung oder einer natürlichsprachlichen Audiodatei beschreiben.

Ein weiteres Attribut in der Definition des gerade betrachteten Arbeitsschritts ist das Hinterlegen der notwendigen Vorbedingungen. Somit ist es vergleichsweise einfach, neue Montageablaufpläne zu erstellen. Der beauftragte Planer muss immer nur den aktuellen Arbeitsschritt im System hinterlegen. Dazu erfasst er, was zu tun ist und wie. Die Medien, die diesen Schritt erklären, werden in der Definition des aktuellen Schritts hinterlegt. Diese Medien können dann von einem entsprechenden Werkerassistenzsystem ausgelesen und verarbeitet werden.

Mit der entwickelten Repräsentationsform wird bei der Erstellung des Montageablaufplans Baugruppenweise vorgegangen. So wird jeder durchzuführende i -te Arbeitsschritt einzeln betrachtet und die zu erfüllenden N Vorbedingungen gemäß dem Muster

$$[\text{Vorbedingung}_1^i, \dots, \text{Vorbedingung}_N^i] \Rightarrow \text{Arbeitsschritt}^i$$

definiert. Der gesamte Ablaufplan muss so nicht permanent bei der Planung bedacht werden, da sich dieser aus den vollständigen Abhängigkeiten jedes Arbeitsschritts anschließend automatisch rekursiv erzeugen lässt. Der so erzeugte Montageablaufplan muss dann vom Assistenzsystem durchlaufen werden, damit alle notwendigen Schritte vom Werker ausgeführt werden.

Wie in Abschnitt 2.4 bereits erwähnt wurde, soll eine Assistenzsystem für die manuelle Montage flexibel einsetzbar sein. So soll auch die Adaptierbarkeit des Montageablaufplans an neue Produkte oder Produktfamilien leicht realisierbar sein. Dies ist mit dem hier vorgestellten rekursiven Ansatz möglich. Zusätzlich kann der Detailgrad der enthaltenen Informationen beliebig angepasst werden und auch produktspezifisch variieren. Durch den generischen Ansatz für die entwickelte maschinenlesbare

Datenstruktur ist eine Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit gewährleistet. Im Folgenden wird die entwickelte regelbasierte Interpretation von Montageablaufplänen beschrieben. Auf die Verwendung der hinterlegten Information wird gesondert in Kapitel 5 eingegangen.

3.3 Regelbasierte Interpretation von Montageablaufplänen

Im Fachgebiet der künstlichen Intelligenz ist ein Expertensystem ein Computersystem, das die Entscheidungsfindung eines menschlichen Experten nachahmen kann. Um mit einem solchen System komplexe Probleme lösen zu können, ist eine Wissensbasis erforderlich. Ein Expertensystem verwendet dieses Wissen, um Schlussfolgerungen aus gemachten Beobachtungen zu ziehen und somit die ihm übertragene Aufgabe zu bewältigen.

Die Struktur eines Expertensystems unterscheidet sich von konventionellen Programmen grundlegend. Im Allgemeinen verfügt ein Expertensystem über zwei unabhängige Komponenten: den statischen Inferenz-Mechanismus und die flexible Wissensbasis [13]. Die Wissensbasis ist ein Datensatz, der das zu erfassende Wissen abbildet. Diese Regeln können als natürlich sprachliche „Wenn-Dann-Regeln“ formuliert werden. Dies erleichtert dem Menschen aufgrund des intuitiven Zugangs den Umgang mit der Wissensbasis. Der Inferenz-Mechanismus einer logischen Programmiersprache erstellt aus dieser Wissensbasis Schlussfolgerungen und wertet diese basierend auf Aspekten aus. Ferner ist es mit dem Einsatz von logischen Programmiersprachen möglich, neues Wissen aus bestehendem Wissen zu generieren.

3.3.1 Aspekte von Programmierung mit Logik

Die Wissensrepräsentation innerhalb eines Expertensystems erfolgt mittels Fakten. Diese Fakten beschreiben die auszuwertenden Sachverhalte und Beobachtungen, die häufig mittels einfacher Regelsätze im System hinterlegt werden. Hanus stellt zur Erklärung der Funktionsweise eines Expertensystems ein Beispiel vor, das mit der Programmiersprache „Programmieren in Logik“ (PROLOG) umgesetzt ist und in diesem Abschnitt analog zu Hanus wiedergegeben wird [14].

Der vorgestellte Anwendungsfall beschreibt die Verwandtschaftsbeziehungen innerhalb eines Stammbaums (siehe Abbildung 3.1). Über die Angabe von Beziehungen

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

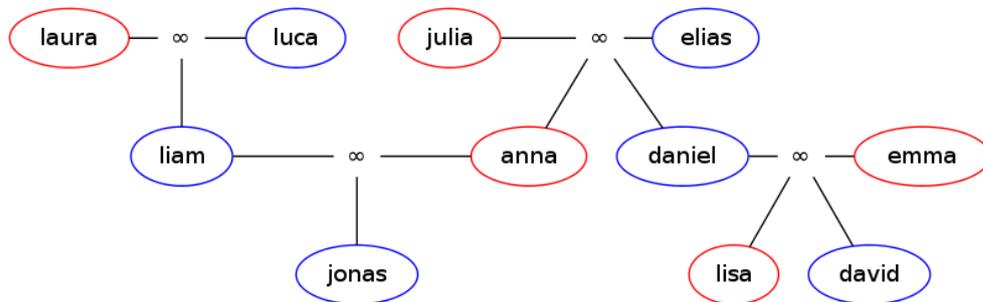


Abbildung 3.1: Beispiel eines Stammbaums - Die weiblichen Familienmitglieder sind rot eingefasst, männliche in blau. Die Heiratsbeziehungen sind mit dem Symbol ∞ vermerkt. Abbildung in Anlehnung an Hanus [14].

zwischen den einzelnen Personen innerhalb der Familie können Eigenschaften abgefragt werden. Bezogen auf einen Montageablaufplan entsprechen die familiären Beziehungen des im Folgenden beschriebenen Beispiels den Abhängigkeiten in der Abfolge der Arbeitsschritte. Um Baugruppen montieren zu können, sind gewisse Vorbedingungen zu erfüllen. Diese Vorbedingungen können im weitesten Sinne als Heiratsbeziehung im Kontext des vorgestellten Stammbaum-Beispiels verstanden werden.

Zur Vereinfachung wird angenommen, dass Kinder ausschließlich aus einer Heiratsbeziehung hervorgehen. Für die Beschreibung des Stammbaums ist es ausreichend zu wissen, welches Geschlecht eine Person hat, wer die Mutter dieser Person ist und mit wem die Mutter verheiratet ist. Im vorliegenden Beispiel sind fünf Frauen (julia, laura, emma, anna und lisa) und sechs Männer (elias, luca, daniel, liam, david und jonas) angegeben. Die Geschlechter der Personen werden im Arbeitswissen wie folgt definiert:

```
weiblich(julia).  
maennlich(elias).
```

Für die restlichen Personen gilt diese Definition analog. Die Heiratsbeziehung und die Mutterschaft sei folgendermaßen definiert:

```
verheiratet(julia, elias).  
istMutterVon(julia, daniel).
```

Ferner ist laura mit luca, emma mit daniel und anna mit liam verheiratet. julia ist Mutter von anna, laura von liam, emma von lisa und von david, und anna von jonas. Mit diesem Wissen ist der betrachtete Stammbaum aus Abbildung 3.1 ausreichend definiert.

Um nun eine Vater-Kind-Beziehung aus dieser Wissensbasis zu extrahieren, muss folgende Regel angelegt werden: daniel ist mit emma verheiratet; emma ist die Mutter von lisa. Dies wird in PROLOG mit

3.3 Regelbasierte Interpretation von Montageablaufplänen

```
istVaterVon(daniel, lisa) :-  
    verheiratet(emma, daniel), istMutterVon(emma, lisa).
```

abgebildet. Unter der Annahme, dass `anna` und `daniel` die gleiche Mutter haben und `anna` weiblich ist, lässt sich ableiten, dass `anna` Schwester von `daniel` ist. Damit entsteht die Regel

```
istSchwesterVon(anna, daniel) :-  
    weiblich(anna),  
    istMutterVon(julia, anna),  
    istMutterVon(julia, daniel).
```

Aus dieser Regel lässt sich wiederum ableiten, dass `anna` eine Tante von `lisa` ist:

```
istTanteVon(anna, lisa) :-  
    istSchwesterVon(anna, daniel), istVaterVon(daniel, lisa).
```

Damit das Expertensystem eine Antwort auf die Frage, ob `anna` wirklich eine Tante von `lisa` ist liefern kann, muss es das Regelwerk iterativ überprüfen. Nur wenn alle Voraussetzungen ein positives Ergebnis liefern, ist die Antwort auch positiv.

Das vorgestellte Beispiel funktioniert so lange, wie es Regeln für die hinterlegten Personennamen findet. Möchte man auch Verwandtschaftsbeziehungen von anderen Personen abfragen, die nicht direkt abgelegt sind, müssen die Regeln verallgemeinert werden. Dies erreicht man in PROLOG durch die Einführung von übergeordneten Typklassen für Variablen. Über die Zuordnung von Personen zu diesen Typklassen sind allgemeine von Personennamen unabhängige Regeln definierbar. Anschließend können mit Klarnamen dann wiederum echte Verwandtschaftsbeziehungen ermittelt werden. Um dies zu erreichen, sind Anpassungen am Regelwerk erforderlich.

Die Verwendung von Variablen in PROLOG funktioniert analog zur Definition von Fakten und macht eine Namensauflösung der Personen überflüssig. Die Frage, ob `anna` eine Tante von `lisa` ist, erfordert nur zu wissen, ob `anna` eine Schwester von `lisa`s Vater ist. In PROLOG-Notation sieht diese Regel wie folgt aus:

```
istTanteVon(anna, lisa) :-  
    istSchwesterVon(anna, Vater), istVaterVon(Vater, lisa).
```

Unter der Annahme, dass nur verheiratete Paare Kinder haben, kann mit der allgemeinen Regel

```
istVaterVon(Vater, Kind) :-  
    verheiratet(Mutter, Vater), istMutterVon(Mutter, Kind).
```

die Vaterschaftsbeziehung über die `Mutter` zurückverfolgt und aufgelöst werden. Mit dieser Vorgehensweise können nun entsprechend die Regeln `istSchwesterVon` und `istTanteVon` verallgemeinert werden.

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

```
istSchwesterVon (Schwester, Person) :-  
    weiblich (Schwester),  
    istMutterVon (Mutter, Schwester),  
    istMutterVon (Mutter, Person) .
```

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, dass in der Regel `istSchwesterVon` noch zu überprüfen ist, ob die Variablen `Schwester` und `Person` identisch sind. Rein logisch betrachtet ist `lisa` auch ihre eigene Schwester. Für die Auflösung weiterer Fakten macht dies jedoch keinen Sinn. Entsprechend müssen solche Ergebnisse mittels Vergleichsoperatoren entfernt werden.

Mit einer der Geschwister-Regel kann nun eine allgemeine Regel für die Verwandtschaftsbeziehung dritten Grades erstellt werden:

```
istTanteVon (Tante, Person) :-  
    istSchwesterVon (Tante, Vater), istVaterVon (Vater, Person) .  
istTanteVon (Tante, Person) :-  
    istSchwesterVon (Tante, Mutter), istMutterVon (Mutter, Person) .
```

Anzumerken sei hier, dass die Regel `istTanteVon` sowohl über die Mutter-Kind- als auch über die Vater-Kind-Beziehung hergestellt werden kann. Entsprechend wurde hier eine zweite Regel eingeführt. Mit dieser Anpassung sind nun ebenfalls Anfragen an das Expertensystem über Variablen möglich. Wird das Expertensystem nach weiblichen Personen gefragt, so wird es eine Liste aller möglichen Antworten liefern.

3.3.2 Realisierung eines Expertensystems in der Java Expert System Shell (Jess)

Die technische Auslegung wurde in dieser Dissertation als Expertensystem realisiert. Das Konzept der rekursiven Datenstruktur des Montageablaufplans wurde in der Programmiersprache Java Expert System Shell (Jess)¹ in Java umgesetzt. Damit ist es möglich, regelbasierte Programmierung vorzunehmen und bereits bestehende Java-Klassen einzubinden bzw. Jess-Klassen in Java-Programme zu integrieren. Ein Wissensassistent besteht in Jess aus dreierlei Komponenten: *Tatsachen*, einem *Regelwerk* und *Abfrageroutinen*.

Die erste Datenbasis enthält *Tatsachen*, die in Jess *Facts* (Jess Facts) genannt werden. Wie in PROLOG definieren die Jess Facts die Wissensgrundlage, auf welcher später Anfragen verarbeitet und ein Ergebnis erzeugt wird. Die Ablage von Jess Facts in der Wissensgrundlage erfolgt immer anhand einer Vorlagendefinition. Anhand dieser Vorlage wird bestimmt, welche Eigenschaften ein Faktum enthalten kann. Ebenfalls

¹<http://www.jessrules.com>

wird hier definiert, welches Datenformat ein Datum haben darf, z. B. Integer-Werte für Zahlen:

```
(Vorlage v (Eigenschaft 1) [... (Eigenschaft N)] )
```

Eine Eigenschaft kann auch eine Liste von Werten sein. Somit müssen für Eigenschaften gleichen Typs nicht mehrere einzelne Eigenschaften angelegt werden. Zur Laufzeit wird diese Wissensgrundlage in ein Arbeitswissen übertragen. Das Arbeitswissen wird während der Laufzeit ausgewertet und gegebenenfalls mit weiteren Fakten aktualisiert.

Die zweite Datenbasis stellt ein *Regelwerk* dar. Diese Regeln werden in *Jess Rules* (Jess Rules) genannt. Mittels der Jess Rules werden Zusammenhänge definiert und spezifiziert. Dabei folgt die Definition einer Jess Rule immer dem gleichen Schema:

```
(Regel r
  (Vorbedingung 1)
  ...
  (Vorbedingung N)
=>
  (Aktion 1)
  [... (Aktion N)]
)
```

Beim Durchlauf der Jess Rule wird das Jess-System stets überprüfen, ob alle Vorbedingung zutreffen. Ist dies der Fall, so werden die zugehörigen Aktionen durchgeführt. Hat eine Aktion Auswirkungen auf die Fakten im Arbeitswissen, so wird das Arbeitswissen entsprechend aktualisiert. Anschließend erfolgt die erneute Auswertung des Regelwerks mit diesem aktualisierten Wissen. Hier erfolgt auch die Überprüfung, ob mögliche Änderungen am Arbeitswissen eine erneute Auswertung von Jess Rules erfordert, indem die Vorbedingungen erneut verarbeitet werden.

Als dritte Komponente von Jess werden *Abfrageroutinen* verwendet. Diese Abfragen werden Jess Queries (engl. für *Abfrage*) genannt und eignen sich dazu, gezielt bestimmtes Wissen aus der Wissensbasis zu extrahieren. Damit kann gezielt nach Information von Interesse gesucht werden. Eine Anfrage wird nach folgendem Schema definiert:

```
(Abfrage a
  (def (Variable x))
  (v (Eigenschaft x) (Eigenschaft e))
)
```

Wird eine solche Abfrage *a* gestartet, so liefert Jess alle Treffer des Jess Facts *Vorlage v* zurück unter Angabe von *x, e*. Dabei müssen die Treffer die angegebene Bedingung der Jess Fact erfüllen. In diesem Zusammenhang sind auch Kombinationen der Eigenschaftsbeschreibung über mehrere Jess Facts möglich.

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Zur Laufzeit muss das Arbeitswissen aktualisiert werden, wodurch die Wissensauswertung ausgelöst wird. Jess verwendet den Rete Algorithmus zur Erstellung eines regelbasierten Systems. Der Rete (lat. für *Netz*) Algorithmus ist ein schnelles Verfahren und wurde von Charles L. Forgy vorgestellt [15]. Wissensverarbeitende Systeme verwenden, wie bereits erwähnt, „Wenn-Dann-Regeln“ zur Modellierung von Fakten. Bei der Abarbeitung dieser Regeln muss die Gültigkeit mit den aktuell im Arbeitswissen vorliegenden Tatsachen überprüft werden, was Rechenzeit benötigt. Ändert sich während dieses Auswertezyklus das Arbeitswissen, so kann es vorkommen, dass die Änderung verloren geht. Jede Regel müsste bei Änderung des Arbeitswissens erneut durchlaufen werden. Da ein geändertes Faktum für den Großteil der Regeln nicht relevant ist und sich nur auf einen kleinen Teil des Regelwerks auswirkt, besteht hier Optimierungspotenzial. Der Rete Algorithmus setzt an dieser Stelle an, um die benötigte Auswertezeit zu verkürzen. Dabei wird hier das Ergebnis vorangegangener Auswertezyklen vorgehalten. Bei Änderungen im Arbeitswissen werden nun nur solche Regeln ausgewertet, die eine „Wenn“-Bedingung enthalten, die sich im aktuellen Zyklus verändert haben, was als „feuern“ dieser Regeln bezeichnet wird. Dieser Vorgang initiiert so einen Auswerteprozess.

Änderungen im Arbeitswissen treten im Kontext dieser Arbeit ein, wenn der Werker eine Aktion relevant für den Montageablaufplan ausführt. Dies kann z. B. das Greifen eines Bauteils sein. Ein solches Ereignis wird als neues Jess Fact in das System zur Laufzeit eingebracht und wird in dieser Dissertation als *Event* bezeichnet. Als Ergebnis dieses Vorgangs werden die betroffenen Jess Rules „feuern“ und ein erneute Durchlauf der Jess Rules wird damit angestoßen. Der dadurch initiierte Auswerte- und Arbeitsprozess erfolgt so lange, bis alle Jess Rules mit zutreffende Vorbedingungen überprüft wurden. Entsprechend beinhaltet das Jess-System nach Ende des Auswertungsprozesses ein aktualisiertes Arbeitswissen.

Mit dieser abstrakten Repräsentation von Wissen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Wissenssystem erstellt, das Prozesswissen zur Montage-Assistenz modelliert: der Montageablaufplan-Assistent. Mittels der vorgestellten Programmierumgebung Jess ist ein System zur Repräsentation von Prozesswissen in der industriellen Montage realisiert und ein regelbasierter Montageablaufplan modelliert worden. Die Umsetzung dieses Montageablaufplan-Assistent wird im Folgenden genauer beschrieben.

3.3.2.1 Modellierung der Jess Facts

Als Grundlage der Wissensverarbeitung auf Basis der Montageablaufpläne sind Jess Facts erforderlich, die das Prozesswissen der Montageaufgabe modellieren.

Fertigungsauftrag Im Wissenssystem wird zunächst das zu fertigende Produkt hinterlegt. Dies erfolgt anhand des Jess Facts `produkt`, das nachstehende Eigenschaften besitzt (schematisch):

```
(Vorlage produkt
  (Eigenschaft name)
  (Eigenschaft anzahl)
  (Eigenschaft produziert)
)
```

Jedes Produkt hat einen Namen, womit es eindeutig definiert ist. Jeder Fertigungsauftrag kann verschiedene Losgrößen aufweisen. Dies ist mit der Eigenschaft `anzahl` im Wissensassistenten hinterlegt. Schließlich muss nach Fertigstellung auch vermerkt werden können, ob der bearbeitete Fertigungsauftrag in vollem Umfang erfüllt wurde. Die Eigenschaft `produziert` ist für dieses Merkmal im Arbeitswissen reserviert.

Teiledefinition Alle zu fertigenden Bauteile werden mit dem Jess Fact `teil` modelliert. Eine Definition eines Bauteils hat dabei folgende grundlegende Eigenschaften (schematisch):

```
(Vorlage teil
  (Eigenschaft name)
  (Eigenschaft anzahl)
  (Eigenschaft [] bTeile)
  (Eigenschaft [] bAnzahl)
)
```

Zunächst verfügt ein Bauteil über einen eindeutigen Namen. Die Anzahl der für die Erstellung des Produkts benötigten Bauteile des aktuellen Typs wird mit der Eigenschaft `anzahl` angegeben. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass im Sinne dieser abstrakten Definition ein `produkt` ebenfalls ein `teil` ist.

Die Modellierung von Bauteil-Abhängigkeiten erfolgt durch rekursive Verkettung. Im Regelwerk werden die Abhängigkeiten durch Angabe von zu verwendenden Bauteilen abgebildet, hier mit der Eigenschaftsliste `bTeile`. Jedes Bauteil verfügt über eine Eigenschaft, die besagt, welche weiteren Bauteile erforderlich sind, um den aktuellen Arbeitsschritt durchführen zu können. Die Anzahl der benötigten Bauteile ist mit der Eigenschaftsliste `bAnzahl` modelliert. Aus dieser Definition wird der Montageablaufplan zur Laufzeit des Systems rekursiv aufgebaut.

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Teileort Die zu fertigenden Bauteile werden an definierten Orten an der Arbeitsstation aufbewahrt. Mittels des Jess Facts `teileort` kann dieser Ort modelliert werden (schematisch dargestellt):

```
(Vorlage teileort
  (Eigenschaft teil)
  (Eigenschaft ort)
)
```

Dem Bauteil `teil` wird in dieser Notation der Aufbewahrungsort `ort` zugewiesen. Dieser Aufbewahrungsort ist notwendig, um innerhalb des Montageablaufplan-Assistenten geeignete Werker-Unterstützung zu ermöglichen. Als Beispiel kann hier das Lagerfach für Schrauben angegeben werden.

Vormontage erforderlich Innerhalb der Definition für Bauteile sind bereits Abhängigkeiten im zugehörigen Arbeitsschritt und Vorbedingungen modelliert. Diese Vorbedingungen müssen auch im Arbeitswissen abgelegt werden, damit sie von auf diese Bedingungen zugreifenden Auswerteprozessen abrufbar sind. Erreicht wird dies mittels der Vorlage `erforderlich` und deren Eigenschaften (schematisch):

```
(Vorlage erforderlich
  (Eigenschaft teil)
  (Eigenschaft zielteil)
  (Eigenschaft anzahl)
  (Eigenschaft gesamt)
  (Eigenschaft benoetigt)
  (Eigenschaft gewichtung)
)
```

Die Definition für ein Bauteil enthält eine Liste der Bauteile `teil` welche benötigt werden, um das gerade betrachtete Bauteil `zielteil` zu erstellen. Für jedes dieser benötigten Bauteile wird im Arbeitswissen ein Jess Fact `erforderlich` angelegt, mit Angabe des Verwendungszwecks `zielteil`. Ferner sind noch die Anzahl der insgesamt zu verwendenden Bauteile hinterlegt (`gesamt`) und welche tatsächlich noch verwendet werden müssen (`benoetigt`). Mit dieser Unterscheidung zwischen benötigten und gesamten Bauteilen lassen sich Fortschritte bei der Montage des Produkts modellieren. Als letzte Eigenschaft ist noch eine Gewichtung `gewichtung` für die erforderlichen Bauteile abgelegt. Diese kann zur Priorisierung von Arbeitsvorgängen verwendet werden.

Bauteil montierbar Um einen Arbeitsschritt abschließen zu können, müssen alle Voraussetzungen für die Durchführung dieses Arbeitsschritts erfüllt sein. Im vorgestellten Konzept sind Vorbedingungen von Bauteilen innerhalb der Bauteil-Definition erfasst. Bei der Modellierung des Wissens über den Montageablaufplan wird der Jess Fact, ob solche Vorbedingungen erfüllt wurden, anhand folgender Eigenschaft (schematisch) im Arbeitswissen hinterlegt:

```
(Vorlage montierbar
  (Eigenschaft teil)
)
```

Das Merkmal `montierbar` sagt somit aus, dass das Bauteil `teil` produzierbar ist bzw. dass der aktuelle Arbeitsschritt vom Werker durchgeführt werden kann. Liegt dieses Merkmal im Arbeitswissen vor, so wurden alle Vorbedingungen durch vorher ausgeführte Montagetätigkeiten erfüllt. Alle Arbeitsvorgänge sind somit in den zuvor durchlaufenden Arbeitsschritten vom Werker durchgeführt worden.

Beobachtung einer Aktion Der Montageablaufplan-Assistent soll den Werker bei seiner Montagetätigkeit unterstützen. Entsprechend muss es eine Schnittstelle geben, mit der Beobachtungen aus der Umgebung in das Arbeitswissen eingebracht werden. In der hier vorgestellten technischen Auslegung erfolgt dies mittels eines Jess Facts. Die Basisstruktur ist wie folgt aufgebaut (exemplarisch):

```
(Vorlage aktion
  (Eigenschaft name)
  (Eigenschaft[] ereignisse)
  (Eigenschaft validUntil)
)
```

Die Eigenschaft `name` beschreibt eine eindeutig zuordenbare Aktion. Dies kann z. B. das Greifen eines Bauteils sein. Die Eigenschaftsliste `ereignisse` ist ein optionales Argument, über welches weitere Merkmale der `aktion` im Arbeitswissen abgebildet werden können. Für den Greifvorgang könnte das beispielsweise die Anzahl der gegriffenen Bauteile sein.

Mit der Eigenschaft `validUntil` kann dem Ereignis ein Zeitstempel für die Gültigkeit der Beobachtung mitgegeben werden. Dies kann bei generischen Beobachtungen relevant sein, die nach einer bestimmten Zeit unwichtig werden und für den gesamten Arbeitsvorgang somit nicht mehr von Bedeutung sind. Mittels dieses Zeitstempels lässt sich eine chronologische Abarbeitung von Ereignissen in Jess realisieren.

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Änderung der verfügbaren Bauteile Der Werker wird sich Bauteile in seinen Arbeitsbereich holen, die er für den Arbeitsvorgang benötigt. Das Hinzufügen oder Entfernen eines Bauteils wird im Arbeitswissen mit folgender Beobachtung modelliert (exemplarische Struktur):

```
(Vorlage teilHinzu
  (Eigenschaft name)
  (Eigenschaft anzahl)
)
```

Der Jess Fact teilt mit, dass bei Bauteil `name` eine Änderung von `anzahl` Stück vorgenommen wurde.

3.3.2.2 Modellierung der Jess Rules

Die Auswertung der Jess Facts des Montageablaufplans, die zur Laufzeit im Arbeitswissen abgelegt sind, erfolgt anhand der beschriebenen Jess Rules. Ändert sich während der Laufzeit des Montageablaufplan-Assistenten das Arbeitswissen, so werden erneut alle Jess Rules auf Gültigkeit überprüft. Dazu wird in Jess der integrierte Rete Algorithmus [16] verwendet.

Gültiges Produkt Mit dieser Jess Rule wird geprüft, ob an den Montageablaufplan-Assistenten ein gültiger Produktionsauftrag übergeben wurde:

```
(Regel gueltigesprodukt
  a=(produkt (name))
  nicht(teil (name))
=>
  (loesche a)
)
```

Wurde ein Produktionsauftrag `produkt` an den Montageablaufplan-Assistenten übermittelt, und es existiert zugleich keine Teiledefinition mit dem angeforderten Namen, so wird der Auftrag wieder entfernt.

Werkeraktion Beginn eines erneuten Auswertezyklus des Arbeitswissens ist das Einbringen eines Jess Facts erzeugt aus einem Event (vgl. Abschnitt 3.3.2.1). Diese Beobachtung wird im vorgestellten Ansatz mittels der abstrakten Regel `aktionsCheck` überprüft und ausgewertet:

```
(Regel aktionsCheck ?// aktuellen Zeitstempel anbringen
  Vorbedingung ?e <- (actionEvent)
  Vorbedingung ?c <- (currTime)
```

```
=>
Aktion (loesche ?c)
Aktion (setzte (currTime (timestamp (time))))
)
```

Die Regel setzt den aktuellen Zeitstempel, wenn eine Event `actionEvent` im Arbeitswissen vorliegt.

Arbeitsvorgang ausführen Die Abbildung eines Arbeitsvorgangs erfolgt mittels der Jess Rule `arbeitsgang`. Hier werden die beteiligten Bauteile und deren vorhandene Anzahl im Arbeitswissen angepasst.

```
(Regel arbeitsgang
  a=(aktion (arbeitsgang) (modul))
  t=(teil (modul))
  m=(montierbar (modul))
=>
  (loesche m)
  (fuer alle benoetigten teile als (teil (tx))
    (setze (teilHinzu (tx) (-1)))
  )
  (setze (teilHinzu (modul) (+1)))
  (loesche a)
)
```

Wenn die Werkeraktion der Durchführung eines Arbeitsvorgangs registriert wurde, so existiert zu dieser Beobachtung eine korrespondierende Aktion `arbeitsgang` im Arbeitswissen. Gibt es noch passende Bauteile `teil`, die aufgrund erfüllter Vorbedingungen `montierbar` sind, so erfolgt die Durchführung des Arbeitsvorgangs.

Nach dem Zusammenfügen mehrerer Bauteile mit dem Ergebnis eines neuen Moduls müssen die Zähler aller beteiligter Bauteile angepasst werden. Die verbauten Bauteile müssen jeweils dekrementiert werden. Die Baugruppe `modul` wird inkrementiert, da diese aus den verbauten Bauteilen neu erzeugt wurde.

Abschließend werden noch die Jess Facts für die beobachtete `aktion` und die Montierbarkeit `m` aus dem Arbeitswissen entfernt. Damit ist der Arbeitsvorgang erfolgreich durchgeführt worden.

Aktualisierung der benötigten Bauteile Wird ein Arbeitsvorgang durchgeführt, so werden Bauteile verbaut. In der Definition der Bauteil-Abhängigkeiten (vgl. Jess Fact `erforderlich` aus Abschnitt 3.3.2.1) werden für zu verarbeitende Bauteile korrespondierende Werte mitgeführt. Diese Zähler müssen nach erfolgreicher Montage angepasst werden. Dazu wurde die Jess Rule `benoetigteteileanpassen` definiert:

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

```
(Regel benoetigtteileanpassen
  (teil (name modul) (anzahl aModul))
  eM=(erforderlich (name modul) (gesamt gModul))
  eT=(erforderlich (teil bteil) (zielteil modul) (anzahl aBteil))
  nicht(erforderlich (zielteil bteil))
  =>
  (modifiziere eM(benoetigt (- gModul aModul)))
  (modifiziere eT(gesamt (* (- gModul aModul) aBteil)))
)
```

Wurde ein Arbeitsvorgang durchgeführt, so muss dieser Schritt im Arbeitswissen vermerkt werden. Mit der Jess Rule `benoetigtteileanpassen` werden die Zähler um die Anzahl der durchgeführten relevanten Arbeitsvorgänge dekrementiert. Des Weiteren muss die erfasste Änderung multiplikativ in die abhängigen Bauteile propagiert werden.

Teile hinzufügen und entfernen Tritt die Beobachtung einer Änderung der Anzahl eines bestimmten Bauteils auf, so wird dies mit den zwei nachfolgend beschriebenen Jess Rules im Arbeitswissen behandelt. Das Hinzufügen von Bauteilen erfolgt mit der Regel

```
(Regel teilPlus
  a=(teilHinzu (name) (anzahl wert))
  wenn(>= wert 0)
  t=(teil (name) (anzahl vorhanden))
  =>
  (modifiziere t(anzahl (+ wert vorhanden)))
  (setze (teileort (name) (ort="unbekannt")))
  (loesche a)
)
```

Das Entfernen von Bauteilen erfolgt mit der Regel

```
(Regel teilMinus
  a=(teilHinzu (name) (anzahl wert))
  wenn(< wert 0)
  t=(teil (name) (anzahl vorhanden))
  =>
  (modifiziere t(anzahl (+ wert vorhanden)))
  (loesche a)
)
```

Die Unterscheidung in Addition und Subtraktion ist erforderlich, da beim Hinzufügen von Bauteilen zum Arbeitswissen ein Bauteil Ort zugeordnet werden muss. Dies

erfolgt mittels einer weiteren Jess Rule. Bei der Subtraktion ist selbstverständlich diese Ortsangabe überflüssig.

Bauteil Ort Die Jess Rule `ortzuweisung` trägt dafür Sorge, dass allen Bauteilen geographische Orte zugewiesen werden. Der strukturelle Aufbau dieser abstrakten Regel lautet:

```
(Regel ortzuweisung
  t=(teileort (teil) (ort))
  a=(aktion (name "setzeOrt") (ereignis [teil neuerOrt]))
=>
  (modifiziere t (ort neuerOrt))
  (loesche a)
)
```

Die Regel überprüft, ob es ein Jess Fact `teil` mit `ort` gibt. Existiert zudem eine `aktion` zugehörig zu `teil`, so wird der Jess Fact `teil` mit dem übergebenen neuen Ort `neuerOrt` aktualisiert. Da die Aktion `a` mit dieser Regel abgehandelt ist, wird sie abschließend aus dem Arbeitswissen entfernt.

Fertigen Auftrag entfernen Wurde der Produktionsauftrag erfüllt, so muss das Arbeitswissen aktualisiert werden. Die Jess Rule `fertigesproduktentfernen` übernimmt dabei diese Aufgabe:

```
(Regel fertigesproduktentfernen
  a=(produkt (teil))
  nicht(erforderlich (teil))
=>
  (loesche a)
)
```

Wenn die Bedingung für das erforderliche Bauteil `teil` im Arbeitswissen nicht mehr vorhanden ist, so wird der zugehörige Produktionsauftrag `a` entfernt.

Ungültige Aktionen entfernen Die Regel `entferneUnguelteAktionen` dient dem Bereinigen des Arbeitswissens. Aktionen, deren Gültigkeit überschritten ist, werden hiermit entfernt.

```
(Regel entferneUnguelteAktionen
  a=(aktion (validUntil gueltig))
  z=(aktuelleZeit)
  wenn(< gueltig z)
=>
  (loesche a)
)
```

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Wenn die aktuelle Zeit z größer ist, als der Zeitstempel der Gültigkeit `gueltig` der Aktion `a`, dann wird diese Aktion aus dem Arbeitswissen entfernt.

3.3.2.3 Modellierung der Jess Queries

Damit relevante Eigenschaften im Arbeitswissen des Montageablaufplan-Assistenten abgefragt werden können, wurden die nachfolgend beschriebenen Jess Queries erstellt. Mittels dieser Jess Queries können gezielt relevante Informationen extrahiert und an anderer Stelle weiter verarbeitet werden. Verwendungszweck für diese Abfragen ist die Aufbereitung der gelieferten Information z. B. innerhalb eines übergeordneten Anzeigesystems (siehe Testsystem in Abschnitt 3.3.3). Im Folgenden werden die wichtigsten Abfragen kurz vorgestellt.

Finde alle Bauteile Eine Liste aller Bauteile kann mit der Jess Query `alleTeile` abgerufen werden.

```
(Abfrage alleTeile
  (teil (name))
)
```

Montierbare Bauteile Die Abfrage `montierbareTeile` sucht alle Bauteile, die zum aktuellen Zeitpunkt montiert werden können.

```
(Abfrage montierbareTeile
  (montierbar (teil))
)
```

Dabei wird eine Liste mit Baugruppenamen zurück geliefert, bei welchen alle benötigten Bauteile für den aktuellen Arbeitsvorgang vorhanden sind.

Bauteillager abfragen Um abzufragen, wie viel Bauteile momentan dem Werker zur Verfügung stehen, wurde die Abfrage `anzahlTeile` implementiert.

```
(Abfrage anzahlTeile
  (teil (name) (anzahl))
)
```

Abhängigkeiten abfragen Zur Feststellung, von welchen Bauteilen die Baugruppe `name` abhängt, dient die Abfrage `findeAbhaengigkeiten`.

```
(Abfrage findeAbhaengigkeiten
  (teil (name) (bTeile) (bAnzahl))
)
```

Als Ausgabe liefert diese Abfrage eine Liste mit Bauteilen `bTeile` und deren benötigte Losgrößen `bAnzahl`.

Aktiver Arbeitsvorgang Die momentan bearbeiteten Arbeitsvorgänge können mit der Jess Query `aktiverArbeitsvorgang` abgefragt werden.

```
(Abfrage aktiverArbeitsvorgang
  (erforderlich (teil) (benoetigt))
  test(> benoetigt 0)
)
```

Dabei wird überprüft, ob die Anzahl der benötigten Bauteile `benoetigt` größer als null ist. Ist diese Voraussetzung erfüllt, so liefert diese Jess Query eine Liste mit den Bauteilnamen `teil` zurück.

3.3.3 Implementierung eines Testsystems

Ausgehend von den in Abschnitt 3.3.2.1 und Abschnitt 3.3.2.2 beschriebenen Jess Facts und Jess Rules wurde ein Montageablaufplan-Assistent implementiert. Anhand dieses Testsystems wurden die vorgestellten Konzepte auf Anwendbarkeit und Praxis-tauglichkeit überprüft. Es wurde ein Softwaremodul realisiert, das von anderen Modulen unabhängig funktionsfähig ist. Um dieses Softwaremodul testen zu können, wurde der Montageablaufplan-Assistent in ein Graphical User Interface (GUI) integriert.

Als Szenario dient die Montage eines kleinen Autos aus Fischertechnik (Abbildung 3.2). Um das fertige Produkt des Fischertechnik-Autos zu erhalten, müssen alle Bauteile per manueller Montage vom Werker zusammengesetzt werden. Die Definition



Abbildung 3.2: Auto aus Fischertechnik - Um das fertige Produkt zu erhalten, müssen alle Bauteile mittels manueller Montage zusammengesetzt werden.

des Montageablaufplans wurde mittels Jess Facts beschrieben. Dieser Montageablaufplan ist für den einfachsten Fall in Abbildung 3.3 zu sehen: Das Fischertechnik-Auto besteht aus sieben Basis-Bauteilen. Aus diesen Basis-Bauteilen werden drei Baugrup-

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

```
(teil "Reifen")
(teil "Dach")
(teil "Boden")
(teil "Strebe_kurz")
(teil "Strebe_lang")
(teil "Achse")
(teil "Felge")
(teil "mod_Dach" ("Dach" "Strebe_kurz") (1 2) )
(teil "mod_Boden" ("Boden" "Strebe_lang") (1 2) )
(teil "mod_Rad" ("Reifen" "Felge" "Achse") (1 1 1) )
(teil "mod_Rumpf" ("mod_Boden" "mod_Dach") (1 1) )
(teil "prod_Auto" ("mod_Rad" "mod_Rumpf") (4 1) )
```

Abbildung 3.3: Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos in Jess-Notation - In dieser Abbildung ist der Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos in Jess-Notation dargestellt. Es sind die Basis-Bauteile, sowie die daraus zu bildenden Baugruppen definiert.

pen erstellt. Diese Baugruppen ergeben zusammen schließlich das fertige Produkt Fischertechnik-Auto.

Basierend auf dieser Definition kann der Montageablaufplan auch als Graph dargestellt werden. Dieser Graph ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Die Knoten des Baumes

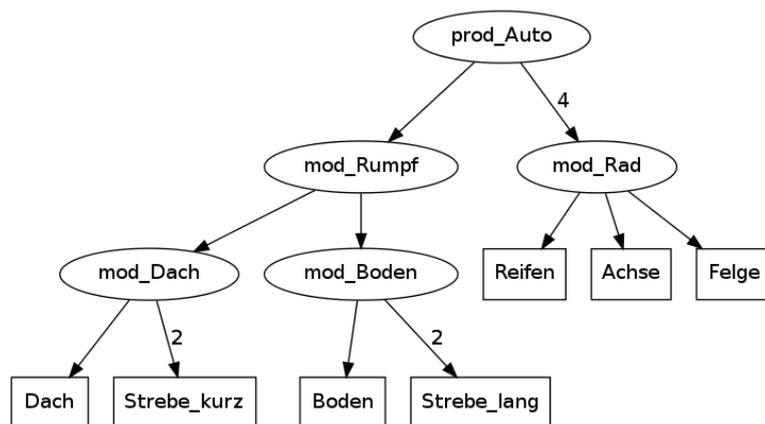


Abbildung 3.4: Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos in Graphendarstellung - Im Montageablaufplan sind Basis-Bauteile mit Rechtecken umfasst, Baugruppen mit Ovalen. An den Kanten des Baumes ist die Anzahl der benötigten Bauteile zu sehen.

visualisieren Bauteile. Basis-Bauteile sind mit Rechtecken umfasst, Baugruppen mit Ovalen. Es sei darauf hingewiesen, dass im Sinne des Montagewissens alle Elementen

te (Basis-Bauteile, Baugruppen und Produkt) durch den Typ `teil` repräsentiert sind und sich lediglich semantisch in der Graphendarstellung durch ihre Position im Baum unterscheiden. An den Kanten des Baumes ist die Anzahl der benötigten Bauteile zu sehen. Das fertige Produkt ist in der Wurzel des Baumes dargestellt.

3.3.3.1 Eingaben

Bei der Montage des Fischertechnik-Autos muss der Werker die benötigten Bauteile im jeweiligen Arbeitsschritt greifen. Zu Beginn werden die Basis-Bauteile des Fischertechnik-Autos benötigt. Dieser Vorgang lässt sich als Eingabe für den Montageablaufplan-Assistent verwenden. Die beendete Montage der Baugruppen kann ebenfalls dem Montageablaufplan-Assistenten als Eingabe zugeführt werden. Somit sind das Greifen und das Ablegen als Werkeraktionen zu erfassen.

Die Erfassung beider Werkeraktionen werden in der Test-GUI mittels Schaltflächen simuliert. Abbildung 3.5 zeigt eine Momentaufnahme dieser Test-GUI des Montageablaufplan-Assistenten. Im linken Abschnitt der Test-GUI sind die Eingabetasten für

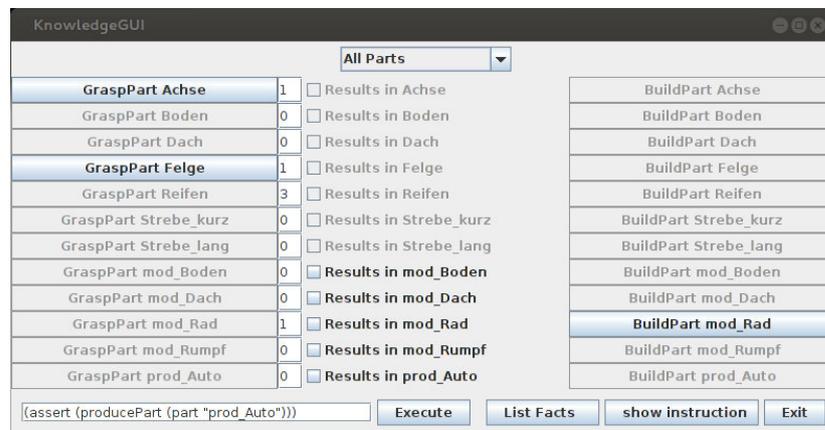


Abbildung 3.5: Jess Test-GUI - Eingabemaske des Testsystems des auf Jess basierenden Montageablaufplan-Assistenten

Greifaktionen des Werkers zu erkennen. Alle Schaltflächen stellen die Repräsentation von Basis-Bauteilen auf der untersten Hierarchieebene im Montageablaufplan dar (vgl. Rechtecke in Abbildung 3.4). Für dieses Produkt gibt es keine weitere Unterteilung von eingesetzten Materialien. Alle verbleibenden Komponenten der Test-GUI werden auf Grundlage dieser Basis-Bauteile erstellt.

Im rechten Abschnitt der Test-GUI sind Schaltflächen zur Simulation einer Montage-tätigkeit zu sehen. Diese Eingabetasten haben als Aufschrift den Namen der Zwischen-

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

schritte, die bei der Montageaufgabe des Produkts zu durchlaufen sind. Vollzieht der Werker eine Montagetätigkeit, so muss dieser Arbeitsschritt in der Test-GUI mittels Tastendruck auf die entsprechende Schaltfläche bestätigt werden. Dieser Vorgang entspricht der Quittierung der Montage einer Baugruppe (vgl. Ovale in Abbildung 3.4). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Anzahl der Schaltflächen und deren Beschriftung automatisch beim Laden des Montageablaufplans in die Test-GUI erzeugt werden. Damit ist das Testsystem generalisiert anwendbar und unabhängig von dem gerade betrachteten Montageablaufplan.

Basierend auf diesen simulierten Beobachtungen des Werkers werden im Arbeitswissen des Montageablaufplan-Assistenten Jess Facts des Typs `aktion` bei Betätigung der Schaltfläche hinzugefügt (vgl. Abschnitt 3.3.2.1). Anschließend erfolgt die Auswertung des geänderten Arbeitswissens anhand der hinterlegten Jess Rules.

3.3.3.2 Ausgaben

Als Ausgaben des vorgestellten Montageablaufplan-Assistenten wurden mehrere Funktionalitäten in die Test-GUI implementiert. Der Montageablaufplan-Assistent verfügt im Arbeitswissen über eine Repräsentation der Anzahl der verfügbaren Bauteile. Diese Anzahl wird mit der Jess Query aus Abschnitt 3.3.2.3 mittels numerischer Darstellung in einer Textbox visualisiert. In Abbildung 3.5 ist die jeweilige Anzahl in hellen Rechtecken jeweils links neben den zugehörigen Schaltflächen zu sehen. Zusätzlich wurden zwei einfache Assistenzfunktionen in den Montageablaufplan-Assistenten integriert.

Die erste Funktion bezieht sich auf das Greifen von Bauteilen. Wird eine Greifaktion per Schaltfläche bestätigt, so wird unter Zuhilfenahme des Montageablaufplan-Assistenten bestimmt, zu welcher Baugruppe das gerade gegriffene Bauteil gehört. Dies wird in der Test-GUI mittels Kontrollkästchen visualisiert. Diese Anzeige befindet sich links neben den zu den Baugruppen gehörenden Schaltflächen (vgl. Abbildung 3.5 rechte Spalte). Nach Bestimmung der zugehörigen Baugruppe wird wiederum ermittelt, welche weiteren Bauteile noch gegriffen werden müssen, um den Arbeitsvorgang erfolgreich beenden zu können. Zur Visualisierung dieser Bedingung werden alle übrigen Schaltflächen deaktiviert, die nicht zu dem gerade bearbeiteten Arbeitsvorgang gehören. Dies ist auch in Abbildung 3.5 links zu sehen. Hier sind nur die Schaltflächen für die Bauteile *Achse* und *Felge* aktiv. Alle weiteren Schaltflächen sind ausgegraut. Der Werker befindet sich in dieser Momentaufnahme also im aktuellen Arbeitsvorgang, der zur Baugruppe *mod_Rad* gehört. Im dargestellt Beispiel sind noch die Bauteile *Achse* und *Felge* zu greifen.

Die zweite Funktion bezieht sich auf das Bestätigen der Montagetätigkeit der Baugruppen. Nach abgeschlossenem Arbeitsvorgang muss diese Tätigkeit in der Test-GUI mittels Tastendruck auf die entsprechende Baugruppentaste rechts in Abbildung 3.5 bestätigt werden. Da der Montageablaufplan-Assistent bestimmt hat, in welchem Arbeitsvorgang der Werker sich gerade befindet, kann auch in diesem Fall für die folgenden Greifprozesse eine Assistenzinformation generiert werden. Generell sind alle Tasten zur Bestätigung der vollzogenen Baugruppenmontage deaktiviert. Sobald die Vorbedingungen für die Montage einer Baugruppe erfüllt sind, wird der entsprechende Quittiertaster aktiviert. Dies ist in Abbildung 3.5 zu erkennen. Da in diesem Beispiel ausreichend Bauteile des Typs *Achse*, *Felge* und *Reifen* vorhanden sind, kann die Baugruppe *mod_Rad* zusammengesetzt werden. Entsprechend ist diese Schaltfläche aktiviert.

Anhand dieses einfachen Anwendungsfalles der Montage des Fischertechnik-Autos wurden mehrere manuelle Montagen durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass der Montageablaufplan-Assistent die gestellten Anforderungen erfüllt hat. An dieser Stelle sei noch darauf hingewiesen, dass das vorgestellte Testsystem unterstützend gewirkt hat. Ausgehend von der Werker-Aktion sind Assistenzinformationen in der beschriebenen Art und Weise ausgegeben worden. Dabei wurde zu keiner Zeit der Werker in der Wahl der nächsten Aktion eingeschränkt, da er immer die Entscheidungsfreiheit über sein Handeln hatte. Im Falle von mehreren Einstiegsmöglichkeiten in den Montageprozess durfte der Werker wählen, mit welchem Bauteil er beginnt. Ausgehend von dieser Wahl wurde die entsprechende Unterstützung solange angezeigt, bis es wieder mehrere Entscheidungsmöglichkeiten gab oder die Montageaufgabe vollständig durchgeführt wurde.

3.3.3.3 Erweiterbarkeit

Eine Voraussetzung an die vorgestellte Modellierung der wissensbasierten Repräsentation von Montageablaufplänen ist die Erweiterbarkeit der enthaltenen Informationen. Um diese Erweiterbarkeit des Montageablaufplan-Assistenten ebenfalls zu testen, wurde eine einfache Visualisierung einer Arbeitsanweisung nachträglich in die Test-GUI integriert. Diese Visualisierung wurde zum vorliegenden Arbeitsvorgang aus dem Arbeitswissen erzeugt. Die Arbeitsanweisung ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Um diese Assistenzinformation zu erhalten, muss die Regelbasis des Montageablaufplan-Assistenten an zwei Stellen erweitert werden. Zum einen muss das Jess Fact, das für die Bauteildefinition zuständig ist, angepasst und um die Angabe einer Grafikdatei erweitert werden. Interpretiert wird diese Eigenschaft mit einer Jess Rule, die überprüft, ob

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN



Abbildung 3.6: Arbeitsanweisung der Test-GUI - Prototypische Assistenzinformation dynamisch erzeugt aus dem Arbeitswissen des Montageablaufplan-Assistenten.

eine Baugruppe montierbar ist. Ist dies der Fall, so wird eine Assistenzinformation ausgegeben, die den durchzuführenden Arbeitsvorgang beschreibt. Hier ist das die Montage des *mod_Rad* durch Zusammenfügen der Bauteile *Achse*, *Felge* und *Reifen*. Die Beschreibung dieses Arbeitsschritts ist in Abbildung 3.6 durch eine mathematische Operation (Addition) ausgedrückt. Die Anzeige der Arbeitsanweisung bleibt hier so lange eingeblendet, bis der Werker die Vollendung des Arbeitsvorgangs mittels Schaltfläche quittiert hat (vgl. Abschnitt 3.3.3.1). Das vorgestellte System ist generell nicht auf diese Assistenzfunktionen beschränkt. Es kann entsprechend neuer Anforderungen erweitert werden.

3.4 Diskussion des regelbasierten Ansatzes zur Repräsentation von Montageablaufplänen

In diesem Kapitel wurde ein Ansatz zur regelbasierten Definition und Interpretation von Montageablaufplänen beschrieben. Basierend auf einem eigenen Montageablaufplan-Konzept wurde ein Montageablaufplan-Assistent in der logischen Programmiersprache Jess realisiert und getestet.

Die Randbedingung für ein solches Wissenssystem ist die einfache Programmierung von Arbeitsabläufen. Dabei wurde auf die Verständlichkeit der implementierten Regeln geachtet. Mit dem Hintergrund eines Expertensystems wurde im vorgestellten Ansatz der Montageablaufplan schrittweise definiert. Es wurde schrittweise ein komplexes Regelwerk erstellt, anhand dessen Montageaufgaben modelliert werden können. Dabei wird immer nur der aktuelle Arbeitsschritt und die Frage betrachtet: *Was ist erforderlich, um den aktuellen Arbeitsschritt durchführen zu können?* Wird dieses Konzept berücksichtigt, so können damit verständliche Jess Facts und Jess Rules realisiert werden.

Der Montageablaufplan-Assistent ist in der Lage, ausgehend von Werkeraktionen zu verfolgen, in welchem Arbeitsschritt der Werker sich gerade befindet. Anhand der

an dieses System übergebenen Events, wie z. B. im Testsystem simulierte Greifaktionen von Bauteilen, konnte auf den vermeintlichen Arbeitsschritt des Werkers geschlossen werden. Somit ist der präsentierte Ansatz anwendbar für die Aufgabe der Ermittlung des Bauteilzustands.

Des Weiteren ist das System skalierbar auf komplexe Anwendungsszenarien. Um es zu erweitern, müssen dem Montageablaufplan-Assistenten weitere Jess Rules für die gewünschte Funktionalität hinzugefügt werden. Benötigt man weitere Eigenschaften zur Beschreibung von Bauteilen, so müssen ausschließlich die korrespondierenden Jess Facts angepasst werden. Um diese Eigenschaften dann verwenden zu können (z. B. Ausgabe von Sprachdateien), muss eine Jess Rule hinzugefügt werden, die auf die Eigenschaften reagiert und die Arbeitsanweisung entsprechend über ein übergeordnetes System ausgibt (z. B. Einblendung des Bildes). Damit erfüllt das vorgestellte regelbasierte Konzept die in Abschnitt 3.3.3.3 definierten Anforderungen der Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit.

Ein weiterer Vorteil bei Verwendung einer regelbasierten Programmiermethode ist die Möglichkeit des Systems, selbst über bekanntes Wissen zu reflektieren. Bisher dem Montageablaufplan-Assistenten unbekanntes Wissen kann über diese Inferenz aus bestehenden Tatsachen abgeleitet werden. Diese Eigenschaft ermöglicht die Vererbung von beobachteten Eigenschaften auf bisher unbekanntes Wissen. Somit kann das von einem Experten übergebene Wissen im System abstrahiert und damit generalisierte Regeln erzeugt werden.

Bei der Verwendung eines regelbasierten Systems ist auch ein komplett anderer Verwendungszweck für das Jess-Assistenzsystem denkbar. Solange der beschriebene Prozess der Regel *Der aktuellen Schritt kann nur ausgeführt werden, wenn die zugehörigen Vorbedingungen erfüllt sind* folgt, lassen sich auch andere Anwendungsgebiete und Szenarien mit dem modellierten Ansatz abdecken. Dies ist ebenfalls ein Vorteil der regelbasierten Programmierung eines Expertensystems.

Obwohl Expertenwissen nicht immer als „Wenn-Dann-Regel“ ausgedrückt werden kann, sind technische Zusammenhänge im Produktionsablauf mit dem vorgestellten Konzept recht gut abbildbar. Generell sind Entscheidungen jedoch nicht immer exakt durch eine „Entweder-Oder-Wahl“ durchführbar. Für das Konzept in dieser Dissertation spielen jedoch unscharfe Entscheidungen bezüglich der Modellierung des Montageablaufplans keine ausschlaggebende Rolle. Es wird davon ausgegangen, dass zur Erfüllung der Montageaufgabe eindeutige Entscheidungen zu treffen sind. Die Versuchsimplementierung hat gezeigt, dass das vorgestellte Konzept in der Lage ist, die gestellten Anforderungen zu erfüllen. In den folgenden Kapiteln wird gezeigt, wie die

3. WISSENSBASIERTE REPRÄSENTATION VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

wissensbasierte Repräsentation von Montageablaufplänen verwendet und in das Assistentensystem zur digitalen Werker-Unterstützung integriert wird.

Kapitel 4

Automatische Ermittlung von Arbeitsschritten

In der manuellen Montage sind Werker die ausführenden Arbeitskräfte. Ausgehend von dem im letzten Kapitel vorgestellten System zur regelbasierten Ableitung des Fertigungszustands eines Produkts aus dem Montageablaufplan müssen nun Eingaben erfasst werden, die an ein solches System übermittelt werden. Als Eingaben dienen solche Aktionen, die Werker während ihrer Montagetätigkeit durchführen. Aus diesen Tätigkeiten kann dann unter Zuhilfenahme des Montageablaufplans auf seine Werkeraktion und den zugehörigen Arbeitsvorgang zurück geschlossen werden. In diesem Kapitel werden zwei mögliche Methoden zur Erfassung und Auswertung von Werkeraktionen gegeben, die im Rahmen dieser Dissertation realisiert wurden.

4.1 Erfassung von Benutzeraktionen

Das Forschungsgebiet der Analyse des Arbeitsablaufs ist seit einigen Jahren von Interesse in verschiedenen Forschungsprojekten. Kosmopoulos et al. befassen sich beispielsweise mit der visuellen Erkennung von Handhabungsaufgaben in der industriellen Produktion [17]. Dabei konzentrieren sich die Arbeiten meist auf Ansätze zur Erkennung von Mustern in Bildern auf Ebene der Bildpunkte (engl. *Pixel*). Durch die Analyse einzelner Bilder sollen aufwendige und anspruchsvolle Verfahren zur Detektion und Verfolgung (engl. *Tracking*) umgangen werden. Nach Voulodimos et al. [18] werden in solchen Verfahren meist Merkmale bestehend aus Farbe, Textur oder Farbverläufen verwendet. Zur effizienten Darstellung von Pixel-Änderungen werden nach

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

Bobick und Davis [19] Motion Energy Images (MEIs) und Motion History Images (MHIs) verwendet. Zeitliche Änderungen können nach Weinland et al. [20] im 3D-Raum in Form von Motion History Volumes (MHVs) ausgedrückt werden. In den meisten Fällen ist dazu eine Kamera-Kalibrierung erforderlich und häufig bestehen Abhängigkeiten zu Trackingverfahren oder der Bestimmung von Vordergrundobjekten im Bild. Zur Klassifizierung der Arbeitsabläufe werden nach Voulodimos et al. häufig Hidden-Markov-Modelle (HMMs) aufgrund der Tatsache verwendet, da sich mit diesen Modellen zeitliche Abläufe effizient stochastisch modellieren lassen.

In der industriellen Produktion sind im Allgemeinen robuste Verfahren erforderlich, die den Produktionsablauf möglichst nicht stören. Möchte man bestehende Methoden und Verfahren erweitern, so sollten neue Komponenten nur gering fehleranfällig, verlässlich und robust sein. Die im Kontext dieser Dissertation entwickelten Konzepte berücksichtigen diesen Anspruch.

Während seiner Montagetätigkeit führt ein Werker verschiedene Aktionen aus, die im Folgenden Werkeraktionen genannt werden. Mit diesem Terminus werden solche Tätigkeiten bezeichnet, die der Werker im Augenblick der Beobachtung durchführt. Der Begriff Beobachtung bezieht sich dabei auf die sensorische Erfassung dieser Werkeraktion. Diese Werkeraktionen können im Zusammenhang mit dem Montageablaufplan stehen, was sie zu Montagetätigkeiten macht. Ferner können sie auch physische Aktionen beinhalten, z. B. die Bewegung des Werkers zwischen unterschiedlichen Orten. Entsprechend sind in diesem Abschnitt nicht-invasive Verfahren und Methoden zur Erfassung der Werkeraktion von Interesse, die keine ortsfesten Sensoren benötigen.

In Abschnitt 4.2 wird ein Ansatz zur Arbeitsschritterkennung beschrieben, der regelbasiert die Handlungen des Werkers überwacht. Der Arbeitsplatz des Werkers wird hier mit einer Tiefenbildkamera erfasst. Aus den 3D-Punktwolken wird die Handposition des Werkers ermittelt. Die Positionsdaten werden dann mit einem Zustandsautomat ausgewertet, und so auf den aktuellen Arbeitsschritt im Montageablaufplan zurück geschlossen.

In Abschnitt 4.3 wird ein HMM-basierter Ansatz vorgestellt. Bei diesem Konzept wird der Werker von oben mit einer 2D-Kamera beobachtet. Aus den Videodaten der Kamera werden Bewegungsvektoren der Pixel berechnet, die in Korrelation mit Positionsdaten von sich auf der Arbeitsfläche befindenden Bauteilen Merkmale für das statistische Modell liefern. Jeder der Ansätze wird evaluiert und das Ergebnis abschließend beurteilt.

4.2 Arbeitsschritterkennung durch Auswertung von Tiefenbildern mittels Zustandsautomaten

Dieser Abschnitt behandelt eine Methode zur Erfassung der Vorgänge im Arbeitsbereich des beobachteten Werkers. Um die Bedingung der Robustheit für den industriellen Einsatz einzuhalten, wurde im ersten Anlauf ein Verfahren gewählt, das aus Tiefenbildern extrahierte Informationen mittels Zustandsautomaten auswertet, um auf den aktuellen Arbeitsschritt zurückzuschließen. Bereits in Abschnitt 3.3.3 wurde das Fischertechnik-Auto als ein exemplarisches Produkt vorgestellt. Hier wird es ebenfalls als Versuchsobjekt verwendet, anhand dessen die entwickelten Verfahren getestet werden. Im Folgenden wird erklärt, wie der Versuchsaufbau dazu aussieht und welche Merkmale über die beobachtete Werkeraktion gewonnen und ausgewertet werden.

4.2.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen zum Zustandsautomatenansatz werden im Szenario einer rein manuellen Montage durchgeführt. Als Arbeitsstation dient ein Versuchsaufbau der Strukturform Einzelplatzmontage (vgl. Abschnitt 2.2.1). Der Aufbau dieser Arbeitsstation ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Die abgebildete Arbeitsstation verfügt über eine Ar-



Abbildung 4.1: Arbeitsstation überwacht mit Microsoft Kinect - Die dargestellte Arbeitsstation wird von oben mit einer Tiefenbildkamera überwacht (siehe weiß hinterlegtes Rechteck links). Die Montage des Produkts erfolgt im Arbeitsbereich des Werkers. Die Szenenansicht der Kinect ist rechts abgebildet. Abbildung in Anlehnung an [89].

beitsfläche (unterer Bereich in Abbildung 4.1 links). Hier erfolgt die Montage der Baugruppen und schließlich des Produkts Fischertechnik-Auto. Rote Kunststoffbehälter sind am Rand der Arbeitsfläche verteilt (Abbildung 4.1 rechts). In diesen Behältern

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

werden alle Bauteile bereitgestellt, die für die Montage des Fischertechnik-Autos benötigt werden. Ferner sind flexible Ablageorte vorgesehen, an welchen Baugruppen temporär abgelegt werden können (schwarze Rechtecke in Abbildung 4.1 rechts). Zu solchen Baugruppen zählen Bauteile, die gefertigt werden müssen bevor eine weitere Baugruppe vervollständigt werden kann. Sind z. B. zwei verschiedene Baugruppen montiert worden, können diese anschließend zusammengefügt werden.

Im linken oberen Teil in Abbildung 4.1 ist eine Microsoft Kinect [21] Tiefenbildkamera zu sehen, die über der Arbeitsfläche der Arbeitsstation angebracht ist. Das Blickfeld dieses Sensors ist dabei senkrecht nach unten gerichtet, wodurch die Normale der Arbeitsfläche parallel zur Sichtachse der Kinect verläuft. Die Bewegungen der Hände des Werkers erfolgen in der Ebene der Arbeitsfläche und verlaufen somit orthogonal zur Sichtachse der Kinect. Da die Montage des Produkts ausschließlich über dieser Arbeitsfläche erfolgt, ist der Sensor so auszurichten, dass der gesamten Arbeitsbereich des Werkers im Kamerabild sichtbar ist. Mit dieser Top-Down-Anordnung kann die Entfernung der Hand über der Arbeitsfläche aus den Kinect-Daten extrahiert werden. Anschließend erfolgt die Auswertung dieser Daten im Assistenzsystem.

Im hinteren Bereich der Arbeitsstation sind Bildschirme zu sehen. Diese dienen der zusätzlichen Anzeige von Informationen während der Probandenversuche. Für die Funktionsweise der Sensorerfassung und der Auswertung der Handbewegung des Werkers haben sie jedoch keine Bedeutung.

4.2.2 Merkmale aus Tiefenbildern

Der Werker wird bei der Durchführung seiner Montagetätigkeit beobachtet. In diesem Abschnitt wird die für die Beobachtung dieser Tätigkeit verwendete Tiefenbildkamera beschrieben. Ferner werden die gewonnenen Merkmale und deren Auswertung erläutert.

Der Werker arbeitet bei der manuellen Montage mit seinen Händen. Da die Handbewegungen des Werkers kontaktlos erfasst werden sollen, ist die Erkennung dieser Bewegungen im dreidimensionalen Raum erforderlich. Diese Eigenschaft lässt sich anhand der Montage eines kleinen Autos gut beschreiben: um das Produkt Fischertechnik-Auto zu montieren, muss der Werker alle notwendigen Bauteile zusammensetzen. Dabei wird der Werker seine Hände verwenden und diese über dem Arbeitsbereich im 3D-Raum bewegen. Die Montage der einzelnen Bauteile des Fischertechnik-Autos wird ohne Werkzeuge durchgeführt. In Abbildung 4.1 sind die benötigten Einzelteile des Fischertechnik-Autos bereits enthalten.

4.2.2.1 Microsoft Kinect

Zur Erfassung der Bewegungen der Hände des Werkers ist der Einsatz eines Sensors erforderlich, der Tiefenbilder aufzeichnen kann. Es wurde die Entscheidung getroffen einen Kinect Sensor für diese Aufgabe einzusetzen. Der Kinect Sensor ist in Abbildung 4.2 zu sehen. In dieser Abbildung ist die Variante der Xbox 360 zu sehen. Mar-

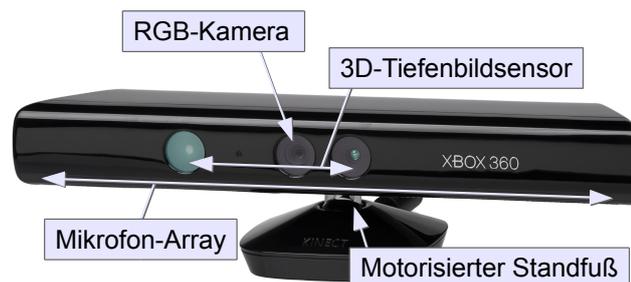


Abbildung 4.2: Kinect Sensor - In dieser Abbildung ist ein Kinect Sensor für die Xbox 360 zu sehen. Markiert sind die Komponenten des Gerätes, die es ermöglichen, Tiefenbilder aufzuzeichnen. Dazu zählen eine RGB-Kamera und ein 3D-Tiefenbildsensor. Ferner verfügt die Kinect über ein Mikrofon-Array und einen motorisierten Standfuß. Abbildung in Anlehnung an [22].

kiert sind die Komponenten des Gerätes, die es ermöglichen, Tiefenbilder aufzuzeichnen. Der Kinect Sensor verfügt über vier Hauptkomponenten. Dazu zählen eine RGB-Kamera und ein 3D-Tiefenbildsensor. Ferner verfügt die Kinect über ein Mikrofon-Array und einen motorisierten Standfuß. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit gab es zwei Versionen der Kinect: die Xbox 360 und die Windows Version. In dieser Dissertation wurde ein Kinect für die Xbox verwendet.

Die installierte RGB-Kamera hat eine Auflösung von 640×480 Pixel bei einer Datenrate von 30 Hz im Standardmodus. Die Farbinformation wird als Bayer-Maske erzeugt und ist mit 8 Bit je Pixel kodiert. Parallel dazu ist die Kinect mit einer Infrarotkamera ausgestattet. Diese IR-Monochrom-Kamera liefert ebenfalls eine Auflösung von 640×480 Pixel bei einer Datenrate von 30 Hz. Die monochromen Bildpunkte sind mit 11 Bit kodiert, was einer Auflösung von 2048 Tiefenwerten entspricht.

Zur Erzeugung eines 3D-Tiefenbildes muss die Oberfläche der betrachteten Szenerie erfasst werden. Dies geschieht mittels optischer Abtastung. Dazu verfügt die Kinect über einen Infrarot-Projektor. Dieser Projektor erzeugt ein IR-Lichtmuster und beleuchtet damit die Szenerie (siehe Abbildung 4.3 links). Dieses Muster wird im nächsten Schritt wieder von der IR-Kamera aufgezeichnet. Über die Verzerrung des Musters, bedingt durch die Oberflächenstruktur der betrachteten Szenerie, kann die Entfernung

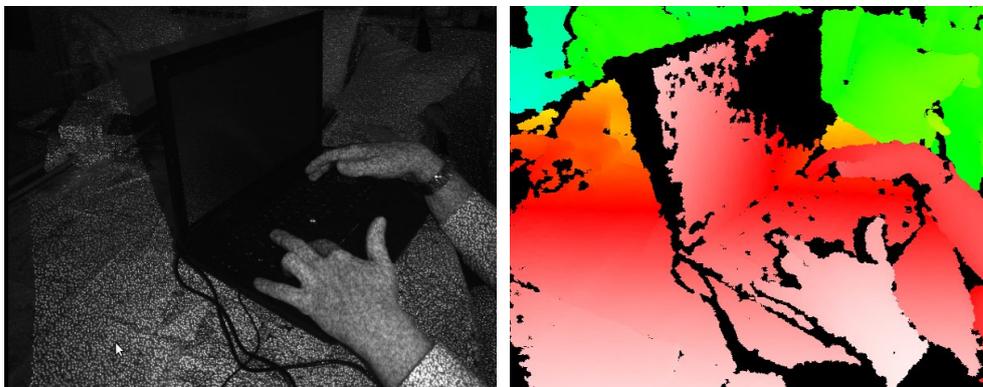


Abbildung 4.3: IR-Lichtmuster und Tiefenbild - In der linken Abbildung ist das projizierte IR-Lichtmuster zu sehen. Das berechnete Tiefenbild mit anschließender Quantisierung der Entfernungen zum Sensor ist in der rechten Abbildung zu sehen [22].

der Objekte zur IR-Kamera berechnet werden. Diese Kalkulation erfolgt bei der Kinect direkt auf dem Gerät. Durch eine interne Kalibrierung beider Kamerasysteme ist eine Überlagerung der Daten des Farbbildes mit den Tiefeninformationen der Kinect möglich. Somit erhält man zusätzlich zur Farbinformation eines Pixels auch die zugehörige Entfernung zur Kinect in z-Richtung. Die berechneten Entfernungen lassen sich wieder dem Bild der Szenerie überlagern. Wird dieser Schritt durchgeführt, so entsteht eine Darstellung wie in Abbildung 4.3 rechts. Für eine einfachere Visualisierung wurden hier die Entfernungen quantisiert. Die Entfernung wird in der Einheit Meter direkt berechnet. Der Arbeitsbereich ist Software-seitig auf eine Entfernung zwischen 1.2 bis 3.5 Meter festgelegt [22].

Die Basis der Kinect ist mittels integrierter Motoren schwenkbar. Damit lässt sich der Sichtbereich des Kinect Sensors in der horizontalen Ebene um $\pm 27^\circ$ bewegen [23]. Außerdem verfügt die Kinect über ein Mikrofon-Array, welches jedoch im Rahmen dieser Dissertation nicht verwendet wurde. Aus Gründen der Vollständigkeit sei es jedoch erwähnt.

4.2.2.2 Hand-Tracking mit Kinect

Der Kinect Sensor wurde ursprünglich als Eingabegerät für die Spielekonsole Xbox von Microsoft entwickelt. Für diese Anwendungen wird mittels Kinect die Szene in horizontaler Richtung erfasst, wodurch Personen im Sichtbereich des Sensors frontal aufgenommen und verfolgt werden. Dazu werden markante Punkte der Personen erfasst und daraus ein Körpermodell erstellt. Die mitgelieferte Software verfügt über ein

Körpermodell, das den gesamten Körper oder nur den Oberkörper erfassen kann. Als Ergebnis dieser Erfassung wird ein Drahtmodell über die Person gelegt. Darin sind die Koordinaten der markanten Körpermerkmale enthalten. Dieses Drahtmodell wird dann automatisch mittels Tracking über die Zeit verfolgt.

In dieser Arbeit wird die Kinect hängend oberhalb der Arbeitsfläche der Arbeitsstation angebracht. Wie in Abbildung 4.1 zu erkennen ist, entspricht diese Montagerichtung nicht der eigentlichen Verwendungsart der Kinect. Regulär erfolgt mittels Kinect eine horizontale Abtastung der Szenen. Da der Werker vor dem Arbeitstisch sitzt, ist es in diesem Szenario nicht sehr effektiv, seinen Körper zu überwachen, da sich durch die sitzende Position die Pose des Körpers kaum verändern wird. Analog ist es nicht praktikabel, die Bewegung des Armes zu verfolgen, da von oben keine Körpersilhouetten sichtbar sind. Die Bewegung der Hände beschreibt dagegen den Status des Werkers bei der manuellen Montage. Aus der Beobachtung von Greifvorgängen kann abgeleitet werden, in welchem Arbeitsvorgang sich der Werker gerade befindet. Daher ist es wichtig, einen Bezug zwischen der Handbewegung des Werkers und der aktuellen Montagetätigkeit herzustellen und zu untersuchen. Damit auch bei der Top-Down-Anordnung die Methoden zur Handverfolgung verwendet werden können, wurden diese an den vorliegenden Versuchsaufbau angepasst, was im Folgenden erläutert wird. Dies wurde mittels der OpenNI¹ Bibliothek erreicht, da OpenNI die Möglichkeit bereit stellt, Hände zu verfolgen.

Tracking der Hände Für die Anwendung der Handverfolgung stellt die Top-Down-Anordnung eine Herausforderung dar, da hier die Hände nicht über das Kinect-Drahtmodell gefunden werden können. Zur Initialisierung des Trackings des Drahtmodells muss die Person vor der Kinect eine Pose zur Kalibrierung einnehmen, was nur erfolgreich funktioniert, wenn der Mensch frontal und aufrecht vor der Kinect steht. Abbildung 4.4 zeigt ein solches Drahtmodell für das menschliche Skelett eines aufrecht stehenden Werkers. Links ist das mit der RGB-Kamera der Kinect aufgenommene Farbbild abgebildet. Das Ergebnis der Bestimmung des Drahtmodells des Werkers ist in der mittleren Darstellung zu sehen. Im rechten Teil von Abbildung 4.4 ist die Überlagerung beider Bilder zu sehen: das Drahtmodell im Tiefenbild der Kinect. Über die Programmschnittstelle der OpenNI Bibliothek sind die 3D-Koordinaten aller bestimmten Punkte des Drahtmodells abrufbar. Analog zur Erkennung des vollständigen Drahtmodells kann auch nur der Oberkörper bestimmt werden.

¹<http://www.openni.com>

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN



Abbildung 4.4: Kinect-Aufnahme überlagert mit Drahtmodell - Links ist das Farbbild einer Aufnahme eines Menschen zu sehen. In der Mitte ist das Tiefenbild der betrachteten Szene dargestellt. Rechts ist die Überlagerung beider Bilder zu sehen: das Drahtmodell im Tiefenbild der Kinect.

Die zuvor beschriebenen Verfahren des Kinect-Trackings können nicht eins zu eins auf das hier beschriebene Szenario angewendet werden. Um mit der Kinect die Hand eines Werkers verfolgen zu können, ist bei der Verwendung der OpenNI Bibliothek zum reinen Tracking der Hände eine Initialisierungsgeste notwendig. Dazu muss der Mensch mit seiner Hand eine Wink-Bewegung in der Kameraebene vollziehen. Mittels eines regelbasierten Ansatzes wird nun die Position der Hand bestimmt. Anschließend wird der Schwerpunkt der Hand abgeschätzt. Dieser Schwerpunkt ist nun als Koordinate der Hand im 3D-Raum verfügbar. Details zu diesem Verfahren können aus [24] entnommen werden. Ab diesem Zeitpunkt wird der Hand-Punkt im Tiefenbild verfolgt. Das Ergebnis dieses Trackings kann zusätzlich Software-seitig mittels eines Glättungsfaktors verbessert werden. Wie dieser Faktor gewählt wurde, wird in Abschnitt 4.2.4.1 beschrieben.

Die Initialisierungsmethode mittels Wink-Bewegung ist im vorgestellten Versuchsaufbau nicht so ohne weiteres verwendbar. Der Werker wird hier von oben beobachtet, wodurch die Berechnung des Drahtmodells nicht möglich ist. Zwar könnte mittels der Wink-Bewegung versucht werden, den Hand-Punkt zu initialisieren. Dies funktioniert manchmal, ist aber für die Randbedingung der Robustheit der Arbeitsstation nicht praktikabel.

Initialisierung der Handposition Als Alternative zur Wink-Bewegung wurde eine Initialisierung des Hand-Punktes anhand des RGB-Bildes der Kinect realisiert. Da das RGB-Bild mit dem Tiefenbild überlagert werden kann, stimmen die 2D-Koordinaten beider Bilder überein. Der Schwerpunkt der Hand des Werkers wird mittels Farbsegmentierung bestimmt. Dabei kommen HSV-Farbfiler zum Einsatz, wodurch

relevante Bildbereiche von irrelevanten getrennt werden [90]. Durch geeignete Parameterwahl ist es möglich, nach Regionen mit Hautfarben zu filtern. Die Parameter dieser Filter-Operation sind nach dem Hautfarben-Modell von Soriano et al. [25] im rg-Chroma Farbraum gewählt. Für den Start der Lokalisierung ist es zunächst notwendig, die Hand des Werkers zu finden. Dazu wird davon ausgegangen, dass der Werker zu Beginn der Montageaufgabe seine Hände über der Arbeitsfläche hat. Die Arbeitsfläche des Versuchsaufbaus ist in monochromen Farbtönen gehalten. Die Hände des Werkers unterscheiden sich farblich von diesem Hintergrund. Da sich bei der Initialisierung der Hand-Verfolgung nur die Hände des Werkers im Sichtbereich der Kinect aufhalten, müssen die bestimmten hautfarbenen Regionen zu den Händen des Werkers korrespondieren. Diese Regionen innerhalb einer Filtermaske werden im Folgenden als Blob bezeichnet. So lassen sich die Handflächen gut von der Arbeitsfläche trennen und Schwerpunktberechnungen durchführen.

Nach Abschluss der Farbfilteroperationen entsteht eine Bildmaske, in welcher die Hände des Werkers mit dem logischen Maskenwert `true` markiert sind [7]. Aufgrund von Bildstörungen kann es vorkommen, dass auch Blobs in der Maske gesetzt sind, die keiner Hand entsprechen. Um dem entgegen zu wirken, werden die gefundenen Regionen einer geometrischen Überprüfung unterzogen. Empirische Versuche haben ergeben, dass das Höhe-zu-Breite-Verhältnis des Blobs im Bereich von $\frac{h}{b} \in [0.75; 1.3]$ liegen muss, um als Korrespondenz für einen Handbereich zu gelten.

Als weiteres Merkmal muss ein gültiger Blob einen gewissen Füllgrad innerhalb der Blob-Grenzen aufweisen. Dazu wird die eingenommene Pixel-Fläche bestimmt, die durch summieren der auf `true` gesetzten Pixel berechnet wird. Daraus wird dann der Füllgrad bestimmt, der als Wert der gesetzten Filtermasken-Pixel in Relation zur gesamten Pixel-Fläche des Blobs berechnet wird:

$$\text{Füllgrad} = \frac{\text{Blob-Fläche}}{\text{Bildfläche}} \quad (4.1)$$

Für einen Hand-Blob wurde ein Wertebereich von Füllgrad $\in [3\%; 7\%]$ über empirische Versuche ermittelt. Dieser Bereich entspricht der ungefähren Größe einer Hand im Kamerabild. Alle anderen Blobs, die diese geometrische Bedingung nicht erfüllen, werden gelöscht. Somit besteht die resultierende Filtermaske nur aus Hand-Blobs des Werkers. Mit diesen Randbedingungen können die Hände des Werkers mittels Farbfilterung im RGB-Bild der Kinect gefunden werden.

Im letzten Schritt werden bei den Hand-Blobs noch die zugehörigen Schwerpunkte berechnet und als initiale Handposition für die Verfolgung im Tiefenbild gespeichert. Dazu wird die Entfernung der Hand im Tiefenbild über die Pixelkoordinaten am Schwerpunkt abgefragt.

Mit dem so bestimmten 3D-Punkt der Hand kann das Handtracking auch in Top-Down-Anordnung initialisiert werden. Das vorgestellte Verfahren wurde anhand der Verfolgung einer Hand erfolgreich getestet. Mit dieser Methode ist es im vorgestellten Setup möglich, beide Hände des Werkers zu verfolgen.

4.2.2.3 Events als Merkmale zur Bestimmung der Werkeraktion

Die Daten der Handposition des Werkers müssen nun in Zusammenhang mit auf der Arbeitsfläche befindlichen Objekten gebracht werden. Dadurch wird eine Erzeugung von Kontextwissen ermöglicht, womit aus der Position der Bauteile und der Handposition ein Input für den Zustandsautomat gewonnen wird.

Boxerkennung Um die richtige Unterstützung zum richtigen Zeitpunkt geben zu können, muss das Assistenzsystem wissen, welche Bauteile aus welchen Boxen auf der Arbeitsfläche entnommen wurden. Dazu müssen diese Boxen zunächst im Farbbild der Kinect gefunden werden. Im vorgestellten Versuchsaufbau wurden rote Boxen verwendet (vgl. Abbildung 4.1). Diese Boxen zur Bauteillagerung sind nahezu quadratisch und unterscheiden sich durch ihre Farbgebung von der Arbeitsfläche. Um die Position der Boxen erkennen zu können, wird das Farbbild einer Farbsegmentierung unterzogen. Dabei kommen analog zur Hautfarbensegmentierung HSV-Farbfiler zum Einsatz, um irrelevante Bildbereiche zu entfernen [90]. Somit ist die bildbasierte Erkennung dieser Boxen über die Farbinformation möglich.

Nach Abschluss der Farbfileroperationen liegt eine Bildmaske vor, in welcher Bereiche mit Boxen den logischen Maskenwert `true` haben [7]. Analog zur Hautfarbensegmentierung werden die gefundenen Regionen ebenfalls einer geometrischen Überprüfung unterzogen. Dazu muss das Höhe-zu-Breite-Verhältnis des Blobs im empirisch ermittelten Bereich von $\frac{h}{b} \in [0.5; 2]$ liegen. Analog zum Hand-Blob haben empirische Versuche einen Wertebereich von Füllgrad $\in [1\%; 5\%]$ ergeben. Mit diesen Randbedingungen können die Boxen mittels Farbfilerung im RGB-Bild der Kinect gefunden werden. Die Visualisierung einer solchen erfolgreichen Filterung ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Die Grenzen der Boxen sind mittels roter Rechtecke eingezeichnet. Diese Rechtecke entsprechen der Begrenzung der Blobs in der bestimmten Filtermaske. Der Schwerpunkt der Blobs ist ebenfalls mit einem roten Punkt eingezeichnet.

Die automatische Erkennung der Box-Position erlaubt die freie Positionierung der benötigten Bauteile auf der Arbeitsfläche. Dies ist ein wichtiger Faktor für die ergonomische Gestaltung der Arbeitsstation, da der Werker entscheiden kann, wo er die

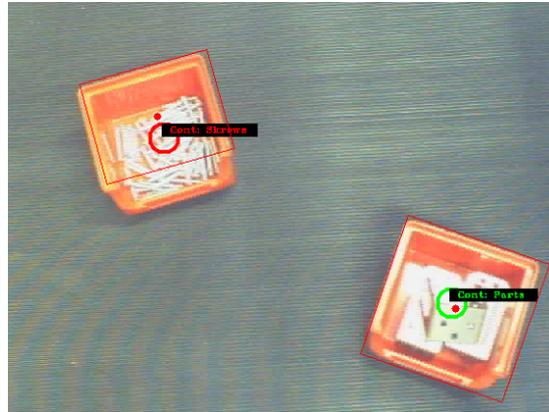


Abbildung 4.5: Box-Erkennung - Die Abbildung zeigt zwei mittels Farbfilterung erkannte Boxen. Die Rahmen der Boxen wurden im Farbbild mittels roter Farbe eingezeichnet. Ferner ist der Schwerpunkt der Boxen mittels rotem Punkt im Bild markiert.

Boxen hinstellen möchte. Entsprechend logisch erscheint es, dass ein häufig verwendetes Bauteil näher am Arbeitsbereich positioniert wird als ein eher selten benötigtes. Das ermöglicht dem Werker seine Arbeitsstation so zu arrangieren und zu organisieren, wie es für ihn am effizientesten ist.

Erzeugung eines Box-Events Wichtige Montagetätigkeiten sind Zugriffe auf die in Boxen gelagerten Bauteile. Mittels dem in Abschnitt 4.2.2.2 beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Handposition des Werkers kann auf einen Boxzugriff inferiert werden. Dazu muss die Hand des Werkers einen speziellen Bewegungsverlauf vollziehen: die Hand muss sich vor, hinunter, hinauf und schließlich zurück bewegen. Ob der Werker diese Bewegung ausführt, wird mit einem Zustandsautomaten ermittelt.

Über die Abtastzeit hinweg werden die Handpositionsdaten an den Zustandsautomaten übermittelt. Bewegt sich die Hand aus dem Arbeitsbereich heraus in Richtung einer Box, so beginnt ein Greifvorgang. Danach kann sich die Hand im gewählten Setup nur außerhalb des Sichtbereichs der Kinect befinden, oder über bzw. in einer Box. Mit dem Wissen über den Standort der Boxen auf der Arbeitsfläche in Kombination mit der Handposition kann ermittelt werden, über bzw. in welcher Box sich die Hand befindet. Da das System über eine Wissensbasis verfügt, welches Bauteil sich in welcher Box befindet (vgl. Abschnitt 3.3.2.1), kann über den Zugriff in eine Box auf den Typ des gegriffenen Bauteils geschlossen werden.

Die z-Position der Hand wird aus den Kinect-Daten direkt extrahiert. Je weiter die Hand vom Sensor entfernt ist, desto größer wird der z-Wert der Handposition. Bei Verwendung eines Schwellwertes in Relation zur Tischebene erfolgt anschließend unter

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

Berücksichtigung der bekannten Boxwandhöhe die Entscheidung, ob die Hand in eine Box eintaucht. Dies geschieht für den Fall des Eintauchens dann, wenn der z-Wert der Handposition eine positive Änderung erfährt. Nach einer gewissen Verweilzeit innerhalb einer Box kann davon ausgegangen werden, dass der Werker ein Bauteil gegriffen hat. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Werker pro Greifvorgang nur ein Bauteil greift, und nicht mehrere gleichzeitig. Danach muss die Handposition eine negative Änderung in der z-Achse erfahren. Überschreitet die Hand einen gewissen Schwellwert für die Entfernung zwischen Hand und Tischebene, so gilt der Greifvorgang als abgeschlossen. Nach einem Greifvorgang wird ein Event (vgl. Abschnitt 3.3.2.1) erzeugt, der den beobachteten Greifvorgang dokumentiert und an den übergeordneten Montageablaufplan-Assistenten übergibt. Zu diesem Zeitpunkt hat der Werker ein Bauteil gegriffen.

Bestätigung eines abgeschlossenen Arbeitsschritts Nach einer Montagetätigkeit des Werkers gilt der durchgeführte Arbeitsschritt als erfolgreich beendet. Nun muss ein Event erzeugt werden, der diesen Vorgang dokumentiert und dem Montageablaufplan-Assistenten mitteilt. Dazu ist ebenfalls ein Mechanismus erforderlich, der mit mehreren Ansätzen realisiert werden kann.

Die erste Möglichkeit, den Abschluss einer Montagetätigkeit zu erkennen, ist der Übergang von Bewegungen im Kamerabild auf eine statische Szene. Da die Position der Hand des Werkers kontinuierlich aus den Kamerabildern berechnet wird, kann über die zeitliche Änderung der Hand-Koordinaten die Bewegungsenergie der Hände berechnet werden. Sobald diese Bewegungsenergie unter einen gewissen Schwellwert fällt, wird die Handbewegung als ruhend definiert. Ist die Hand zusätzlich zur Ruhelage noch außerhalb der Arbeitsfläche, gilt der aktuelle Arbeitsschritt als abgeschlossen. Mit dieser einfachen Regel kann jedoch nicht vermieden werden, dass eine Pause des Werkers ebenfalls als abgeschlossener Arbeitsschritt erkannt wird. Für die Versuchsdurchführung wird angenommen, dass der Werker vor einer Pause den zuletzt bearbeiteten Arbeitsschritt abschließt.

Ein weiteres einfaches Ereignis zur Erkennung eines abgeschlossenen Arbeitsschritts ist der Beginn eines neuen Arbeitsschritts. Hat der Werker zunächst ein Bauteil gegriffen und die Hände über der Arbeitsfläche bewegt, wird er vermutlich den aktuellen Arbeitsschritt bearbeiten. Nach Abschluss des Arbeitsschritts wird er ein neues Bauteil greifen. Somit muss der Werker einen Griff in eine Bauteil-Box ausführen. Dieser Zugriff ist bereits ein Event für den Beginn eines neuen Arbeitsschritts. Über die übergeordnete Auswertung der Events im Montageablaufplan-Assistenten kann verarbeitet werden, ob der Werker das richtige Bauteil gegriffen hat. Unter der Voraussetzung, dass der Werker das richtige Bauteil greift, liefert dieses Ereignis zudem das

Signal, dass der vorhergehende Arbeitsschritt als abgeschlossen zu werten ist. Im Falle eines falschen Greifvorgangs würde das System den aktuellen Arbeitsschritt erst als abgeschlossen behandeln, nachdem das richtige Bauteil gegriffen wurde.

Zur Erzeugung eines robusten Events für den Beginn eines neuen Arbeitsschritts wurden spezielle Ablagebereiche auf der Arbeitsfläche definiert. Dazu wurden weitere Boxen in den Arbeitsbereich des Werkers eingebracht, die sich in ihrer Farbe von den Vorratsbehältern für reguläre Bauteile unterscheiden. Die Position dieser Flex-Boxen wird ebenfalls mit dem in Abschnitt 4.2.2.3 beschriebenen Verfahren der Box-Erkennung bestimmt. Als Flex-Boxen wurden rechteckige blaue Boxen verwendet, die sich in ihrer Größe von den roten Boxen unterscheiden. Hier können die montierten Baugruppen besser eingelegt und wieder entnommen werden. Zur Erkennung der blauen Farbe wurden die Parameter der Farbsegmentierung adaptiert.

Ist eine Baugruppe als Folge eines Arbeitsvorgangs entstanden, so wird diese vom Werker in einer Flex-Boxen zwischengelagert. Die Ablage der Baugruppe wird analog zur Bauteilentnahme als Event mit dem Lagerort an den Montageablaufplan-Assistenten übermittelt. Bei anschließender Entnahme einer zuvor gelagerten Baugruppe kann dieser Vorgang wieder als Event an den Montageablaufplan-Assistenten übertragen werden. Die Flex-Boxen sind dabei links und rechts neben der Arbeitsfläche angeordnet, damit die schnelle Handhabung der darin enthaltenen Bauteile und Baugruppen möglich ist.

Diese Vorgehensweise ist für Werker interessant, da sie ihre Montageaufgabe so flexibel an ihre eigenen Bedürfnisse anpassen können. Bei möglichen Zwischenschritten können sie so ihre Montageaufgabe unterbrechen, indem sie gerade gefertigte Baugruppen in den Flex-Boxen ablegen. Der Montageablaufplan-Assistent erkennt diese Ablage und speichert den Inhalt der Box im Arbeitswissen ab. Der Werker kann nun mit einem anderen Arbeitsschritt fortfahren. Gelangt er an die Stelle im Montageablaufplan, an der er die zuvor abgelegte Baugruppe wieder benötigt, so kann er diese aus der entsprechenden Flex-Box zurück holen. Er kann also den zuvor pausierten Arbeitsvorgang fortführen. Der Montageablaufplan-Assistent wird anschließend mit der gegriffenen Baugruppe inferieren, in welchem Arbeitsschritt sich der Werker gerade befindet. Der Werker ist also nicht darauf angewiesen, starr dem Montageablaufplan zu folgen.

Eine flexible Ablage von Baugruppen kann auch ohne Flex-Boxen geschehen. Dabei muss die Position der Hand mittels Kinect verfolgt werden (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Über die Annahme, dass der Werker etwas ablegt, wenn er die Hand in Richtung des Arbeitstisches bewegt, kurz verharrt und sich dann wieder von der Position entfernt,

kann ein Event für die Ablage eines Bauteils erzeugt werden. Über eine Differenzbildanalyse des Farbbildes kann zusätzlich überprüft werden, ob im potentiellen Ablagebereich eine Änderung der Bildinformation entstanden ist. Analog dazu kann das Greifen einer Baugruppe in einem Flex-Bereich überwacht werden. Vollzieht der Werker die zuvor beschriebene Handbewegung und das Kamerabild zeigt danach wieder den Ursprungszustand (leerer Bereich), so kann dieser Vorgang als Greif-Event an den Montageablaufplan-Assistenten übermittelt werden.

4.2.3 Bestimmung des Arbeitsschrittes mittels Zustandsautomaten

Die im letzten Abschnitt vorgestellten Methoden erlauben die Erkennung grundlegender Werkeraktionen, die für ein Assistenzsystem relevant sind. Aus diesen Aktionen werden Events erzeugt, die an den übergeordneten Montageablaufplan-Assistenten übermittelt werden. Die Erfassung der Werkeraktion erfolgt mittels eines Zustandsautomaten, der in Abbildung 4.6 dargestellt ist. Wie bereits beschrieben, werden die Werkeraktionen in diesem Versuchsaufbau durch Beobachtung von Handbewegungen abgeleitet. Mittels Rechtecken sind Prozesse dargestellt, Entscheidungen sind mit Rauteen visualisiert. Der Zustand, in welchem sich der Werker bei seiner Montageaufgabe befindet, ist in den Kreisen im unteren Bereich der Abbildung zu sehen.

Zu Beginn der Auswertung befindet sich das System im Zustand *Start*. Dieser Zustand dient dem Einsprung in den Zustandsautomaten und leitet direkt in den Prozess zur Auswertung der Handposition des beobachteten Werkers über. Im Wesentlichen erfolgt innerhalb dieses Blocks die Abfrage der Handpositionsdaten, bestimmt mittels Kinect (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Die 3D-Koordinate wird intern abgelegt und steht den verarbeitenden Softwaremodulen zur Verfügung. Zusätzlich wird der Verlauf der Handbewegung gespeichert. In diesem Zustand erfolgt ebenfalls die Berechnung der Beschleunigungswerte der Hand, sowie die Ermittlung der Bewegungsrichtung in der z-Ebene. Die Bewegung in der z-Ebene entspricht der Annäherung der Hand zur, oder der Entfernung von der Arbeitsfläche. Diese Daten werden ebenfalls als Zeitverlauf hinterlegt. Mit diesen Hand-Koordinaten werden nun Positionen mit relevanten Bereichen im Arbeitsbereich verglichen.

Hand über Bauteil-Box Befindet sich die Hand des Werkers über einer Bauteil-Box, so startet die Auswertung der Hand-Trajektorie. Der Prozess *Greifprozess auswerten* aus Abbildung 4.6 ist in Abbildung 4.7 detaillierter beschrieben. Hier wird bestimmt, ob der Werker einen Greifvorgang durchgeführt hat, oder nicht. Dazu wird ein interner Timer verwendet, der initialisiert und gestartet wird, sobald sich die Hand des Werkers

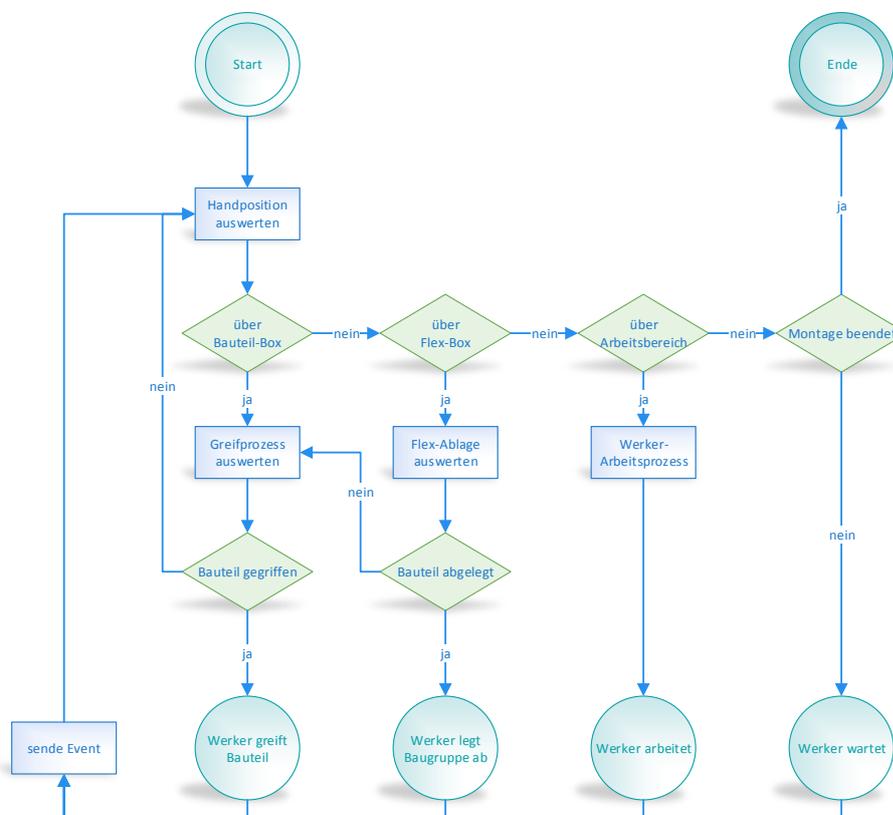


Abbildung 4.6: Überwachung der Werkeraktionen - Zustandsautomat zur Erfassung der Werkeraktionen. Mittels Rechtecken sind Prozesse dargestellt, Entscheidungen mit Rauten. Die abgeleiteten Werker-Zustände sind kreisförmig dargestellt.

über dem betrachteten Bereich befindet. Verbleibt die Hand eine gewisse Zeit in diesem Bereich, so erfolgt die Auswertung der aufgezeichneten Hand-Trajektorie. Die Dauer des Aufenthalts wurde empirisch bestimmt und hängt von der Arbeitsgeschwindigkeit des Werkers ab. Es hat sich gezeigt, dass manche Personen schneller arbeiten, als andere. Somit benötigen schnellere Werker für den beobachteten Greifvorgang weniger Zeit als langsamere Personen. Jede der hier betrachteten Bewegungen muss dabei über der selektierten Box erfolgen, da andernfalls kein Greifvorgang vorliegen würde.

Ob die Handbewegung einen Greifvorgang darstellt, wird regelbasiert ausgewertet. Dazu muss die Handbewegung eine Änderung in z-Richtung aufweisen. Aus diesem Vorgang kann das Greifen abgeleitet werden, da die Hand des Werkers sich dazu der Arbeitsfläche nähern und anschließend wieder in negativer z-Richtung entfernen muss, was der Entnahme eines Bauteils entspricht. Wurde diese Bewegung in dieser Form beobachtet, so erzeugt der in Abbildung 4.7 dargestellte Zustandsautomat den

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

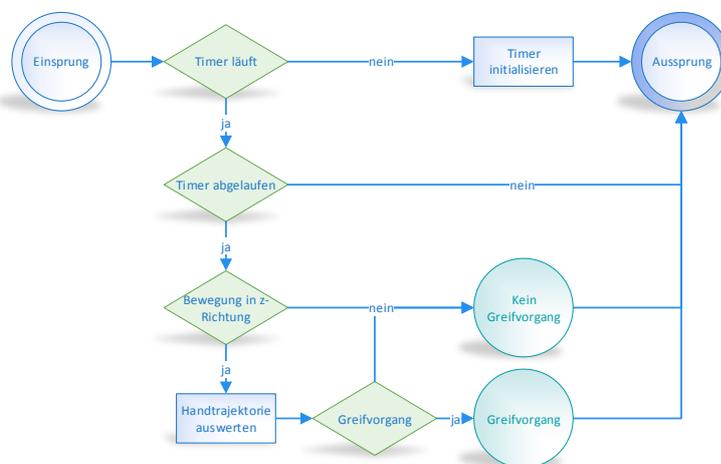


Abbildung 4.7: Überwachung der Werkeraktionen: Greifprozess - Mit diesem Zustandsautomaten wird anhand eines Timers und der Hand-Trajektorie bestimmt, ob ein Greifvorgang stattgefunden hat oder nicht.

Event *Greifvorgang*. Erfolgt jedoch innerhalb der Laufzeit des Timers nicht die zuvor beschriebene Handbewegung, so wird der Event *Kein Greifvorgang* ausgegeben. Empirische Versuche haben ein Zeitfenster der Größe 2 s als Dauer für die Verweildauer innerhalb der Box bei einem Greifvorgang in einer laufenden Montageaufgabe ergeben. Nach durchgeführter Auswertung der Handbewegung werden im übergeordneten Zustandsautomaten (Abbildung 4.6) entweder neue Handpositionsdaten überprüft (im Fall *Kein Greifvorgang*), oder der Event *Werker greift Bauteil* an den übergeordneten Montageablaufplan-Assistenten übermittelt.

Hand über Flex-Box Befindet sich die Hand des Werkers über einer Flex-Box, so startet hier die Auswertung der Handbewegung im Zustandsautomat aus Abbildung 4.8. Innerhalb dieses Zustandsautomaten werden zwei Zustände unterschieden: *Flex-Box frei* oder *Flex-Box belegt*. Dieser Status kann z. B. mit Methoden zur Hintergrundsegmentierung [26] aus den RGB-Bildern der Kinect abgeleitet werden. Hier wurde das Arbeitswissen des Montageablaufplan-Assistenten verwendet, um abzufragen, ob die aktuelle Flex-Box frei ist (vgl. *teileort* aus Abschnitt 3.3.2.1). Unter der Annahme, dass nur eine Ablage eines Bauteils in eine freie Flex-Box erfolgt, kann bei diesem Vorgang direkt auf die Werkeraktion geschlossen werden. Der Werker wird nur ein Bauteil ablegen, wenn die Flex-Box frei ist. Damit erfolgt die Meldung des Events *Bauteil Ablage*. Analog dazu kann der Werker nur ein Bauteil entnehmen, wenn die

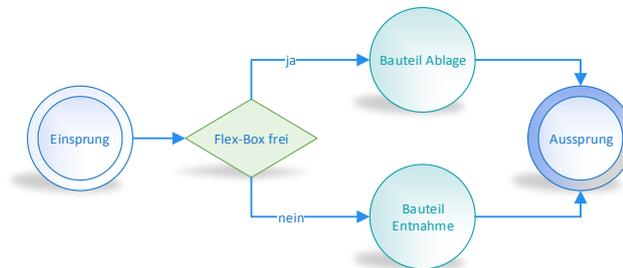


Abbildung 4.8: Überwachung der Werkeraktionen: Flex-Box - Mit diesem Zustandsautomaten wird anhand des Belegungszustands der Flex-Box bestimmt, ob ein Bauteil abgelegt oder entnommen wurde.

zugehörige Flex-Box belegt ist. In diesem Fall erfolgt die Meldung des Events *Bauteil Entnahme*.

Abhängig vom beschriebenen Zustand erfolgt die weitere Auswertung des Ereignisses im übergeordneten Zustandsautomaten: wurde der Event *Bauteil Ablage* ausgelöst, so wird der Zustand *Werker legt Baugruppe ab* an den Montageablaufplan-Assistenten übermittelt. Wurde der Event *Bauteil Entnahme* ausgelöst, so muss anschließend die dafür notwendige Handbewegung des Werkers detektiert werden, was analog zum Vorgang der Greifauswertung (vgl. Abbildung 4.7) geschieht. Ist diese Auswertung erfolgreich, wird dem Montageablaufplan-Assistenten auch hier das Ereignis *Werker greift Bauteil* gemeldet, da aus Sicht des Montageablaufplans die zuvor abgelegte Baugruppe auch der Kategorie Bauteil angehört.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Flex-Box sowohl als Bauteil-Box realisiert werden kann, als auch mittels räumlicher Begrenzung eines Bereichs auf der Arbeitsfläche (z. B. durch Papiermarkierung). Dies spielt für die Auswertung im Montageablaufplan-Assistenten keine Rolle, da nur abstrakte Events übermittelt werden und die Erzeugung des Events für die Auswertung nicht relevant ist.

Hand über Arbeitsbereich Ein weiterer Zustand, der in diesem Versuchsaufbau untersucht wird, ist die Repräsentation des Arbeitsvorgangs des Werkers (Werker arbeitet oder nicht). Dazu wird mittels Handverfolgung die Bewegung der Hände des Werkers über der Arbeitsfläche beobachtet. Bewegt der Werker die Hände über der Arbeitsfläche und wird diese Bewegung nicht über den Bauteil- oder Flex-Boxen ausgeführt, so gilt diese Tätigkeit als *arbeiten*. Der Zustandsautomat gibt in diesem Fall den Zustand *Werker arbeitet* an den Montageablaufplan-Assistenten aus.

Hand außerhalb des Arbeitsbereichs Als letzter Zustand gilt die Eigenschaft, wenn der Werker etwas anderes macht, als in den bereits beschriebenen Zuständen erfasst wurde. Befinden sich die Hände des Werkers in keinem der bisher definierten Bereiche, so kann das zwei mögliche Ursachen haben. Im Fall, dass die Montage des Produkts abgeschlossen ist, kann die Montageaufgabe als abgeschlossen angesehen werden. Entsprechend wird diese Tatsache als Ausprung aus dem Zustandsautomat modelliert. Ist die Montage noch nicht beendet, so wird der Werker vermutlich gerade etwas anderes tun als die Montageaufgabe zu bearbeiten. Um dies dem Montageablaufplan-Assistenten mitzuteilen, wird der Event *Werkler wartet* übermittelt, warauf anschließend vom Assistenzsystem z. B. eine detaillierte Assistenzinformation eingeblendet werden kann.

4.2.4 Versuche zur Handverfolgung

In Abschnitt 4.2.3 wurde beschrieben, wie die Handbewegungen des Werkers in interpretierbare Aktionen umgewandelt werden. Um diese Aktionen weiter verarbeiten zu können, werden diese in Form von abstrakten Events (vgl. Abschnitt 3.3.2.1) ausgewertet und anschließend als Sensorinformation an den übergeordneten Montageablaufplan-Assistent übermitteln. Dieser gleicht die Greifereignisse des Werkers mit dem zu Grunde liegenden Montage-Wissen ab. Als Testsystem kommt hierzu der in Abschnitt 3.3.3 beschriebene Jess-Montageablaufplan-Assistent mit dem Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos zum Einsatz. Die Beobachtung der Greifaktionen erlaubt dem Montageablaufplan-Assistenten dem Fortschritt des Werkers im Montageablaufplan zu folgen.

4.2.4.1 Parameter zur Bewertung der Handverfolgung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde eine Versuchsreihe zur Überprüfung der Genauigkeit der Handverfolgung durchgeführt. Dazu wurde mit einer Versuchsperson (VP) in einem Vorversuch die Montage des Fischertechnik-Autos durchgeführt und mittels Kinect an der in Abbildung 4.1 dargestellten Arbeitsstation beobachtet. Dabei wurde die VP angewiesen, nur mit einer Hand zu arbeiten, wodurch mittels Kinect auch nur eine Hand verfolgt werden muss. Die andere Hand sollte dabei ruhen. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Systems wurden vier Parameter während der Montage vom Versuchsleiter aufgezeichnet und zur Fehlerbewertung herangezogen [89]:

- *Handwechsel*: Bei der Montage wird nur eine Hand des Werkers verfolgt. So kann es vorkommen, dass der bestimmte Schwerpunkt der verfolgten Hand (vgl.

Abschnitt 4.2.2.2) auf die nicht verfolgte Hand des Werkers springt. Die Anzahl dieser wechselnden Handpunkte wird mit dem Parameter *Handwechsel* erfasst.

- *Kritischer Handwechsel*: Bei der Entnahme von Bauteilen aus, bzw. Ablage in die Bauteil-Boxen kann es vorkommen, dass die verfolgte Hand im Bild der Kinect verloren geht. Dies tritt dann ein, wenn die verfolgte Hand zu nah über der Arbeitsfläche schwebt und im Sensorrauschen verschwindet. Der Algorithmus, der zur Handverfolgung verwendet wird, versucht im Tiefenbild eine Hand zu finden. Da die andere Hand des Werkers sich meistens auch im Sichtbereich der Kinect befindet, wird der Handpunkt von der verlorenen auf die zweite Hand wechseln. Dies ist für die Auswertung der Handdaten ungünstig, da die Bauteilentnahme in diesem Fall nicht zuverlässig erfasst werden kann. Entsprechend wird eine solcher Wechsel auf die nicht verfolgte Hand mit dem Parameter *Kritischer Handwechsel* erfasst.
- *Verlorener Handpunkt*: Während der Montage kann es vorkommen, dass trotz sichtbarer Hand diese von der Kinect nicht erkannt wird und dadurch auch keine Daten über die Handbewegungen des Werkers zur Verfügung stehen. Die Anzahl, wie oft Handpunkte im Tiefenbild nicht gefunden werden, ist mit dem Parameter *Verlorener Handpunkt* erfasst.
- *Verpasster Event*: Verlorene Handpunkte können dazu führen, das Ablage- oder Entnahme-Events nicht beobachtet werden und somit dem Montageablaufplan-Assistenten nicht zur Verfügung stehen. Die Anzahl solcher verpassten Events wird mit dem Parameter *Verpasste Events* erfasst.

Die zur Handverfolgung verwendete Software-Bibliothek OpenNI verfügt über die Möglichkeit, über einen geeigneten Wert für den Glättungsfaktor der Handverfolgung das Ergebnis des Trackings zu verbessern (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Um den passenden Wert zu bestimmen, wurde eine Testreihe mit vier Glättungsfaktoren der Werte 0.0 bis 0.3 für jeweils zehn Montagen durchgeführt und die aufgetretenen *Handwechsel* protokolliert. In Abbildung 4.9 sind diese gemittelten Handwechsel je Glättungsfaktor gegenübergestellt. Wie zu sehen ist, sinkt die Auftrittshäufigkeit der Handwechsel bei steigendem Glättungsfaktor. Bereits bei einem Wert von 0.1 nimmt die Anzahl der durchschnittlichen Handwechsel um 73.6% ab [89].

Um einen geeigneten Wert für den Glättungsfaktor des Kinect-Tracking zu bestimmen, müssen die verbleibenden Parameter ebenfalls betrachtet werden. Eine Gegenüberstellung des Einflusses des Glättungsfaktors auf die anderen Kriterien zur Fehlerbewertung ist in Abbildung 4.10 zu sehen. Hieraus lässt sich ablesen, dass bei einem

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

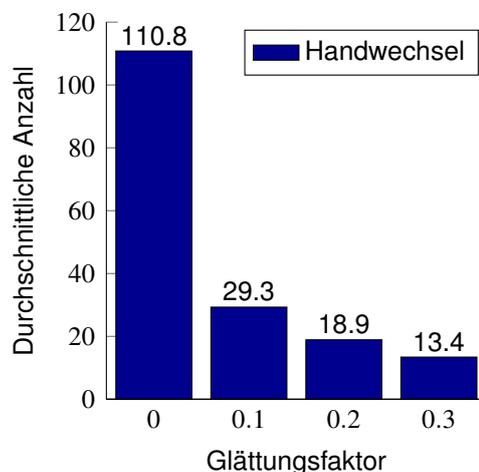


Abbildung 4.9: Handwechsel - Aufstellung der durchschnittlichen Handwechsel je Glättungsfaktor bei Kinect-basierter Handverfolgung [89]

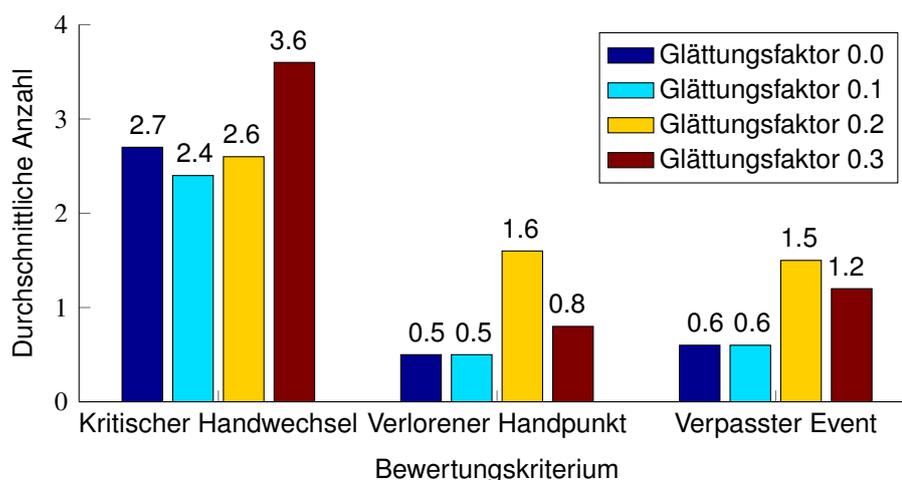


Abbildung 4.10: Einfluss des Glättungsfaktors auf die Handverfolgungskriterien - Gegenüberstellung der Kriterien bei verschiedenen Glättungsfaktoren [89]

Wert von 0.1 bereits eine Änderung der *kritischen Handwechsel* eintritt. Mit höherem Glättungsfaktor nehmen diese Handwechsel bereits wieder zu, was ebenfalls bei den Faktoren *Verlorener Handpunkt* und *Verpasster Event* eintritt. Die Faktoren *Handwechsel* und *Kritischer Handwechsel* weisen beim Übergang des Glättungsfaktors von 0.0 \rightarrow 0.1 eine Verbesserung auf, die Kriterien *Verlorener Handpunkt* und *Verpasster Event* bleiben gleich. Wird der Glättungsfaktor weiter erhöht, so verringert sich zwar der Wert der *Handwechsel*, die Handverfolgung wird jedoch deutlich träger. Zudem

verschlechtern sich die Werte der restlichen Faktoren, jedoch nicht in dem Maße, wie die *Handwechsel*. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde für die weiteren Versuche der Glättungsfaktor auf den Wert 0.1 eingestellt. Dieser Wert stellt einen guten Kompromiss zwischen Glättung und Robustheit des Systems dar und durch das Abfangen der auftretenden *Handwechsel* werden Fehler bereits bei der Datenaufzeichnung unterdrückt. Ferner sind für eine zuverlässige Auswertung der Handposition die Kriterien *Handwechsel* und *Verpasster Event* wichtig, weshalb auch hier der Glättungsfaktor 0.1 zu bevorzugen ist.

4.2.4.2 Evaluation der Handverfolgung

Die vorgestellte Handverfolgung wurde in einer Testreihe mit zwei VPs evaluiert [89]. Die VPs waren Studenten des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der Technischen Universität München. Beide waren etwa gleichen Alters.

Die Probanden mussten bei dieser Montageaufgabe insgesamt zehnmal das Fischertechnik-Auto zusammensetzen, wobei ihre Hände mittels Kinect verfolgt wurden. Nach der Versuchsreihe wurden die aufgezeichneten Montagen mit dem Schwerpunkt auf der Bewertung der Handverfolgung analysiert. Zur Beurteilung der Qualität dieser Handverfolgung wurden die Kriterien aus Abschnitt 4.2.4.1 pro Montagevorgang ausgewertet. Die Abbildungen 4.11 und 4.12 zeigen die zugehörigen Auswertungen der Kriterien für die VPs A und B. Die Anzahl an eingetretenen Ereignissen in der jeweiligen Kategorie ist über die durchgeführten Montagen in chronologischer Reihenfolge eingetragen.

Abbildung 4.11 zeigt die Auswertung der Kriterien für VP A. Im oberen Graph ist die Anzahl der eingetretenen *Handwechsel* visualisiert. Die Tendenz des Kurvenverlaufs der *Handwechsel* über die durchgeführten Montagen wurde mittels quadratischer Approximation bestimmt und ist mit roter Farbe im oberen Graphen eingetragen. Bei Betrachtung der Tendenz ist ein abnehmender Trend der *Handwechsel* zu erkennen, je häufiger VP A das Fischertechnik-Auto montiert hat. Je öfter der Werker das Fischertechnik-Auto produziert, desto reibungsloser vollzieht er seine Handbewegungen. Zu Beginn der Montage muss jedes benötigte Bauteil gesucht werden, wodurch Schwebewebewegungen der Hände des Werkers über den Bauteil-Boxen entstehen. Sobald der Werker das Produkt mehrmals gefertigt hat, nimmt die Anzahl dieser Schwebewebewegungen über dem Arbeitsbereich ab und der Werker führt seine Hand zielgerichteter zu den einzelnen Bauteilen. Entsprechend weist auch die Trajektorie der Handbewegung einen glatteren Verlauf auf, was zu weniger *Handwechseln* führt.

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

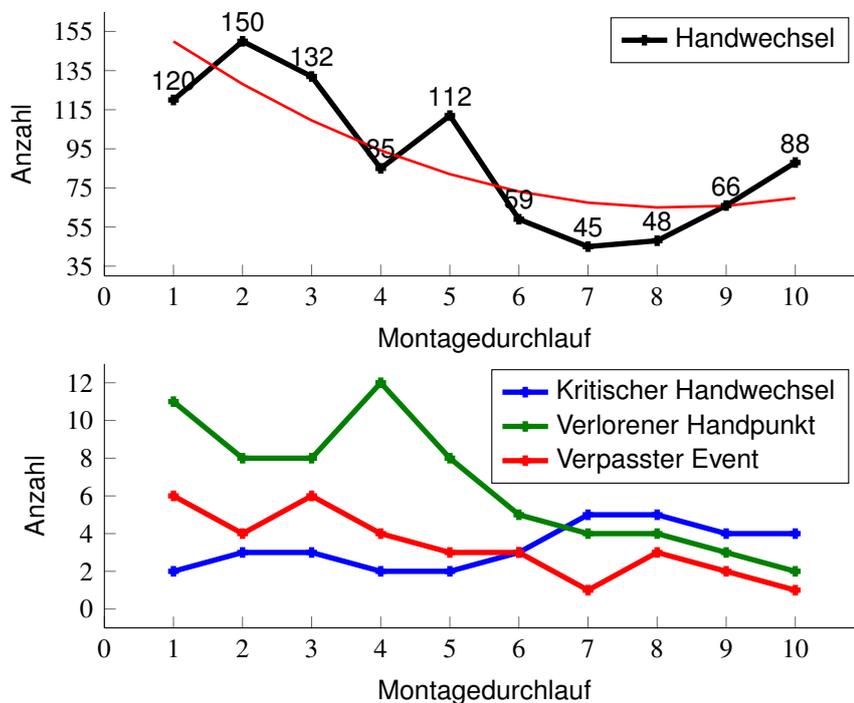


Abbildung 4.11: Daten Versuchsperson A - Der erste Graph zeigt die Anzahl der aufgetretenen *Handwechsel* je Montagedurchlauf. Ferner ist die quadratische Approximation des Kurvenverlaufs eingezeichnet (rote Kurve). Der zweite Graph visualisiert die *kritischen Handwechsel*, *verlorenen Handpunkte* und *verpasste Events* [89].

Der abnehmende Trend der Suchbewegungen und damit die zielgerichtete Bewegung findet sich auch in den anderen Kategorien wieder. Generell nimmt die Anzahl der *verlorenen Handpunkte* über den Zeitverlauf ab, was die Handverfolgung verbessert. Zusätzlich werden relevante Events weniger oft verpasst. Einzig die Anzahl der *kritischen Handwechsel* nimmt leicht zu. Jedoch ist diese Zunahme für das Verhalten des Montageablaufplan-Assistenten nicht ausschlaggebend, da dieser die übermittelten Events auswertet. Solange relevante Events erkannt werden, spielt der Verlust des Handpunktes eine untergeordnete Rolle.

Auch für VP B sind diese Tendenzen der Adaption des Werkers an die Handverfolgung zu erkennen. Abbildung 4.12 zeigt die zugehörige Auswertung der Kriterien für VP B. Der mittels quadratischer Approximation des Kurvenverlaufs ermittelte Trend der *Handwechsel* weist ebenfalls einen fallenden Verlauf auf, je öfter die VP das Fischertechnik-Auto montiert hat. Auch hier ist eine Abnahme der Werte der anderen drei Kriterien über die wiederholten Montagen hinweg zu erkennen.

Betrachtet man Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 näher, so ist die Adaption der

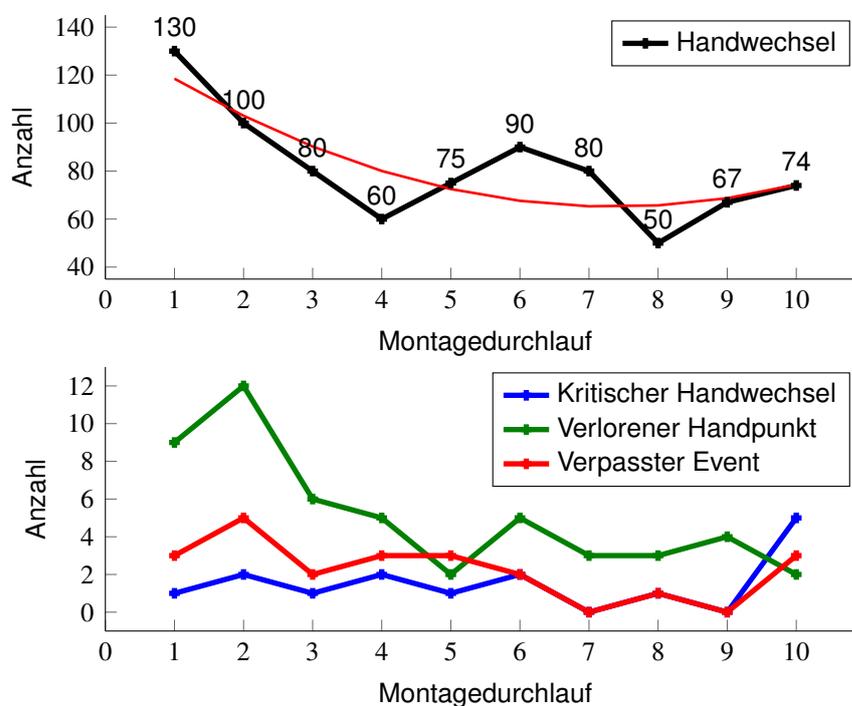


Abbildung 4.12: Daten Versuchsperson B - Der erste Graph zeigt die Anzahl der aufgetretenen *Handwechsel* je Montage Durchlauf. Ferner ist die quadratische Approximation des Kurvenverlaufs eingezeichnet (rote Kurve). Der zweite Graph visualisiert die *kritischen Handwechsel*, *verlorenen Handpunkte* und *verpasste Events* [89].

VPs über die Dauer der Versuche an die Kinect-Handverfolgung festzustellen. Der Anstieg der *Handwechsel* nach vielen Wiederholungen lässt sich durch den häufigeren Einsatz beider Hände zu Montage erklären. Je öfter die VPs das Fischertechnik-Auto gefertigt haben, desto häufiger setzen sie beide Hände ein. Dadurch erscheinen beide bewegten Hände im Bild der Kinect, wodurch die *Handwechsel* einsetzen. Jedoch ist dieses Kriterium für die Erkennung der zugrundeliegenden Greifaktion nicht ausschlaggebend, da der dafür relevante Wert *Verpasster Event* abnimmt. Lediglich bei VP B tritt im letzten Durchlauf ein Anstieg dieses Werts auf. Dies könnte mit der Ermüdung des Probanden zusammenhängen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Vorversuch zur Bestimmung des Glättungsfaktors aus Abbildung 4.9 mit einem erfahrenen Nutzer des entwickelten Systems durchgeführt wurde. Entsprechend ist der Wert für die *Handwechsel* in dieser Grafik deutlich niedriger, als bei den VPs A und B. Zur Verdeutlichung des Effekts der Adaption der Werker an die Handverfolgung wurde die gleiche Versuchsreihe zusätzlich mit diesem erfahrenen Werker durchgeführt. Abbildung 4.13 zeigt die

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

durchschnittlichen Werte *kritischer Handwechsel*, *verlorener Handpunkt* und *verpasster Event* dieses erfahrenen Werkers im Vergleich zu den VPs A und B. Aus diesen

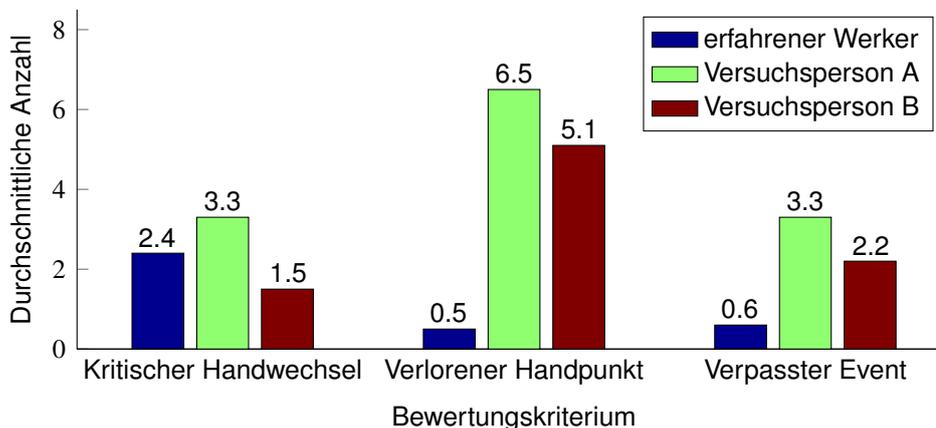


Abbildung 4.13: Vergleich erfahrener Werker mit Versuchsperson A und B - Gegenüberstellung der Durchschnittswerte der Kriterien *kritischer Handwechsel*, *verlorener Handpunkt* und *verpasster Event* [89].

Daten ist ersichtlich, dass der erfahrene Werker ein deutlich besseres Handverfolgungsergebnis erzielt als die ungeübten VPs. Bei diesem Werker wird die Hand nur 0.5-Mal verloren, wohingegen bei VP A die Hand 6.5- und bei VP B 5.1-mal verloren geht. Daraus lässt sich ableiten, dass auch für die VPs A und B bei längerer Benutzung des Systems eine Verbesserung des Ergebnisses der Handverfolgung zu erwarten ist. Ebenfalls ist dieser Unterschied zwischen erfahrenem und nicht erfahrenem Werker bei der Anzahl der *verpassten Events* zu sehen: beim erfahrenen Werker geht durchschnittlich 0.6-mal die Hand verloren, bei VP A 3.3-mal und bei VP B 2.2-mal.

Bei der Montage des Fischertechnik-Auto muss der Werker insgesamt 32-mal einen Greifvorgang durchführen. Da jeder dieser Vorgänge einem Event entspricht, kann so die durchschnittliche Erkennungsrate $P(R) = 1 - \frac{\text{verpasster Event}}{\text{Greifvorgänge}}$ des Systems ermittelt werden. Das Ergebnis ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Wie zu sehen ist, ist die Erkennungsrate bei unerfahrenen Werkern bereits recht hoch. Nach Gewöhnung an das System bleibt zu vermuten, dass auch VP A und B ein zum erfahrenen Werker vergleichbares Ergebnis erzielen können.

4.2.5 Bewertung der Kinect-Handverfolgung

Aus den Werten aus Abschnitt 4.2.4.2 lässt sich ableiten, dass, je häufiger Werker das vorgestellte Handverfolgungssystem verwenden, desto bessere Erkennungsergeb-

Tabelle 4.1: Erkennungsrate des Systems zur Erkennung eines Greifereignisses - Die Tabelle zeigt die Erkennungsrate $P(R)$ des Kinect-basierten Systems zur Erkennung eines Greifereignisses für den erfahrenen Werker, die Versuchspersonen A und B.

Proband	Erkennungsrate $P(R)$
erfahrener Werker	98.1%
VP A	89.7%
VP B	93.1%

nisse erzielt werden können. Der Unterschied zwischen erfahrenen und unerfahrenen Werkern ist recht hoch. In Bezug auf die abnehmende Tendenz der Kurven in Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 ist hier jedoch anzunehmen, dass auch VP A und B bei häufigerer Verwendung des Systems ein ähnliches Ergebnis erzielen können, wie der erfahrene Werker [89].

Die hier vorgestellten Versuche beziehen sich primär auf die Leistungsfähigkeit der Handverfolgung. Erkannte Events wurden an den übergeordneten Jess-basierten Montageablaufplan-Assistenten übermittelt. Es bleibt anzumerken, dass der Montageablaufplan-Assistent mit den während der Versuche gesendeten Events jederzeit in der Lage war, auf den aktuellen Arbeitsschritt zu inferieren. Somit hat die Gewöhnung des Werkers an die Handverfolgung keine Auswirkung auf die übergeordnete abstrakte Wissensverarbeitung im Montageablaufplan-Assistent, solange die relevanten Events übermittelt werden. Da in diesem Abschnitt die Bewertung der Handverfolgung im Fokus steht, wurde die Auswertung der verpassten Events im Montageablaufplan-Assistenten nicht berücksichtigt. Aufgrund der Gewöhnung der Nutzer an das vorgestellte Verfahren ist jedoch zu erwarten, dass das gute Trackingergebnis dann keine Auswirkungen mehr auf die Unterstützung im Montageablaufplan-Assistenten haben wird. Da der Werker abgeschlossene Arbeitsschritte quittiert (vgl. Abschnitt 4.2.2.3), können so mögliche verpasste Zwischenschritte dem Montageablaufplan-Assistenten nachträglich als durchgeführt gemeldet werden. Mit dieser Vorgehensweise würde das vorgestellte System Schwächen bei der Handverfolgung durch übergeordnetes Kontextwissen ausgleichen können.

4.3 Arbeitsschritterkennung mittels statistischer Analyse von Videosequenzen

Der im vorherigen Abschnitt vorgestellte Ansatz zur Arbeitsschritterkennung basiert auf der Ermittlung der Zugriffe auf Bauteile. Diese Zugriffe werden in Events transformiert und anschließend an einen übergeordneten Montageablaufplan-Assistenten übermittelt. Eine generische Verarbeitung von Merkmalen ist so nicht ohne Weiteres möglich, da die erfassten Signale vorverarbeitet werden müssen. Auf diesen vorverarbeiteten Signalen wird anschließend das Kontextwissen zum Montageablaufplan angewendet.

Dieser Abschnitt befasst sich mit der direkten Verarbeitung von Sensorsignalen zur Erzeugung von Wissen über den aktuellen Arbeitsvorgang. Zur Arbeitsschritterkennung werden Modelle aus dem Forschungsgebiet der Spracherkennung verwendet. Hier werden bereits erfolgreich HMMs zur Erkennung von gesprochener Sprache eingesetzt. Ebenfalls wurden unter anderem HMMs von Schuller [27] zur Bestimmung von Emotionen in Sprachdaten angewendet. Ferner ist es laut Schenk [28] möglich, Handschrifterkennung anhand solcher Modelle durchzuführen. In der Bildverarbeitung wurden HMMs von Mayer [29] verwendet, um Kopfgesten in Videobildern zu erkennen.

Die Reihenfolge der Arbeitsschritte und Arbeitsvorgänge eines Montageablaufplans kann als Vokabular einer Sprache interpretiert werden. Wie bei der Bildung von Sätzen aus Wörtern ist es bei der Abarbeitung eines Montageablaufplans notwendig, die richtige Reihenfolge der Arbeitsschritte einzuhalten, um das Produkt herstellen zu können. Auch beim Satzbau ist eine gewisse Abfolge notwendig, um die Aussage des Satzes verstehen zu können. Somit liegt der Schluss nahe, für die Arbeitsschritterkennung ein HMM zu verwenden und den Ansatz auf Anwendbarkeit zu überprüfen. Dazu wird im Folgenden auf die Erzeugung von Merkmalen aus 2D-Bildern eingegangen. Diese Merkmale werden anschließend verwendet, um ein HMM zur Arbeitsvorgangserkennung zu trainieren. Die Qualität des Erkennungsergebnisses wird abschließend evaluiert.

4.3.1 Versuchsaufbau

Als Sensor für den in diesem Abschnitt vorgestellten Ansatz zur Arbeitsschritterkennung wird eine 2D-Farbkamera verwendet. Die eingesetzte Farbkamera ist über eine Firewire-Schnittstelle mit dem Prozessrechner verbunden. Die Farbinformation wird

mittels Bayer-Maske aus den Rohdaten des Bildsignals ermittelt und direkt auf der Kamera berechnet. Das berechnete Bild hat anschließend eine physikalische Auflösung von 640×480 Pixel und wird mit einer Bildwiederholrate von 30 Hz an den Prozessrechner übermittelt.

Die Überwachung der Arbeitsstation erfolgt in einer Top-Down-Anordnung. Mit Top-Down-Anordnung wird im Folgenden die Sichtrichtung der Kamera bezeichnet. Der bereits in Abbildung 4.1 vorgestellte Arbeitsplatz wurde dazu mit der zuvor beschriebenen Kamera erweitert. Der Sichtbereich dieser 2D-Kamera ist senkrecht auf die Arbeitsfläche des Werkers gerichtet. Die Montage des Produkts erfolgt im Sichtbereich der Kamera. Der Werker sitzt vor der Arbeitsfläche und führt dort die Montageaufgaben durch. Dabei werden seine Handbewegungen mithilfe der Kamera aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Abbildung 4.14 zeigt eine Beispielaufnahme dieser Kameraanordnung. Die Hände des Werkers bewegen sich während der Durch-

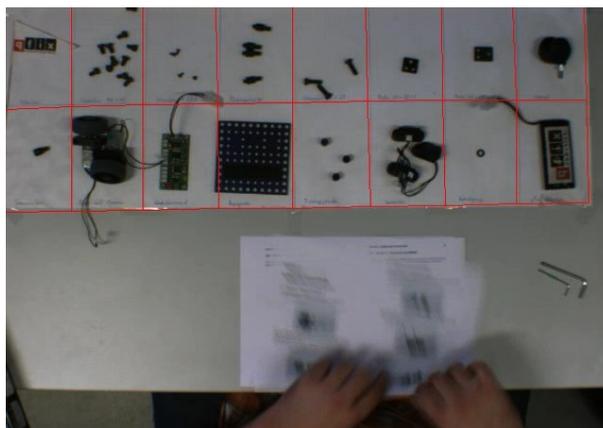


Abbildung 4.14: Beispielaufnahme des überwachten Arbeitsplatzes - In dieser Abbildung ist eine Momentaufnahme einer Montagetätigkeit des Werkers zu sehen. Dabei wird der Arbeitsbereich von oben mit einer 2D-Farbkamera überwacht.

führung der Montagetätigkeit permanent über der Tischebene (analog zur Arbeitsstation aus Abbildung 4.1). Die zu verbauenden Bauteile des Produkts befinden sich im oberen Teil der Arbeitsfläche. Die Bauteile sind so angeordnet, dass sich gleiche Bauteile in der gleichen Region auf der Arbeitsfläche befinden. Im unteren Teil dieser Aufnahme ist der Montagebereich zu erkennen. Hier findet die eigentliche manuelle Montage des Produkts statt. Im abgebildeten Beispiel sind die Hände des Werkers zu sehen. Ferner befindet sich in der Momentaufnahme die Papierversion eines Montageablaufplans ebenfalls im Arbeitsbereich. In der oberen Hälfte des Bildes sind die

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

Ablagebereiche für die benötigten Bauteile zu sehen. Die Unterteilung zwischen den Bauteil-Klassen sind in der Darstellung mit roten Linien hervorgehoben.

Als Produkt für die manuelle Montage wird in diesem Abschnitt der Roboter Crash-Bobby verwendet. Dieser kleine Roboter wird von der Firma qfix¹ vertrieben. Abbildung 4.15 zeigt den Crash-Bobby im montierten Zustand. Der Roboter besteht aus



Abbildung 4.15: Crash-Bobby – Ein kleiner Roboter - Die Abbildung zeigt das Produkt Crash-Bobby der Firma qfix. Abbildung in Anlehnung an <http://www.qfix.de>.

15 Bauteilen und einem zusätzlichen Akku-Pack zur Stromversorgung. Tabelle 4.2 zeigt eine Auflistung aller Bauteile, die für die Montage des Crash-Bobby benötigt werden. Die vollständige Montage des Crash-Bobby ist in mehrere Arbeitsvorgän-

Tabelle 4.2: Bauteile des Crash-Bobby - In dieser Tabelle sind die für die Montage des Crash-Bobby benötigten Bauteile aufgelistet

Bauteil	Anzahl	Bauteil	Anzahl
Basisplatte	1	Platinenhalter	4
Rad mit Motor	2	Stützrad	1
Beilagscheibe	1	Platte 30 × 20 × 5	1
Platte 20 × 20 × 5	1	Distanzstück	3
Sensor	3	Hauptplatine	1
Fahnenhalter	1	Fahne	1
Schraube M3 × 6	4	Schraube M6 × 10	11
Schraube M6 × 20	3	Akku-Pack	1

¹qfix robotics GmbH – Roboterbausatz Crash-Bobby (<http://www.qfix.de>)

ge unterteilt. Je Arbeitsvorgang sind jeweils verschiedene Arbeitsschritte vom Werker durchzuführen und dabei verschiedene Bauteile zu greifen. Für manche Arbeitsschritte werden zusätzliche Werkzeuge benötigt: Die Schrauben werden mit zwei Innensechskantschlüsseln *SW2.5* und *SW4* fixiert; eine Kombizange kann zusätzlich als Hilfsmittel eingesetzt werden. Im Folgenden werden kurz die einzelnen Arbeitsvorgänge beschrieben [91], die anschließend mittels des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung bestimmt werden sollen.

Arbeitsvorgang 1: Platinenhalter Im ersten Arbeitsvorgang werden vier Platinenhalter an die zugehörigen Positionen auf die Basisplatte geschraubt.

Arbeitsvorgang 2: Räder Im zweiten Arbeitsvorgang werden die beiden Räder mit den vormontierten Motoren angebracht. In Bezug auf den Montageablaufplan gelten die Räder mit den Motoren als Baugruppen. Die Räder werden hierfür mit je zwei Schrauben $M6 \times 10$ an der Basisplatte fixiert.

Arbeitsvorgang 3: Stützrad In Arbeitsvorgang 3 wird die Baugruppe Stützrad vormontiert. Dabei wird die Beilagscheibe als Distanzstück auf den Gewindestift des Stützrades gesteckt. Nun muss der Gewindestift in das Innengewinde der Halteplatte (Platte $30 \times 20 \times 5$) geschraubt werden. Die Halteplatte wird anschließend mit zwei Schrauben $M6 \times 10$ mit der Basisplatte verbunden. In Abbildung 4.16 ist der Crash-Bobby nach ausgeführtem Arbeitsvorgang 3 zu sehen.

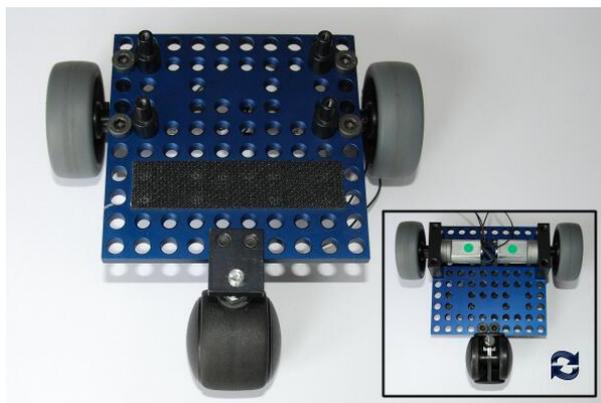


Abbildung 4.16: Crash-Bobby nach Arbeitsvorgang 3 - Die Abbildung zeigt den Crash-Bobby nach ausgeführtem Arbeitsvorgang 3 (Vorder- und Rückseite) [91].

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

Arbeitsvorgang 4: Sensorhalter In Arbeitsvorgang 4 werden drei Halterungen an den Crash-Bobby angebracht. Diese Halterungen werden später dazu verwendet, die Sensoren mit der Basisplatte zu verbinden. Der mittlere der drei Sensoren wird mit einer Schraube $M6 \times 10$ in das separat liegende Gewinde der Platte $20 \times 20 \times 5$ geschraubt. Auf der Rückseite der Platte wird an das herausragende Ende der verwendeten Schraube ein weiteres Distanzstück angebracht. Die Platte wird anschließend mit zwei weiteren Schrauben $M6 \times 10$ an der Basisplatte befestigt. Die außen liegenden Sensoren werden jeweils mit Distanzstücken und einer Schraube $M6 \times 10$ mit der Basisplatte verschraubt.

Arbeitsvorgang 5: Sensoren An die in Arbeitsvorgang 4 montierten Sensorhalter werden nun die Sensoren angebracht. Hierzu werden drei Schrauben des Typs $M6 \times 20$ durch die vormontierten Sensoren gesteckt und an den Distanzstücken auf der Basisplatte befestigt.

Arbeitsvorgang 6: Hauptplatine In Arbeitsvorgang 6 wird die Hauptplatine am Crash-Bobby angebracht und die Verkabelung durchgeführt. Dazu wird die Hauptplatine mit vier Schrauben $M3 \times 6$ an den Platinenhaltern befestigt. Anschließend erfolgt der Anschluss der Kabel an den Motoren, sowie an den drei Sensoren. Die Bauteile werden jeweils über die vorkonfektionierten Steckverbindern mit der Hauptplatine verbunden. Das Ergebnis nach Durchführung von Arbeitsvorgang 6 ist in Abbildung 4.17 zu sehen.

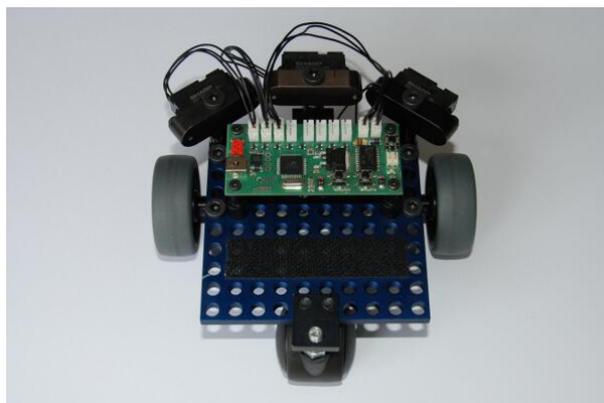


Abbildung 4.17: Crash-Bobby nach Arbeitsvorgang 6 - Die Abbildung zeigt den Crash-Bobby nach ausgeführtem Arbeitsvorgang 6 vollständig verkabelt [91].

Arbeitsvorgang 7: Fahne In Arbeitsvorgang 7 wird die Fahne an den Crash-Bobby angebracht. Als erstes wird der Fahnenhalter auf das Ende des Gewindestiftes des Stützrades geschraubt. In die Öffnung der anderen Seite des Fahnenhalters wird der Draht der Fahne gesteckt. Für die Funktion des Roboters ist dieser Arbeitsvorgang nicht ausschlaggebend, was Arbeitsvorgang 7 optional macht.

Arbeitsvorgang 8: Akku-Pack Im letzten Arbeitsvorgang wird der Akku-Pack angebracht. Damit ist der Crash-Bobby betriebsbereit. Der Akku-Pack wird mittels Klettstreifen an der Basisplatte fixiert. Die Stromversorgung des Crash-Bobby wird mit dem zugehörigen Kabel zwischen Hauptplatine und Akku-Pack hergestellt. Abbildung 4.18 zeigt den nun betriebsbereiten Crash-Bobby.



Abbildung 4.18: Crash-Bobby nach Arbeitsvorgang 8 - Die Abbildung zeigt den fertig gestellten Crash-Bobby nach ausgeführtem Arbeitsvorgang 8 [91].

Insgesamt muss der Werker während der Montage des Crash-Bobby 39 verschiedene Bauteile greifen und verbauen. Diese Bauteile sind in 16 verschiedene Bauteil-Klassen unterteilt. In Abbildung 4.14 sind diese Bauteil-Klassen ebenfalls zu sehen. Im Arbeitsbereich des Werkers sind für jede Klasse eigene Regionen vorgesehen. Jede dieser Regionen ist mit einem roten Rechteck im Kamerabild eingefasst. Somit lassen sich prinzipiell die gegriffenen Bauteile durch ihren örtlichen Aufbewahrungsort unterscheiden. Die Videosequenz einer Montage und den darin enthaltenen Montage-tätigkeiten enthält folglich die Bewegung der Hände des Werkers, die während der Montageaufgabe bewegten Bauteile sowie den Montageprozess der Baugruppen. Diese Baugruppen werden im unteren Bereich der Arbeitsfläche zusammengesetzt.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Montage des Crash-Bobby zum Teil bereits vor Versuchsdurchführung durchgeführt wurde. Die vorgefertigten Baugruppen wur-

den als weitere Bauteile zur Verfügung gestellt. Die Evaluierung des Montageablaufplan-Assistenten (vgl. Abschnitt 4.3.4) wurde im Rahmen des Praktikums Praxis der Mensch-Maschine-Kommunikation (PPMMK) durchgeführt. Eine vollständige Montage des Crash-Bobby hätte die Dauer des Versuchs überschritten. Entsprechend wurde die Entscheidung getroffen, teilweise auf Baugruppen zurückzugreifen. Auf die Funktionsweise des Montageablaufplan-Assistenten hat diese Entscheidung jedoch keinen Einfluss. Basierend auf dem in dieser Dissertation entworfenen abstrakten Montageablaufplanmodell sind Baugruppen ebenso Bauteile. Damit ist die zeitbedingte Vereinfachung der Montage anwendbar und für den vorgestellten Fall gültig.

4.3.2 Merkmalsgewinnung aus Kamerabildern

Die Durchführung der Montageaufgabe wird mit einer Kamera beobachtet. Dieser Abschnitt befasst sich mit der Art der Merkmale, die zur Erkennung des aktuellen Arbeitsvorgangs verwendet werden. Für das auf Zustandsautomaten basierende Konzept aus Abschnitt 4.2 wurden ebenfalls der Arbeitsbereich des Werkers optisch überwacht. In diesem Abschnitt werden jedoch keine Tiefenbilder, sondern herkömmliche 2D-Kamerabilder verwendet. Die Beobachtung des Werkers während der manuellen Montage erfolgt nicht-invasiv, um ihn bei der Durchführung seiner Montagetätigkeit nicht einzuschränken oder zu behindern.

4.3.2.1 Bewegungserkennung im 2D-Bild

Die Ausgangsbasis für die im Folgenden beschriebene Verarbeitungskette sind die im Versuchsaufbau aus Abschnitt 4.3.1 gewonnenen Videodaten. Da nicht der komplette Sichtbereich der Kamera für die Bestimmung von Merkmalen erforderlich und sinnvoll ist, werden die Videodaten zunächst auf relevante Bereiche reduziert. Entsprechend ist eine Vorverarbeitung notwendig, um relevante Merkmale für die Modellbildung des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung (vgl. Abschnitt 4.3.3.3) zu erzeugen. Dabei reduziert sich die Menge an zu verarbeitenden Daten, was eine positive Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des verwendeten PCs hat.

Die Aufnahme der Bewegungen des Werkers erfolgt mit einer fest montierten Farbkamera. Die Szene, die die Kamera aufzeichnet, ist immer starr, da der Bildbereich immer vom gleichen Betrachtungswinkel aufgenommen wird. Im Fall der manuellen Montage wird sich in der Szene nur ein gewisser Teil im Arbeitsbereich des Werkers verändern. Zum einen wird diese Änderung durch die Bewegung der Hände des

Werkers hervorgerufen, zum anderen werden die verwendeten Bauteile aus dem Ablagebereich der Arbeitsfläche verschwinden. Dieser Vorgang ruft ebenfalls Änderungen in der Bildebene hervor. Für die weiteren Verarbeitungsschritte nach der Bilderfassung sind nur solche Bereiche in den Videodaten relevant, in denen sich etwas während der Aufnahme ändert. Die Extraktion von relevanten Bereichen aus den Kameraaufnahmen geschieht durch Bildung von Differenzbildern. Das Differenzbild D wird aus dem Vergleich des Bildes F zum Zeitpunkt t mit dem Bild F einen Zeitschritt T vorher verglichen:

$$D(x, y, t) = F(x, y, t) - F(x, y, t - T) \quad (4.2)$$

Nach dieser Operation erhält man ein neues Bild D , das für jeden Bildpunkt die zugehörige Intensitätsänderung im Verlauf von $t - T \rightarrow t$ zum Vorgängerbild enthält. Statische Bereiche erhalten den Wert 0, Bereiche mit Bewegung einen Wert $\neq 0$.

Führt man nach der Erstellung des Differenzbildes noch eine Binarisierung von D durch, so erhält man eine binäre Filtermaske $D_{\text{bw}}(x, y, t)$ des Differenzbildes. Statische Bereiche entsprechen in dieser binarisierten Maske schwarzen Bildbereichen. Diese schwarzen Bereiche visualisieren somit einen für die weitere Verarbeitung irrelevanten Bereich. Relevante Bereiche erhalten einen Intensitätswert $\neq 0$. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 4.19 zu sehen. Das Ausgangsbild F zum Zeitpunkt $t - T$ ist in Abbildung 4.19(a) dargestellt. Abbildung 4.19(b) zeigt das einen Zeitschritt T später aufgezeichnete Folgebild F zum Zeitpunkt t . Daraus wird das Differenzbild D nach Gleichung (4.2) gebildet, das in Abbildung 4.19(c) zu sehen ist. Nach einer Binarisierung von D entsteht die Filtermaske D_{bw} , die in Abbildung 4.19(d) dargestellt ist. Durch die Binarisierung werden alle Pixel mit Intensitätsänderungen weiß eingefärbt.

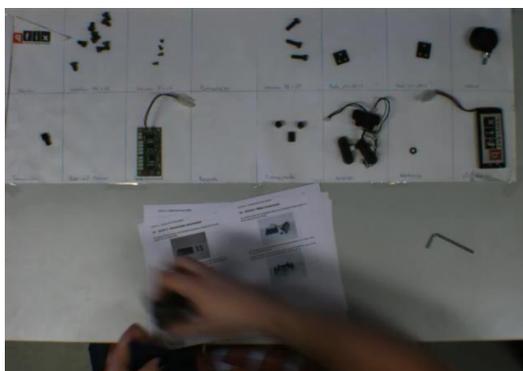
Im unteren Bereich des Bildes Abbildung 4.19(c) ist die Bewegung der Hand des Werkers zu sehen. Diese Bewegung ist im Differenzbild eher schemenhaft vorhanden und wird durch die Binarisierung optisch verstärkt. In Abbildung 4.19(d) ist diese Hervorhebung der bewegten Hand des Werkers gut zu erkennen. Ferner sieht man im linken oberen Bereich der Binärmaske, dass hier ein Bauteil entfernt wurde. Dies ist im Vergleich zwischen Abbildung 4.19(a) und Abbildung 4.19(b) links oberhalb der Mitte bei Betrachtung des Reifens mit Motor zu sehen. Mit dieser trivialen Analyse Methode von Videobildern können veränderte Bildbereiche somit identifiziert werden.

Während seiner Montagetätigkeit wird der Werker seine Hände über dem Arbeitsbereich in der Kameraebene bewegen. Somit müssen sich die Hände des Werkers in Bildbereichen befinden, in denen Änderungen während der Bildanalyse auftreten. Um diese entsprechenden Bildbereich zu selektieren, wurde ein Bewegungsdetektor implementiert, der als Ausgangsbasis Differenzbilder auswertet. Generell muss der Beginn einer Handbewegung erkannt werden. Im vorgestellten Versuchsaufbau wurde

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN



(a) Bild $F(x, y, t - T)$



(b) Bild $F(x, y, t)$



(c) Bild $D(x, y, t)$



(d) Bild $D_{bw}(x, y, t)$

Abbildung 4.19: Bildung eines Differenzbildes - In dieser Abbildung ist ein Beispiel für die Erstellung eines Differenzbildes zu sehen. Abbildung (a) zeigt das Ausgangsbild F zum Zeitpunkt $t - T$, Abbildung (b) zeigt ein Folgebild F zum Zeitpunkt t . Das gebildete Differenzbild D ist in Abbildung (c) dargestellt. Nach einer Binarisierung von D erhält man D_{bw} , was in Abbildung (d) dargestellt ist.

das durch Bestimmung der Anzahl der sich verändernden Pixel realisiert. Dazu wird in der Binärmaske des Differenzbildes bestimmt, wie viele Pixel einen von null verschiedenen Wert angenommen haben. Ist dieser Wert der veränderten Pixel größer als ein zuvor eingestellter Schwellwert, so setzt der Bewegungsdetektor die entsprechenden Bereiche in einer weiteren Binärmaske auf den logischen Wert `true`. Empirische Versuche haben ergeben, dass ein Schwellwert von 0.5% der Bildfläche ausreichend groß ist, um von der Handbewegung des Werkers ausgelöst zu werden.

4.3.2.2 Aufbereitung der Filtermaske

Die in Abschnitt 4.3.2.1 bestimmte Binärmaske für bewegte Bereiche wird nun mit dem Originalbild überlagert. Dazu wird die Filtermaske für die weitere Verarbeitung durch das Entfernen irrelevanter Bereiche, hervorgerufen z. B. durch Rauschen des Kamerasensors, im Bildbereich aufbereitet. Am Beispiel der Filtermaske des Differenzbildes aus Abbildung 4.19(d) werden diese Operationen nun genauer erklärt. Wie in Abbildung 4.19(d) zu sehen ist, weist diese kleine weiße Bereiche auf, die nicht zwingend zur Handbewegung des Werkers gehören. Ferner sind die großen Flächen an den Rändern ausgefranst, bzw. haben Löcher innerhalb der Flächen. Um diese Fragmente zu beseitigen und die Regionen in der Filtermaske aufzubessern, werden Morphologische Operationen verwendet.

Dilatationsfilter Die erste Morphologische Operation ist die Dilatation. Hier wird jedes Pixel \vec{p} der Filtermaske in Relation zu dessen Umgebung betrachtet. Dazu wird ein strukturierendes Element über das zu bearbeitende Bild geschoben. Welche Nachbar-Pixel für eine Entscheidung miteinbezogen oder von der Entscheidung ausgeschlossen werden, lässt sich über die Beschaffenheit dieses Elements einstellen. Zur einfacheren Erklärung der Funktionsweise der Morphologischen Operation wird im Folgenden ein (3×3) -Element verwendet, das in Abbildung 4.20 dargestellt ist [30]. Das zentrale Pi-

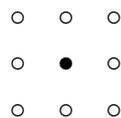


Abbildung 4.20: Strukturierendes Element - Möglich Konfiguration eines Filterkerns für Morphologische Operationen. Das Zentrale Pixel (schwarzer Punkt) ist der Referenzpunkt.

xel (schwarzer Punkt) wird unter Betrachtung der umgebenden Pixel verarbeitet. Die entsprechende Berechnungsvorschrift zur Dilatation zeigt Gleichung (4.3) [30].

$$\begin{aligned}
 \vec{p}(x, y) &= \vec{p}(x-1, y-1) \vee \vec{p}(x-1, y) \vee \vec{p}(x-1, y+1) \\
 &\vee \vec{p}(x, y-1) \vee \vec{p}(x, y) \vee \vec{p}(x, y+1) \\
 &\vee \vec{p}(x+1, y-1) \vee \vec{p}(x+1, y) \vee \vec{p}(x+1, y+1)
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Sobald eines der neun Pixel innerhalb des strukturierenden Elements in der Eingangsmaske den Wert 1 hat, wird die Ausgangsmaske an den Koordinaten des zentralen Pixels auf 1 gesetzt. Als Ergebnis dieser Operation erhält man eine Filtermaske, in

welcher Flächen vergrößert sowie Löcher in Flächen aufgefüllt und somit eliminiert wurden.

Erosionsfilter Die Erosion ist die inverse Morphologische Operation zur Dilatation. Als strukturierendes Element wird auch bei dieser Operation das (3×3) -Element aus Abbildung 4.20 verwendet. Die Berechnung des zentralen Pixels erfolgt dabei nach Gleichung (4.4) [30].

$$\begin{aligned} \vec{p}(x, y) &= \vec{p}(x-1, y-1) \wedge \vec{p}(x-1, y) \wedge \vec{p}(x-1, y+1) \\ &\wedge \vec{p}(x, y-1) \wedge \vec{p}(x, y) \wedge \vec{p}(x, y+1) \\ &\wedge \vec{p}(x+1, y-1) \wedge \vec{p}(x+1, y) \wedge \vec{p}(x+1, y+1) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Im dargestellten Fall wird das Pixel in der Ausgangsmaske an der Position des zentralen Pixels nur dann auf 1 gesetzt, wenn alle neun Pixel des strukturierenden Elements in der Eingangsmaske den Wert 1 haben. Mittels dieser Operation werden Flächen verkleinert und kleine Flächen vollständig entfernt.

Opening-Operation Jede der zuvor vorgestellten Filteroperationen hat Vorteile. Um diese miteinander zu verbinden, bedient man sich der Opening-Operation. Dabei werden die zuvor beschriebenen Morphologischen Operationen wie folgt miteinander verschaltet: zunächst wird ein Bild unter Verwendung des Erosionsfilters bearbeitet. Anschließend erfolgt die Filterung mittels Dilatation [31]. Dies bewirkt ein Entfernen von kleinen und großen Flächen, sowie das Schließen von Löchern in Flächen.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass in dieser Dissertation ein (5×5) -Element verwendet wurde. Die Funktionsweise dieses Elements ist analog zum (3×3) -Element zu verstehen. Wendet man die Opening-Operation mit dem (5×5) -Element auf die Filtermaske aus Abbildung 4.19(d) an, so erhält man die aufbereitete Filtermaske, dargestellt in Abbildung 4.21. Wie gut zu erkennen ist, wurde der Großteil der Pixelstörungen erfolgreich ausgefiltert. Außerdem sind die Bereiche, die zur Handbewegung des Werkers gehören, deutlich stärker ausgeprägt. Die ausgefransten Ränder wurden entfernt und die Flächen geschlossen.

4.3.2.3 Connected Components Algorithmus

Die bisher beschriebene Verarbeitung des Bildes liefert eine Filtermaske mit Werten logisch `true` und logisch `false`. In einer solchen Filtermaske ist der Mensch in der Lage, Flächen anhand zusammenhängender Bereiche zu erkennen. Diese Flächen liegen in der Bildebene und haben somit Koordinaten, die nun bestimmt werden, indem



Abbildung 4.21: Aufbereitetes Filtermaske - In dieser Abbildung ist die mittels der Opening-Operation aufbereitete Filtermaske zu sehen.

zusammenhängenden Bereiche in der Filtermaske zu finden sind. Um dies zu bewerkstelligen, wird der Connected Components Algorithmus (CCA) [32] verwendet. Zum besseren Verständnis der Funktionsweise dieses Algorithmus wird die Erläuterung anhand der Beispielmusche aus Abbildung 4.22 durchgeführt. Wie gut zu erkennen ist,

1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Abbildung 4.22: Beispiel einer Filtermaske - Die dargestellte Filtermaske enthält zusammenhängende Pixelflächen.

beinhaltet die dargestellte Maske drei zusammenhängende Bereiche. Als zusammenhängend gelten Bereiche dann, wenn jedes Bereichs-Pixel einen Nachbarn innerhalb seiner unmittelbar anliegenden Umgebung hat. Man kann sich diese Umgebung wieder mit dem (3×3) -Element aus Abbildung 4.20 vorstellen. Zum Finden dieser Flächen analysiert der CCA das erste im Bild vorkommende Pixel. Hat dieses Pixel den Wert $\neq 0$ und gehört nicht zum Hintergrund, so erhält das Pixel der Ausgangsmaske

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

an der aktuellen Position den Wert eines fortlaufenden Index. Dieser Index dient dabei als Markierung der verschiedenen Bereiche und wird als Label bezeichnet. Im nächsten Schritt werden die umgebenden Nachbarn betrachtet. Hat eines dieser Nach-Pixel ebenfalls den Wert $\neq 0$ und wurde mit keinem anderen als dem aktuellen Index versehen, so wird dem Ausgangs-Pixel und seinem Nachbarn ein neues Label zugeteilt. Hat ein Nachbar bereits eine Label-Nummer, so erhält das Ursprungs-Pixel ebenfalls diese Nummer. Dieser Ablauf wird so lange ausgeführt, bis alle Pixel im Bild bearbeitet wurden. Abbildung 4.23 zeigt das Ergebnis dieser Analyse bei horizontaler Suchrichtung (d.h. das Bild wird zeilenweise abgetastet). Wie zu sehen ist, enthalten zusammen-

1	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.
1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	2	2
1	1	.	.	.	3	3	.	.	.	2	2
1	.	.	.	3	3	3	3	.	.	.	2
1	.	.	3	3	3	3	3	3	.	.	2
.	.	.	.	3	3	3	3	.	.	2	2
.	.	.	.	.	3	3	.	.	.	2	2
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	2

Abbildung 4.23: Gelabelte Beispielmaste - Diese Abbildung zeigt die bearbeitete Filtermaske aus Abbildung 4.22 nach Anwendung des CCA.

hängende Pixelbereiche nun eine gemeinsame Label-Nummer. Zur besseren Ansicht wurden in dieser Abbildung die 0 durch einen „.“ ersetzt. Solche Pixelbereiche werden im Folgenden *Blobs* genannt.

Wendet man nun den vorgestellten CCA auf die Filtermaske der Bewegung der Hände des Werkers aus Abbildung 4.21 an, so erhält man die gelabelte Filtermaske aus Abbildung 4.24. Die verschiedenen Bereiche wurden zur Visualisierung mit unterschiedlichen Farben eingezeichnet. Wie zu sehen ist, können nun zusammenhängende Bereich gut anhand der Farbcodierung unterschieden werden.

Im letzten Schritt dieser Verarbeitungsstufe müssen noch die Koordinaten der gelabelten *Blobs* bestimmt werden. Dazu merkt man sich bei der Ausführung des CCA die maximal vorkommende Label-Nummer. Sucht man jetzt alle Labels in der Maske, kann man die Koordinaten der markierten Bereiche extrahieren. Dies geschieht durch einfache Minima- und Maxima-Bestimmung aus den Dimensionen der *Blobs*. Mittels dieser Werte wird eine sogenannte *Bounding Box* beschrieben. Diese *Bounding Box* ist

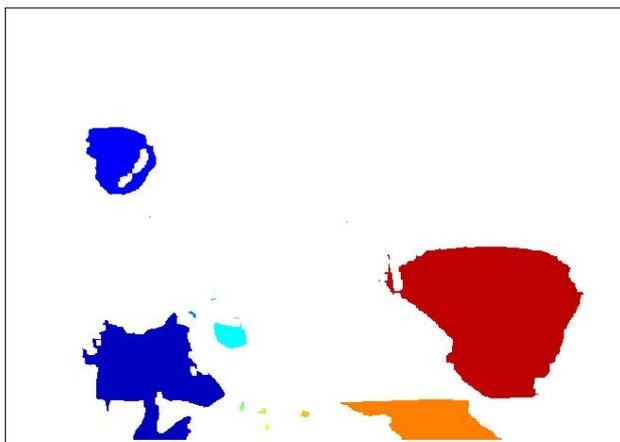


Abbildung 4.24: In Regionen aufgeteilte Filtermaske - In dieser Abbildung ist die mittels CCA aufbereitete Filtermaske zu sehen. Zusammenhängende Bereiche sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

die umgebende geometrische Struktur, die einen Blob einfasst. Hier wurde als Form der Bounding Box ein Rechteck gewählt.

Von Interesse für die Handbewegung des Werkers sind Bereiche im Bild, die eine deutliche Bewegungsenergie aufweisen. Dem entspricht ein großer Blob in der Filtermaske. Nach Anwendung des CCA stehen nun die Koordinaten der einzelnen Blobs zur Verfügung. Anhand dieser Koordinaten lassen sich relevante Blobs regelbasiert in der Bildebene finden. Abbildung 4.25 zeigt das Ergebnis dieser Filterung. In dieser re-

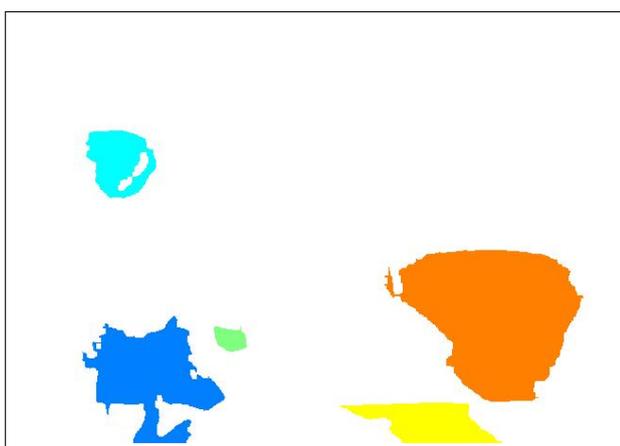


Abbildung 4.25: Reduzierte Filtermaske - In dieser Abbildung ist die nach Anwendung des CCA und regelbasierter Filterung entstandene Filtermaske zu sehen. Zusammenhängende Bereiche sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

duzierten Filtermaske wurden alle gelabelten Blobs entfernt, die weniger als 500 Pixel enthalten. Damit verbleiben nur noch solche Bereiche in der Filtermaske, die durch die Handbewegung des Werkers verursacht worden sind. Von diesen Bereichen können nun die Eckpunkte bestimmt werden. Nutzt man die Grenzen dieser Eckpunkte zum Aufspannen eines Rechtecks, so können die Blobs mit Bounding Boxes eingefasst werden. Diese rechteckigen Bounding Boxes lassen sich nun in das Originalbild eintragen. Abbildung 4.26 zeigt das Ergebnis der vorgestellten Bewegungsanalyse am Beispiel des Ausgangsbildes Abbildung 4.19(b). In Abbildung 4.26 sind Bereiche mit

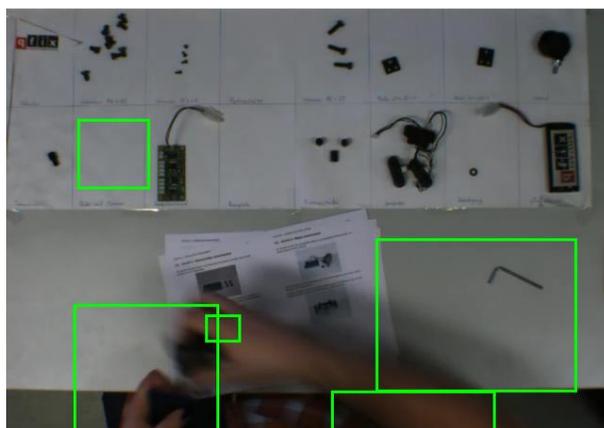


Abbildung 4.26: Werker-Aufnahme nach der Bewegungsanalyse - In dieser Abbildung sieht man die Überlagerung des Originalbildes mit der Bewegungsanalyse der Szene. Die Bereiche, die Pixel-Änderungen enthalten, sind grün umrahmt.

enthaltenen Bewegungen mit grünen Rechtecken umfasst. Bei genauerer Betrachtung der fünf Bereiche fällt auf, dass der linke obere Bereich eine Änderung durch Entnahme eines Bauteils erfahren hat. Die Bounding Box befindet sich exakt an der Stelle, an der sich zuvor das Bauteil befunden hat, das der Werker in seinen Händen hält. Somit ist es mit der vorgestellten Analysemethode möglich, Änderungen im Bauteilager erkennen zu können, wenn die Änderung in einem genügend großen Bereich der Bildebene stattgefunden hat. Ferner ist festzuhalten, dass durch die beschriebenen Verarbeitungsschritte der Suchbereich in der Filtermaske um ein Vielfaches reduziert wurde.

Die Analyse der Kameraaufnahme kann nun innerhalb der extrahierten Blobs und den zugehörigen Bounding Boxes fortgeführt werden. Mit der Überlagerung von Originalbild und aufbereiteter Binärmaske sind nur veränderte Regionen in der gerade beobachteten Szene sichtbar. Diese Bereiche mit Pixel-Änderungen können im nächs-

ten Verarbeitungsschritt weiter analysiert werden. Die unveränderten Bereiche wurden bei dieser Operation maskiert und somit aus der Verarbeitungskette entfernt.

4.3.2.4 Optischer Fluss

Für eine statistische Auswertung von 2D-Kamerabildern sind Merkmale erforderlich, die eine Interpretation der gemachten Beobachtungen ermöglichen. In Padoy et al. [33] werden sogenannte *Motion-Flow-Vektoren* als Merkmale verwendet, um den Fortschritt einer laparoskopischen Gallenblasenoperation Kamera-basiert zu erkennen. Diese Art von Merkmalen werden in dieser Dissertation analog verwendet, um den aktuellen Arbeitsvorgang in der manuellen Montage zu erkennen.

In Padoy et al. [33] wird die Verwendung von 3D-Motion-Flow-Vektoren beschrieben, die aus Videoaufnahmen eines Multi-Kamerasystems gewonnen werden. Dieses Multi-Kamerasystem ist in einem Operationssaal installiert und alle Kameras sind zueinander kalibriert. Ziel ist es, hier videobasiert zu erkennen, in welchem Schritt sich die operierenden Ärzte gerade befinden. Dazu werden Videosequenzen aus verschiedenen Positionen des OP-Saals synchronisiert aufgezeichnet. Die einzelnen Datenströme werden anschließend in eine 3D-Repräsentation der Operationsszene zusammengeführt. Aus diesem 3D-Modell werden Bewegungsvektoren von Pixeln innerhalb des überwachten Saals als Merkmale gewonnen.

Bei der Aufnahme einer 3D-Szenerie mittels einer Kamera entsteht eine 2D-Repräsentation der betrachteten Szene. Dies entspricht einer Aufnahme aus nur einem Kamerawinkel im OP-Szenario [33] und bedeutet die Projektion einer Raumbewegung auf eine 2D-planare Bildebene. Im Fall einer Videoaufnahme entsteht so ein Bewegungsfeld innerhalb der Projektionsebene der Kamera. Zur Extraktion der Änderungen innerhalb dieses Bewegungsfeldes wird der *optische Fluss*¹ bestimmt. Im in Abbildung 4.14 dargestellten Versuchsaufbau wird dazu eine 2D-Kamera verwendet, um die Bewegungen des Werkers zu erfassen. Somit werden die zu bestimmenden Bewegungsvektoren zwischen den aufgenommenen Bildern im 2D-Fall betrachtet.

Die Verfolgung von markanten Pixeln innerhalb der Bildebene wird beim Optical Flow-Algorithmus durch den Bewegungsvektor $\vec{p} = [x(t), y(t)]^T$ in einem Bild F_t zum Zeitpunkt t und dem darauf folgenden Bild $F_{t+T} = F_t(t+T)$ mit der neuen Position $\vec{q} = [x(t+T), y(t+T)]^T$ einen Zeitschritt T später beschrieben. Ein Zeitschritt T entspricht dabei $T = \frac{1}{fps}$, wobei mit fps die Frequenz bezeichnet wird, die die verwendete Kamera benötigt, um zwei Bilder bereitzustellen (Bildwiederholrate).

¹optischer Fluss (engl. *Optical Flow*)

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

Bewegte Pixel werden im Folgenden *Merkmale* genannt. Wird ein analysiertes Pixel in aufeinanderfolgenden Bildern wiedergefunden und korrekt dem ursprünglichen Pixel zugeordnet, wird dieser Vorgang als Tracking des Pixels bezeichnet. Dieser Vorgang ist schematisch in Abbildung 4.27 dargestellt. Hier ist das Bild F_t zum Zeitpunkt t

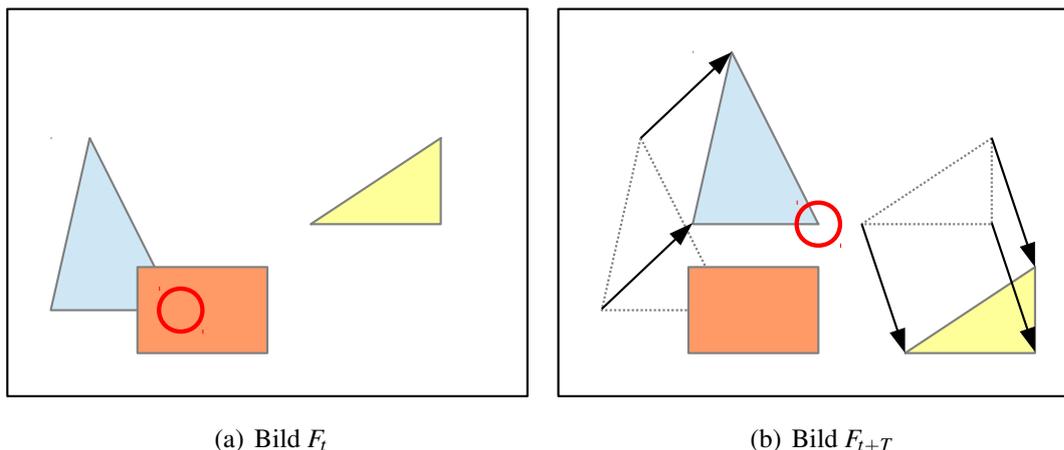


Abbildung 4.27: Schematische Darstellung des Optical Flow - Im zeitlichen Verlauf der beiden Bilder F_t und F_{t+T} verändern die farbigen Dreiecke ihre Positionen. Sichtbare markante Bildpunkte wandern dabei in die dargestellte Pfeilrichtung. Diese Bildpunkte können verfolgt werden, da sie sowohl im Ausgangsbild, als auch im Zielbild vorhanden sind. Im Falle einer Verdeckung (rot markierte Bereiche) kann keine Punktkorrespondenz gefunden werden, da die Ecke des blauen Dreiecks im ersten Bild durch das orange gefärbte Rechteck verdeckt ist. Abbildung in Anlehnung an [91].

und das zeitlich veränderte Bild F_{t+T} zum Zeitpunkt $t + T$ zu sehen. Wie zu erkennen ist, bewegen sich das blaue und das gelbe Dreieck in unterschiedliche Richtungen. Mittels Optical Flow können prägnante Bildpunkte (Merkmale) in dieser Bewegung verfolgt werden. Diese Bewegung ist in Abbildung 4.27(b) mit Pfeilen dargestellt. In dieser schematischen Darstellung können die Korrespondenzen der Eckpunkte des gelben Dreiecks im Folgebild F_{t+T} wiedergefunden werden. Für das blaue Dreieck klappt das nur für zwei der drei Eckpunkte. Merkmale im Ausgangsbild F_t sind hier durch das orange gefärbte Rechteck verdeckt. Dadurch können im Zielbild F_{t+T} keine Korrespondenzen gefunden werden. Diese Verdeckung ist exemplarisch mittels eines roten Kreises in der Darstellung eingezeichnet. Eine mathematische Beschreibung der Bewegung \vec{d} der Punktkorrespondenzen \vec{p} und \vec{q} ist wie folgt definiert:

$$\vec{d} = \vec{q} - \vec{p} \quad (4.5)$$

Der berechnete Translationsvektor \vec{d} beschreibt somit den Optical Flow des zugehörigen Pixels über den Zeitschritt T . Das Tracking solcher Pixel mittels Optical Flow auf Basis von 2D-Bildmaterial erfolgt nach Lucas und Kanade [34].

Lucas-Kanade-Algorithmus In einem Bild können markante Merkmale (wie z. B. Ecken und Kanten) verfolgt werden. Weisen solche Merkmale Unterschiede in ihren Eigenschaften auf, so lassen sie sich über eine zeitliche Abfolge von Bildern korrekt zueinander zuordnen und verfolgen. Sind sich Merkmale jedoch zu ähnlich, so können Pixel-Korrespondenzen nicht ohne Weiteres korrekt gefunden werden. Idealerweise sollten für jedes Pixel im Ausgangsbild nur jeweils keine bis maximal eine Entsprechung im Zielbild vorhanden sein. Somit ist eine Eigenschaft zu finden, die die Ähnlichkeit der Merkmale beschreibt. Für die folgende Erklärung wird aus Gründen der Vereinfachung das Folgebild F_{t+T} einer Videosequenz mit der Variable G bezeichnet.

Die Suche der Pixel-Korrespondenzen erfolgt in einem Ausschnitt des gesamten Bildbereichs: innerhalb einer *region of interest (ROI)*. Innerhalb dieser ROI wird ein sogenanntes Unähnlichkeitsmaß bestimmt, das als inverse Repräsentation der Ähnlichkeit von Punktkorrespondenzen zu verstehen ist. Lucas und Kanade [34] verwenden für dieses Maß ε : mittlerer quadratischer Fehler (engl. *mean square error*; MSE). Mathematisch wird der MSE wie folgt beschrieben:

$$\varepsilon = \sum_{\vec{x} \in R} \left[F(\vec{x} + \vec{d}) - G(\vec{x}) \right]^2 \quad (4.6)$$

Mit R wird hier die ROI beschrieben, die das Suchfenster aufspannt und den Bereich im Zielbild $F_{t+T} = F_t(t+T)$ repräsentiert, in welchem die Punktkorrespondenzen gesucht werden. Der Translationsvektor \vec{d} beschreibt die Bewegung des Bildpunktes von Bild F_t nach Bild F_{t+T} . Unter Verwendung der Näherung

$$F(\vec{x} + \vec{d}) \approx F(\vec{x}) + \vec{d} \nabla F(\vec{x}) \quad (4.7)$$

und anschließender Minimierung des MSE kann nach Lucas und Kanade [34] durch i Iterationen die Schätzung von \vec{d} weiter verfeinert werden. So lässt sich \vec{d} in Abhängigkeit von der Anzahl der ausgeführten Iterationen i als Schätzung angeben:

$$\vec{d} = \vec{d}_i \quad (4.8)$$

Die zuvor beschriebene Schätzung erfolgt innerhalb der ROI, die ebenfalls parametrisiert werden muss. Das Suchfenster wird allgemein mit dem Parameter $W = (w_x, w_y)^T$

beschrieben, wobei dessen Größe durch $(2w_x + 1) \times (2w_y + 1)$ gegeben ist. Laut Bouget [35] ist die Verwendung von kleinen Fenstern vorteilhaft. So muss deren Inhalt nicht geglättet werden, was den Inhalt detailreicher macht und zu genaueren Ergebnissen führt. Für ein robustes Tracking sollten jedoch größere Fenster gewählt werden, damit der Suchbereich von Punktkorrespondenzen größer wird. Somit muss für ein gutes Ergebnis ein geeignetes Maß für die Fenstergröße gefunden werden, um die Vorteile von kleinen und großen Suchfenstern miteinander zu verbinden.

In Bouget [35] wird ein Algorithmus vorgestellt, der verschiedene Fenstergrößen für den vorgestellten Lucas-Kanade-Algorithmus implementiert. In dieser Arbeit wird eine mehrstufige pyramidale Darstellung F^L des Bildes F definiert, wobei L die Stufe der Pyramide angibt; die Bildgröße von F^L ist mit $n_x^L \times n_y^L$ gegeben. Das gesamte Bild F ist in Stufe $L = 0$ enthalten: $F^L|_{L=0} = F$, wobei $n_x^0 = n_x$ und $n_y^0 = n_y$ gilt. Alle weiteren Stufen lassen sich rekursiv darstellen:

$$\begin{aligned}
 F^L(x,y) = & \frac{1}{4}F^{L-1}(2x,2y) + \\
 & \frac{1}{8}[F^{L-1}(2x-1,2y) + F^{L-1}(2x+1,2y) + \\
 & F^{L-1}(2x,2y-1) + F^{L-1}(2x,2y+1)] + \\
 & \frac{1}{16}[F^{L-1}(2x-1,2y-1) + F^{L-1}(2x+1,2y-1) + \\
 & F^{L-1}(2x-1,2y+1) + F^{L-1}(2x+1,2y+1)]
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Die maximale Größe der resultierenden Bilder F^L sind gegeben durch:

$$n_x^L \leq \frac{n_x^{L-1} + 1}{2} \tag{4.10}$$

$$n_y^L \leq \frac{n_y^{L-1} + 1}{2} \tag{4.11}$$

Die Darstellung F^L je Stufe L nach Gleichung (4.9) lässt sich als Tiefpassfilterung mit anschließender Skalierung von F^{L-1} interpretieren, wodurch Aliasing-Effekte verhindert werden sollen. Diese Art der pyramidalen Darstellung ist auch als Gauß-Pyramide bekannt. Nach Bouget [35] haben sich Werte für die maximalen Skalierungsstufen L_{\max} von 2, 3 und 4 als praktikabel erwiesen.

Abbildung 4.28 zeigt exemplarisch eine pyramidale Darstellung eines Bildes F für $L_{\max} = 2$. Aus dem Ausgangsbild F^0 werden in diesem Beispiel die Abbildungen F^1 und F^2 mittels Tiefpassfilterung und anschließender Skalierung bestimmt. Nach Bouget [35] soll der Lucas-Kanade-Algorithmus auf allen pyramidalen Darstellungen F^L mit $L \leq L_{\max}$ angewendet werden. Eine detaillierte Beschreibung dieser pyramidalen Implementierung des Lucas-Kanade-Algorithmus ist in Bouget [35] zu finden.

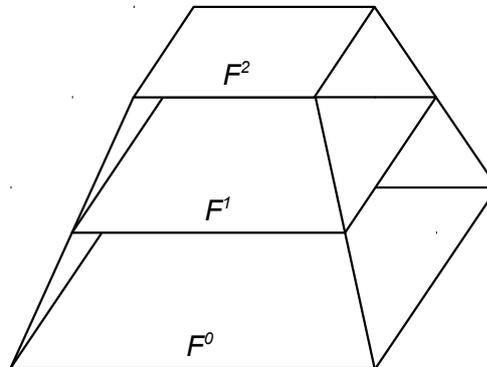


Abbildung 4.28: Schematische Darstellung einer pyramidalen Abbildung - Aus dem Ausgangsbild F^0 werden die Abbildungen F^1 und F^2 mittels Tiefpassfilterung und anschließender Skalierung bestimmt.

Feature-Selektion nach Shi und Tomasi Betrachtet man die beobachtete Szene aus der Werker-Assistenz (vgl. Abbildung 4.14), fällt auf, dass darin kaum Merkmale mit farblichen Details oder strukturierter Oberfläche enthalten sind. Somit stellt das Finden von Pixel-Korrespondenzen eine gewisse Herausforderung dar. Betrachtet man hier die große graue Arbeitsfläche im Kontext des Optical Flow, so werden Pixel auf der Arbeitsfläche wahrscheinlich zu einem fehlerhaften Tracking führen. Für ein exemplarisch gewähltes graues Pixel können leicht mehrere Korrespondenzen im Folgebild gefunden werden, da sich die Arbeitsfläche in großen Bereichen während der manuellen Montage nicht ändert. Aus diesem Grund ist ein Merkmal-Auswahlverfahren erforderlich, das sinnvolle Punkte zur Weiterverarbeitung mittels dem Optical Flow-Algorithmus liefert.

In Schweiger et al. [36] werden an zu verfolgenden Objekten Marker angebracht. Diese Marker weisen ein spezifisches Muster auf, anhand dessen die Objekte in Bild-daten leichter wiedergefunden und identifiziert werden können. Im Kontext dieser Dissertation wird jedoch auf zusätzlich Hilfsmittel verzichtet. Entsprechend sind im betrachteten Bild geeignete Merkmale zu bestimmen, die den Einsatz von Markern überflüssig machen. Diese Merkmale können z. B. Kanten mit hohen Ortsfrequenzen sein. Für solche Merkmale stellen Shi und Tomasi ein Verfahren vor, das an den Algorithmus von Lucas-Kanade adaptiert ist [37].

Muster von Bildintensitäten $F(x, y, t)$ und $G(x, y, t + \tau)$ weisen laut Shi und Tomasi [37] von einem Zeitpunkt t zu einem anderen Zeitpunkt $t + \tau$ komplexe Änderungen auf, häufig bedingt durch die Bewegung des Bildes. Die formale Beschreibung

$$F(x, y, t + \tau) = F(x - \xi(x, y, t, \tau), y - \eta(x, y, t, \tau)) \quad (4.12)$$

einer solchen Bewegung beinhaltet die Funktionsbeschreibung der Änderung ξ in x -Richtung und η in y -Richtung. Ein Bild $G(x, y, t + \tau)$ kann somit aus dem Ausgangsbild $F(x, y, t)$ erzeugt werden, indem jeder Pixel $\vec{x} = (x, y)$ um einen gewissen Bereich verschoben wird. Der Umfang dieses verschobenen Bereiches $\delta = (\xi, \eta)$ folgt der Beschreibung

$$\begin{aligned} \delta &= \mathbf{D}\vec{x} + \vec{d} \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} \\ d_{yx} & d_{yy} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.13)$$

wobei mit \mathbf{D} eine Deformationsmatrix bezeichnet wird und \vec{d} den Translationsvektor des Fenstermittelpunktes darstellt. Gleichung (4.13) beschreibt ein affines Bewegungsfeld in dem Kollinearität, Parallelität und Teilverhältnisse erhalten bleiben. Weitere Beschreibungen dieses Sachverhalts können Gallier [38] und Weisstein [39] entnommen werden. Setzt man den Nullpunkt in die Mitte des Bildes und beschreibt davon ausgehend die Bildkoordination mit dem Vektor \vec{x} , kann die Bewegung dieses Nullpunkts in einem Bild F an die neuen Koordinaten \vec{x}' mit

$$\begin{aligned} \vec{x}' &= \mathbf{A}\vec{x} - \vec{d} \\ \mathbf{A} &= \mathbf{D} + \mathbf{E} \end{aligned} \quad (4.14)$$

beschrieben werden. \mathbf{E} ist in diesem Fall gleich der (2×2) -Einheitsmatrix. Daraus ergibt sich der Ausdruck

$$G(\mathbf{A}\vec{x} - \vec{d}) = F(\vec{x}) \quad (4.15)$$

In einem Experiment haben Shi und Tomasi in [37] festgestellt, dass sich das Modell einer affinen Abbildung gut zur qualitativen Beurteilung von Merkmalen eignet. Zur Verbesserung des Trackings empfehlen Shi und Tomasi in [37], lediglich Translationen als Abbildung zuzulassen. Dadurch reduziert sich Gleichung (4.15) zu:

$$G(\vec{x} - \vec{d}) = F(\vec{x}) \quad (4.16)$$

Die Voraussetzung der affinen bzw. ausschließlich translatorischen Transformation gilt unter realen Bedingungen selten. Zur Modellierung von realem Verhalten wurde in Shi und Tomasi [37] und Lucas und Kanade [34] ein Restfehler ε eingeführt. Nach Tomasi und Kanade [40] sei nun $G(\vec{x}) = F(x, y, t + \tau)$ und $F(\vec{x} - \vec{d}) = F(x - \xi, y - \eta, t)$. Mit dieser Neudefinition ergibt sich das lokale Modell für Gleichung (4.12)

$$G(\vec{x}) = F(\vec{x} - \vec{d}) + n(\vec{x}) \quad (4.17)$$

mit Rauschfunktion $n(\vec{x})$. Der Restfehler ε wird wie folgt berechnet:

$$\varepsilon = \int_W \left[F(\vec{x} - \vec{d}) - G(\vec{x}) \right]^2 w(\vec{x}) d\vec{x} \quad (4.18)$$

Die Gewichtsfunktion $w(\vec{x})$ nimmt im einfachsten Fall den Wert $w(\vec{x}) = 1$ an. Als Alternative kann auch eine gaußsche Normalverteilung verwendet werden, um den zentralen Bereich des Fensters höher zu gewichten.

Der Restfehler ε soll nun minimiert werden. Dazu wird ε abgeleitet und gleich null gesetzt. Mittels Taylorreihen-Entwicklung nach Råde et al. [41] oder Merziger und Wirth [42] kann der Term $F(\vec{x} - \vec{d})$ ersetzt werden mit

$$F(\vec{x} - \vec{d}) = F(\vec{x}) - \vec{g} \cdot \vec{d} \quad (4.19)$$

Der Restfehler ε aus Gleichung (4.18) wird mit Gleichung (4.19) zu folgendem Ausdruck:

$$\varepsilon = \int_W \left[F(\vec{x}) - \vec{g} \cdot \vec{d} - G(\vec{x}) \right]^2 w(\vec{x}) d\vec{x} = \int_W \left(h - \vec{g} \cdot \vec{d} \right)^2 w(\vec{x}) d\vec{x} \quad (4.20)$$

Dabei gilt die Substitution $h = F(\vec{x}) - G(\vec{x})$. Wird Gleichung (4.20) nach \vec{d} abgeleitet und gleich null gesetzt, so erhält man folgende Vektorgleichung:

$$\int_W \left(h - \vec{g} \cdot \vec{d} \right) \vec{g} \cdot w(\vec{x}) dA = 0 \quad (4.21)$$

Da $(\vec{g} \cdot \vec{d})\vec{g} = (\vec{g}\vec{g}^T)\vec{d}$ und \vec{d} im Suchfenster W als konstant angenommen wird, ergibt sich folgende Gleichung:

$$\left(\int_W \vec{g}\vec{g}^T w(\vec{x}) dA \right) \vec{d} = \int_W h\vec{g}w(\vec{x}) dA \quad (4.22)$$

Mittels Taylorreihen-Entwicklung nach Råde et al. [41] oder Merziger et al. [42] für den Term $F(\vec{x} - \vec{d})$ und Minimierung des Restfehlers ε kann das System mit zwei Skalaren Gleichungen und zwei Unbekannten beschrieben werden. Dieses System lässt sich mit

$$\mathbf{K}\vec{d} = \vec{e} \quad (4.23)$$

zusammenfassen, wobei die symmetrische (2×2) -Koeffizientenmatrix \mathbf{K} und der 2D-Vektor \vec{e} gegeben ist mit:

$$\mathbf{K} = \int_W \vec{g}\vec{g}^T w(\vec{x})d\mathbf{A} \quad (4.24)$$

$$\vec{e} = \int_W (F(\vec{x}) - G(\vec{x})) \vec{g}w(\vec{x})d\mathbf{A} \quad (4.25)$$

Gleichung (4.23) ist der grundlegende Schritt der Tracking-Prozedur. Für jedes Paar aus benachbarten Bildern kann die Matrix \mathbf{K} aus einem Bild durch Abschätzen ihrer Gradienten und Berechnung ihrer Momente zweiter Ordnung berechnet werden. Der Vektor \vec{e} kann aus der Differenz zwischen den beiden Bildern F und G und dem oben berechneten Gradienten bestimmt werden. Die Verschiebung \vec{d} ist dann die Lösung des Systems aus Gleichung (4.23). Liefert das System gute Ergebnisse, kann ein Fenster Bild-weise verfolgt werden. Dazu muss sich das System zuverlässig lösen lassen. Um nun mittels Shi und Tomasi Bildbereiche zum Tracking verwenden zu können, wird nach Tomasi und Kanade [40] ein Fenster mit den Eigenwerten λ_1 und λ_2 von \mathbf{K} verwendet, wenn

$$\min(\lambda_1, \lambda_2) > \lambda \quad (4.26)$$

ist. λ entspricht dabei einem vordefinierten Schwellwert. Anhand des vorgestellten Verfahrens können nun Pixel in der Montageszene ausgewählt werden, die sich gut verfolgen lassen. Von diesen Pixeln werden mittels Optical Flow-Bewegungsvektoren gewonnen, die als Merkmale für die Erkennung des aktuell vom Werker bearbeiteten Arbeitsvorgangs verwendet werden.

4.3.3 Bestimmung des Arbeitsvorgangs mittels Hidden-Markov-Modellen

Während der manuellen Montage des Produkts werden im vorgestellten Versuchsaufbau die Bewegungen der Hände des Werkers mittels einer 2D-Kamera von oben aufgezeichnet. Zugehörige Bewegungsvektoren wurden mittels des Optical Flow-Algorithmus extrahiert und dienen für die im Folgenden diskutierten Betrachtungen als Merkmale zur Bestimmung des aktuellen Arbeitsvorgangs des Werkers. Damit der aktuelle Arbeitsvorgang bestimmt werden kann, ist es erforderlich diese Merkmale auszuwerten. Basierend auf dieser Auswertung und deren Ergebnis erfolgt anschließend eine Abschätzung bezüglich des Fortschritts des Werkers bei seiner Montageaufgabe.

4.3.3.1 Themenbezogene Arbeiten

Die Inspiration zur Verwendung eines HMMs in dieser Dissertation ist aus Arbeiten zur Erkennung des Fortschritts während einer Operation entstanden. Padoy et al. präsentieren dazu in [43] ihren Ansatz. Die Aufgabenstellung in ihrer Arbeit ist die Erkennung der einzelnen Arbeitsschritte während einer laparoskopischen Gallenblasenoperation. Ausgangsbasis sind Videodaten, die durch das verwendete Laparoskop (ein spezielles Endoskop) aufgezeichnet wurden. Ferner verfügt der Operationsaal über mehrere Videokameras, die die Vorgänge während der OP aufzeichnen. Die Beobachtungen, die zum Training des HMMs verwendet werden, sind binäre Merkmale, die nach der Aufnahme der Videodaten mittels einer händischen Annotation extrahiert wurden. Diese Merkmale entsprechen jeweils einer Kennziffer, die die Verwendung der zugeordneten Operationsinstrumente anzeigen.

In Blum et al. [44] wird bei dem gleichen Operationsszenario die Modellierung des HMMs ausführlicher diskutiert. Zum Vereinen von ähnlichen Zuständen im HMM wird hier das Verfahren des Model Merging angewandt. Die theoretischen Grundlagen des Model Merging werden in Stolcke und Omohundro [45] und [46] erklärt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, die Struktur des HMMs zu vereinfachen.

Ausgehend vom zuvor beschriebenen Laparoskopie-Szenario, gehen Padoy et al. in [33] auf Merkmale ein, die sich aus dreidimensionalen Bewegungsvektoren außerhalb des laparoskopischen Bildes erzeugen lassen. Dazu werden die im Operationsaal installierten Kameras verwendet. Ein aus neun kalibrierten Kameras aufgezeichnetes Video wird ausgewertet und eine 3D-Okkupationsmodell der Szene erzeugt. Dieses Modell besteht aus der räumlichen Abtastung der aufgenommenen Szene. Dazu wird das gesamte Volumen des Operationsaals in $3 \times 3 \times 2$ gleich große Blöcke unterteilt. In jedem dieser Blöcke wurden die beinhalteten Optical Flow-Informationen bestimmt und dem HMM zugeführt, um damit die Arbeitsschritte während der Operation zu trainieren.

4.3.3.2 Theoretische Grundlagen

Das übergeordnete Ziel in diesem Abschnitt der Dissertation ist die automatische Arbeitsschritterkennung. Eine mögliche Methode zur Extraktion einzelner Arbeitsvorgänge aus einer Videosequenz ist das im Szenario der Laparoskopie verwendete HMM. Ursprünglich wurden HMMs im Gebiet der Spracherkennung eingesetzt. Diese Modelle eignen sich gut zur Modellierung von Prozessen variabler Länge. Außerdem sind diese Modelle gut für die Repräsentation von Vorgängen geeignet, die je nach ausführender Person unterschiedlich lang bearbeitet werden, sich im Ergebnis aber nicht

unterscheiden [28]. Die für die Durchführung eines Arbeitsvorgangs benötigte Zeit ist im Allgemeinen abhängig von der Person des Werkers, da jeder Mensch unterschiedlich schnell arbeitet.

Die Montageaufgaben der Werker bestehen typischerweise aus mehreren Arbeitsschritten, die sich je nach Komplexität in der benötigten Ausführungszeit voneinander unterscheiden können. Bei der Montage des Crash-Bobby ist z. B. das Anbringen einer Schraube schneller durchführbar, als die Montage der Hauptplatine inklusive Verkabelung. Zusätzlich ist zu beachten, dass verschiedene Werker sich unterschiedlich bei ihren Greifvorgängen verhalten. Ein System zur Arbeitsschritterkennung muss diese Eigenschaft berücksichtigen, da ein Arbeitsvorgang verschiedene Arbeitsschritte zusammenfasst. Es muss flexibel auf die Ausführungszeit innerhalb eines Arbeitsschritts reagieren, auch wenn sich diese deutlich von einer Referenzzeit unterscheidet. Wie bereits in Abschnitt 4.3.3.1 vorgestellt, haben sich HMMs in Referenzansätzen zum Thema der Arbeitsschritterkennung bewährt. Ein Vorteil von diesem Ansatz ist die Möglichkeit, Prozesse mit variabler Dauer modellieren zu können.

Hidden-Markov-Modelle Als einfachste Form eines Dynamischen Bayesschen Netzes [47] beschreibt ein HMM zeitdiskrete stochastische Modelle. Eine umfassende Einführung in die Grundlagen eines HMMs gibt Rabiner in [48].

Generell basiert ein HMM auf einem herkömmlichen Markov-Modell mit N Zuständen der Menge $S = \{s_1, \dots, s_N\}$. Ein Zustand zum diskreten Zeitpunkt t wird mit q_t bezeichnet. Die Menge an Zuständen Q besteht aus der Sequenz $Q = \{q_1, \dots, q_t\}$. Zum Zeitpunkt $t = 1$ wird mit der Anfangswahrscheinlichkeitsverteilung $\pi = \{\pi_i\}$ der Startzustand des Modells beschrieben:

$$\pi_i = P[q_1 = s_i] \quad (4.27)$$

Die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Zustandswechsels von s_i zum Zeitpunkt t auf den Zustand s_j zum Zeitpunkt $t + 1$, wobei gilt:

$$a_{ij} = P[q_{t+1} = s_j | q_t = s_i], \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (4.28)$$

Die Bestimmung der Parameter π und \mathbf{A} erfolgt anhand bekannter Trainingsdaten der Zustandssequenz $Q_{\text{training},t}$. In Abbildung 4.29 ist ein einfaches Markov-Modell mit drei Zuständen abgebildet. Die Übergangswahrscheinlichkeiten in der Matrix \mathbf{A} sind in diesem Beispiel mit a_{ij} angegeben. Die Sprungrichtung im Index bezeichnet die zugehörigen Zustände $i \rightarrow j$.

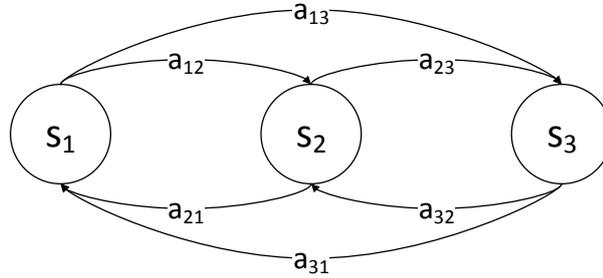


Abbildung 4.29: Markov-Modell - Das abgebildete Markov-Modell verfügt über drei Zustände s_1 , s_2 und s_3 . Die Übergangswahrscheinlichkeiten sind mit a_{ij} angegeben, wobei die Sprungrichtung im Index mit $i \rightarrow j$ gegeben ist.

Betrachtet man reale stochastische Vorgänge, sind nicht immer alle Zustände bekannt, bzw. observierbar. Um diese Eigenschaft modellieren zu können, wird das zuvor beschriebene Modell um Beobachtungen erweitert, die stochastische Rückschlüsse auf die zugrundeliegenden Zustände zulassen. Die Erweiterung dieses Markov-Modells um Emissionen wird als HMM bezeichnet. Dazu wird zusätzlich zur Anfangswahrscheinlichkeitsverteilung π und der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix \mathbf{A} noch durch eine Menge von Beobachtungen $V = \{v_1, \dots, v_M\}$ erweitert, wobei M die Anzahl der Emissionen repräsentiert. Die Beobachtung zum diskreten Zeitpunkt t wird im Folgenden mit O_t bezeichnet. Zur vollständigen Beschreibung eines HMMs muss noch die stochastische Abhängigkeit zwischen Zuständen und Emissionen definiert werden. Bei diskreten Emissionen wird hierzu eine Beobachtungsmatrix $\mathbf{B} = \{b_{jk}\}$ eingeführt, die die Wahrscheinlichkeiten beschreibt, dass in einem Zustand s_j eine Beobachtung v_j festgestellt werden kann, d.h.

$$b_j(k) = P[v_{k,t} | q_t = s_j], \quad \begin{matrix} 1 \leq j \leq N \\ 1 \leq k \leq M \end{matrix} \quad (4.29)$$

In Abbildung 4.30 ist die aus Abbildung 4.29 bekannte Markov-Kette dargestellt. Diese wurde um $M = 4$ Emissionen erweitert und beschreibt somit ein HMM. Die Wahrscheinlichkeiten der zugehörigen Beobachtungen $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{33}, b_{34}$ sind in rot eingezeichnet.

Rabiner diskutiert in [48] vor allem HMMs mit diskreten Emissionen. Für normalverteilte Emissionen werden anstatt der Beobachtungsmatrix \mathbf{B} eine Mittelwertmatrix $\mathbf{M} = \{\mu_{ij}\}$ und eine Liste von Kovarianzmatrizen $\Sigma = \{\sigma_{ijk}\}$ verwendet. Diese sind

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

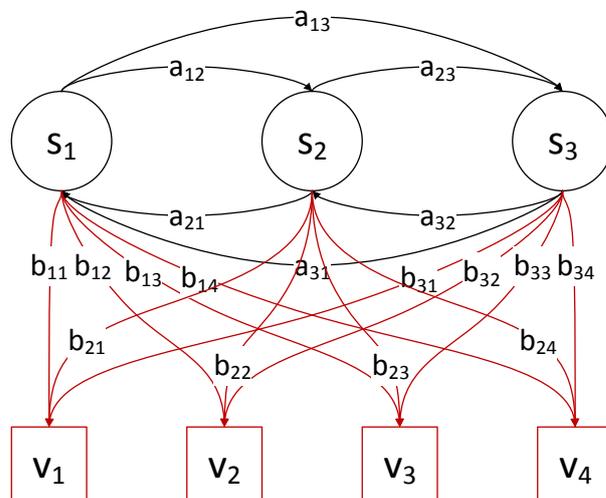


Abbildung 4.30: HMM - In dieser Abbildung ist ein HMM mit drei Zuständen und vier Emissionen v_1, v_2, v_3 und v_4 dargestellt. Die zugehörigen Beobachtungswahrscheinlichkeiten $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{33}, b_{34}$ sind rot eingezeichnet.

nach Bicego et al. [49] wie folgt definiert:

$$\mu_{ij} = E [Y = y_i | S = s_i] \quad (4.30)$$

$$\sigma_{ijk} = E [(y_i - \mu_{ik}) \cdot (y_j - \mu_{jk})] \quad (4.31)$$

Die Wahrscheinlichkeit einer Emission O bei gegebenem μ und σ berechnet sich mittels der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zu:

$$f(O) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{O-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.32)$$

Mit diesen Größen lässt sich ein HMM mit diskreten oder normalverteilten Emissionen eindeutig beschreiben:

diskrete Emissionen: $\lambda = (N, \mathbf{M}, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \pi) \quad (4.33)$

normalverteilte Emissionen: $\lambda = (N, \mathbf{M}, \mathbf{A}, \mu, \sigma, \pi) \quad (4.34)$

Als Ausgang eines HMMs wird eine Sequenz aus Observationsen $O = (O_1, \dots, O_T)$ erzeugt. Jedes O_t für $1 \leq t \leq T$ mit der Prozessdauer T stellt dabei eine Observation in einem M -dimensionalen Vektor dar. Mit bekannten Trainingsdaten bestehend aus der Zustandssequenz $Q_{\text{training},t}$ und den zugehörigen Emissionen $O_{\text{training},t}$ lassen sich

die Parameter \mathbf{B} bzw. μ und σ des HMMs entsprechend Gleichung (4.29) bis Gleichung (4.31) bestimmten. Mit der Schätzung der verbleibenden Parameter \mathbf{A} und π kann aus geeigneten Trainingsdaten die vollständige Beschreibung λ des betrachteten HMMs modelliert werden. Dazu wird im Rahmen dieser Dissertation der Expectation-Maximization-Algorithmus (EM-Algorithmus) verwendet. Weiterführende Informationen zu dieser Lernmethode sind in Dempster [50] und Bilmes [51] enthalten. Anhand des modellierten HMMs und den per EM-Algorithmus bestimmten Parametern λ soll nun aus einer Sequenz von Emissionen die zugrundeliegende Zustandssequenz zugeordnet werden. Die Problemstellung der Decodierung beschreibt Rabiner [48] als die Aufgabenstellung, aus einer gegebenen Sequenz von Emissionen $O = (O_1, \dots, O_T)$ die wahrscheinlichste Zustandssequenz $Q = (q_1, \dots, q_T)$ zu bestimmen. In Bezug auf die im Kontext dieser Dissertation untersuchte Arbeitsschritterkennung bedeutet dies die Aufgabe, aus einer Sequenz von während der Montage eines Produkts gemachten Beobachtungen auf den Zustand der Baugruppe zu schließen. Dieser Baugruppenzustand entspricht dem Fortschritt des Werkers im Montageablaufplan.

Die Decodierung ist dabei zu verschiedenen Zeitpunkten möglich. Padoy et al. [33] unterscheiden diese Zeitpunkte in Offline- und Online-Decodierung. Bei der Offline-Decodierung ist zum Zeitpunkt $t \geq T$ die Emissionssequenz $O = [O_1, \dots, O_T]$ über die betrachtete Prozessdauer T bereits bekannt. Entsprechend erfolgt die Decodierung nach Aufnahme der Sequenz. Dadurch ist bei dieser Methode keine Echtzeitanwendung möglich, da alle zu analysierenden Daten vorliegen müssen.

Bei der Online-Decodierung liegt zum Zeitpunkt t nur eine partielle Emissionssequenz $O = [O_1, \dots, O_t]$ vor. Die Decodierung ist hier bereits vor Erreichen der Prozessdauer T möglich. Bei ausreichender Rechenleistung ist so eine echtzeitfähige Anwendung realisierbar.

Im Kontext dieser Dissertation wurde auf eine Online-Decodierung verzichtet. In diesem Abschnitt geht es um die Untersuchung der prinzipiellen Anwendbarkeit eines HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung in der manuellen Montage. Dazu wird eine Offline-Decodierung verwendet. Für diese Methode empfiehlt Rabiner [48] den Viterbi-Algorithmus.

Viterbi-Algorithmus Nach Forney [52] kommt der Viterbi-Algorithmus in der dynamischen Programmierung in vielen Teilgebieten der Elektrotechnik zum Einsatz. Um aus einer Sequenz von Observationen bei gegebenem HMM die wahrscheinlichste Sequenz von nicht beobachtbaren Zuständen zu bestimmen, wird der Viterbi-Algorithmus verwendet. Die allgemeine Beschreibung des Viterbi-Algorithmus kann aus

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

Forney [53] und Rabiner [48] für den Anwendungsfall eines HMMs entnommen werden.

In der Literatur wird der Viterbi-Algorithmus meist anhand von Trellis-Diagrammen veranschaulicht. Abbildung 4.31 zeigt dazu ein einfaches Beispiel eines Trellis-Diagramms mit $N = 3$ Zuständen und einer Prozessdauer von $T = 5$ Schritten. Die

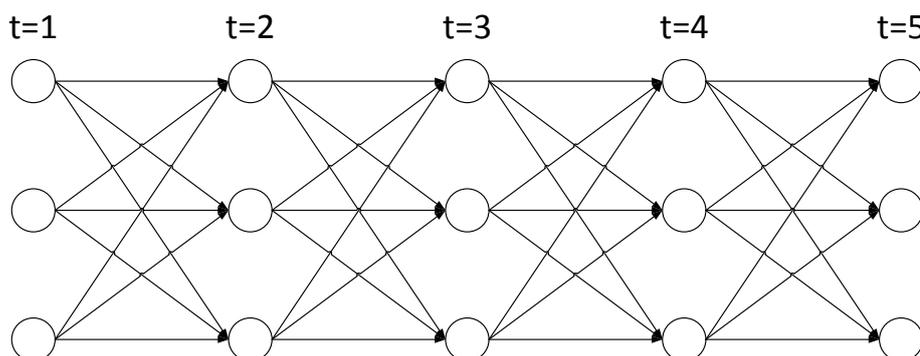


Abbildung 4.31: Trellis-Diagramm - Mögliche Pfade zur Veranschaulichung des Viterbi-Algorithmus: $N = 3$ Zustände, Prozessdauer $T = 5$.

einzelnen Zustände sind mit Pfeilen verbunden. Ein Weg durch das Trellis-Diagramm wird als Pfad bezeichnet. Zur Decodierung wird die Größe $\delta_t(i)$ als die höchsten Wahrscheinlichkeiten entlang des i -ten Pfades definiert. Zur Rückverfolgung der Pfadwahrscheinlichkeiten wird ein Array $\psi_t(j)$ verwendet. Darin werden die jeweiligen Wahrscheinlichkeit abgelegt.

Zur Decodierung durchläuft der Algorithmus die vier Schritte *Initialisierung*, *Rekursion*, *Terminierung* und *Pfadrückverfolgung*. Im Folgenden werden diese Schritte für diskrete Emissionen näher betrachtet. Bei normalverteilten Emissionen seien die Emissionswahrscheinlichkeiten b_i bzw. b_j durch die entsprechenden Werte nach Gleichung (4.32) zu ersetzen.

Zum Startzeitpunkt $t = 1$ werden die beiden Größen $\delta_t(i)$ und $\psi_t(j)$ wie folgt initialisiert:

$$\delta_1(i) = \pi_i b_i(O_1), \quad 1 \leq i \leq N \quad (4.35)$$

$$\psi_1(i) = 0 \quad (4.36)$$

$\delta_1(i)$ wird aus der Anfangswahrscheinlichkeitsverteilung π und den Beobachtungswahrscheinlichkeiten $b_i(O_1)$ berechnet. $\psi_1(i)$ wird mit 0 initialisiert. Anschließend

wird $\delta_t(i)$ für $t > 1$ vorwärts-rekursiv bestimmt:

$$\delta_t(j) = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i)a_{ij}] b_j(O_t), \quad 2 \leq t \leq T, \quad 1 \leq j \leq N \quad (4.37)$$

$$\psi_t(j) = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i)a_{ij}], \quad 2 \leq t \leq T, \quad 1 \leq j \leq N \quad (4.38)$$

Die Pfadwahrscheinlichkeiten zum Zeitpunkt t werden aus den Wahrscheinlichkeiten zum Zeitpunkt $t - 1$ rekursiv berechnet. Der Endzustand \hat{q}_T wird entsprechend der Gleichung (4.39) ermittelt:

$$\hat{q}_T = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_T(i)] \quad (4.39)$$

Ausgehend vom Endzustand zum Zeitpunkt T werden die Schätzungen für die Zustände \hat{q}_t zu den zurück liegenden Zeitpunkten $t = T - 1, T - 2, \dots, 1$ entsprechend der Gleichung (4.40) rückwärts-rekursiv bestimmt:

$$\hat{q}_t = \psi_{t+1}(\hat{q}_{t+1}), \quad t = T - 1, T - 2, \dots, 1 \quad (4.40)$$

In Abbildung 4.32 ist ein Beispiel einer solchen Decodierung dargestellt. Der darge-

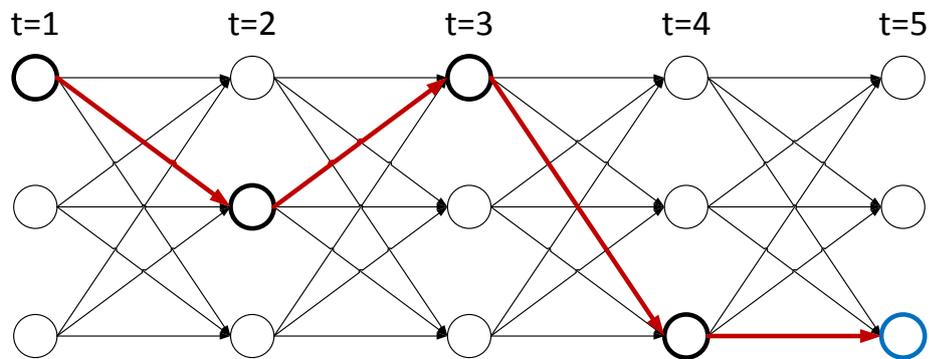


Abbildung 4.32: Decodierung im Trellis-Diagramm - Die Terminierung des Viterbi-Algorithmus erfolgt im blau markierten Zustand. Der rückverfolgte Pfad ist in rot hervorgehoben.

stellte Beispielpfad wurde im blau markierten Zustand zum Zeitpunkt $t = T$ terminiert. Der rückverfolgte Pfad \hat{Q} ist in rot hervorgehoben. Ausgehend von einem HMM mit zugehörigem λ und einer Sequenz von Observationen ist es mittels des Viterbi-Algorithmus möglich, eine Schätzung für den Pfad \hat{Q} zu ermitteln. Nach Anwendung des Viterbi-Algorithmus liegt die wahrscheinlichste nicht beobachtbare Zustandssequenz vor, die die beobachteten Emissionen verursacht haben könnte.

4.3.3.3 Technische Realisierung der HMM-basierten Arbeitsschritterkennung

In diesem Abschnitt wird die technische Realisierung der HMM-basierten Erkennung des Arbeitsvorgangs beschrieben. Als Input für die statistische Auswertung der Videodaten werden die in Abschnitt 4.3.2.4 beschriebenen Optical Flow-Merkmale verwendet. Aus diesen Daten werden die Emissionen erzeugt, die anschließend mittels eines HMMs ausgewertet werden.

Optical Flow-Emissionen Der Werker arbeitet während der Montage des Crash-Bobbys mit seinen Händen und wird dabei mit einer 2D-Kamera von oben überwacht. Um auf den aktuellen Arbeitsvorgang rückschließen zu können, soll der Zustand des Produkts geschätzt werden. Dies erfolgt anhand der Beobachtungen, die beinhalten, welche Bauteile vom Werker gegriffen und verarbeitet werden. Jede Bauteilkategorie befindet sich dabei sortiert in einem bestimmten Bereich auf der Arbeitsfläche. Damit die Aktivität des Werkers Bauteilen zugeordnet werden kann, ist der Arbeitsbereich in diese Lagerflächen unterteilt. Eine weitere Region auf dem Arbeitstisch ist für den eigentlichen Montagebereich des Werkers reserviert (vgl. Abbildung 4.14).

Die Merkmale, die zum Training des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung und später zur Auswertung von Aufnahmen verwendet werden, sind die aus den Videodaten berechneten Optical Flow-Vektoren. Dazu werden zwei zeitlich aufeinanderfolgende Bilder F und G analysiert und die Verschiebung \vec{d} der beinhalteten Pixel mittels Optical Flow berechnet. Jedem dieser Punktkorrespondenzen in \vec{d} kann eine Position im Bild zugeordnet werden. Unter der Annahme, dass die Handbewegung des Werkers die Ursache für die berechnete Verschiebung war, können diese so den Regionen im Bildbereich zugeordnet werden. Das Kamerabild wird in Bereiche für die 16 Bauteilklassen unterteilt. Der Arbeitsbereich des Werkers stellt einen weiteren Bereich im Bild dar. Somit lassen sich die Bilder F in $M = 17$ Bildregionen unterteilen.

Als Emissionen für das HMM werden nun die Bewegungsvektoren \vec{d} den M Bildregionen zugeordnet. Die Anzahl der Bewegungsvektoren je Bildregion wird als Wert für die zugeordnete Emission verwendet. Dieses Vorgehen ist analog zur 3D-Unterteilung der Aufnahme des Operationssaals aus der Arbeit von Padoy et al. [33] zu verstehen (vgl. Abschnitt 4.3.3.1). Als Emissionen verwenden Padoy et al. die Intensität der Bewegung in den einzelnen Raumsegmenten. Analog dazu wird in diesem Abschnitt die Anzahl der Bewegungsvektoren innerhalb einer Bildregion als Intensität der Bewegung in diesem Bereich verstanden.

Die technische Realisierung des Optical Flow wurde mittels der Bildverarbeitungs-bibliothek OpenCV¹ vorgenommen. Hier sind die Merkmalsselektion nach Shi und Tomasi und der pyramidale Lucas-Kanade-Algorithmus bereits implementiert. Notwendige Parameter zur Verwendung dieser Funktionen in OpenCV sind in Stavens [54] und Bradski und Kaehler [55] zu finden. Der Ablauf der Verarbeitungskette ist in Abbildung 4.33 dargestellt. Zunächst wird ein Farbbild mit der Kamera aufgenommen.

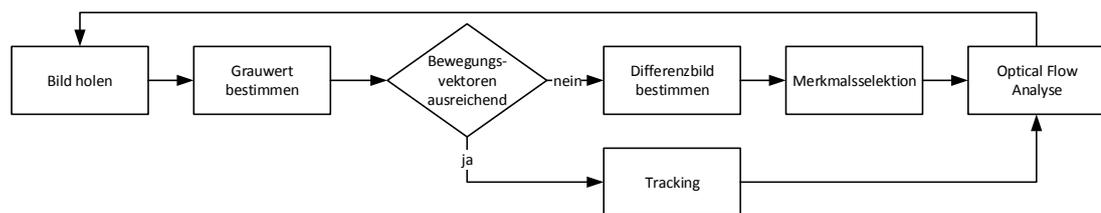


Abbildung 4.33: Verarbeitungskette Optical Flow - Dieses Flussdiagramm zeigt die notwendige Verarbeitungskette, die die Kamerabilder zur Extraktion der Optical Flow-Merkmale durchlaufen müssen.

Anschließend wird dieses Bild in Graustufen konvertiert, da die verwendeten OpenCV-Funktionen nicht auf Farbbilder anwendbar sind. Wie sich nach ersten Versuchen gezeigt hat, treten im analysierten Bild auch Bewegungen in Bereichen auf, die nicht durch die Bewegung der Hände des Werkers verursacht wurden. Ein Grund hierfür ist z. B. das Bildrauschen der Kamera. Um diese unerwünschten Effekte auszuschließen, wurde der Suchbereich für Bewegungsvektoren des Optical Flow auf relevante ROIs eingeschränkt. Dazu wird das Differenzbildverfahren aus Abschnitt 4.3.2.1 verwendet, um die Filtermaske zu erstellen. Die verwendeten OpenCV-Funktionen unterstützen die Einschränkung des Suchbereichs mittels einer solchen Filtermaske. Somit erfolgt die Merkmalsselektion nach Shi und Tomasi in der ROI des aufgezeichneten Kamerabildes. Anschließend werden dort die Optical Flow Bewegungsvektoren bestimmt. Nach dieser Verarbeitungskette startet der Vorgang erneut mit dem Holen eines neuen Bildes. Da anhand der Bewegungsvektoren ein Tracking mittels Lucas-Kanade-Algorithmus möglich ist, wird dieser Algorithmus verwendet, sofern ausreichend Bewegungsvektoren zur Verfügung stehen. Sollte dies nicht der Fall sein, muss erneut die Merkmalsselektion nach Shi und Tomasi durchgeführt werden.

Bewegt der Werker seine Hände über längere Zeit im Bildbereich der Kamera nicht, so kann dort der Suchbereich für den Optical Flow verloren gehen. Keine Bewegung würde mittels Differenzbild eine starke Einschränkung des Suchbereichs bedeuten.

¹<http://opencv.org>

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

Durch das Vorhalten der Merkmale über einen längeren Zeitraum hinweg wurde dieser Umstand umgangen. Merkmale wurden in bewegten Bereichen des Bildes gesucht und anschließend zum Tracking verwendet. Sollten über eine längere Zeitspanne hinweg die Anzahl der verwendeten Merkmale unter eine Schwelle von 60% [91] der initial gefundenen Merkmale fallen, so wird die Merkmalsselektion erneut durchgeführt. Somit stehen auch Bewegungsvektoren für die Analyse zur Verfügung, die sich auf der ruhenden Hand des Werkers befinden könnten.

Als nächsten Verarbeitungsschritt müssen die Emissionen für das HMM zur Arbeitsvorgangserkennung aus den zuvor bestimmten Bewegungsvektoren \vec{d} erzeugt werden. Betrachtet man Abbildung 4.14, ist es möglich aus dem Wissen über die Handposition im Kamerabild abzuleiten, welche Bauteile möglicherweise gegriffen wurden. Die zuvor bestimmten Bewegungsvektoren liegen in Kamera-Koordinaten vor. Um daraus Emissionen für das HMM zu erzeugen, wird diesen Koordinaten nun jeweils eine Region auf dem Arbeitstisch zugeordnet. Die Zuordnung der Bewegungsvektoren zu den definierten Regionen erfolgt mit OpenCV. In OpenCV ist es möglich, Polygone im Bild zu definieren. Diese wurden so gesetzt, dass die Grenzen der Polygone die Regionen der Bauteile beschreiben. Zur Überprüfung, ob ein Punkt innerhalb eines Polygons liegt, wird die zugehörige Funktion aus OpenCV verwendet. Über dieses Vorgehen wird nun allen \vec{d} eine Region zugeordnet. Die Aufteilung der Arbeitsfläche wurde mit dieser Methode in 17 Bereiche vorgenommen – 16 Bauteile (vgl. rote Bereiche in Abbildung 4.14) und der eigentliche Arbeitsbereich davor. An dieser Stelle sei erwähnt, dass diese Einteilung des Arbeitstisches statisch erfolgt ist und sich über die Dauer des Versuches nicht geändert hat. Es wäre ebenso möglich, die Regionen dynamisch zu erzeugen. Eine Möglichkeit hierfür wäre z. B. die Verwendung von Bauteil-Boxen, analog zum Ansatz aus Abschnitt 4.2.2.3. Dieses Vorgehen wurde in diesem Abschnitt jedoch nicht untersucht, da der Schwerpunkt hier auf der statistischen Auswertung der Beobachtungen liegt.

Die Anzahl der gefundenen Bewegungsvektoren je Region wird im Folgenden als Emission in O_t verwendet. Somit ist O_t ein 17-dimensionaler Vektor zum Zeitpunkt t . Ausgehend von diesen Daten kann nun das HMM zur Arbeitsvorgangserkennung trainiert werden.

Modellbildung Der Montageablaufplan des Crash-Bobby erlaubt keine Alternative. Um das Produkt zu erhalten, müssen alle acht Arbeitsvorgänge in der vorgegebenen Reihenfolge abgearbeitet werden. Somit eignet sich ein eingeschränktes Links-Rechts-Modell als Struktur für das HMM zur Arbeitsvorgangserkennung. Zusätzlich zur Entfernung der Rücksprünge in vorherige Zustände ist es bei der gewählten Darstellung

nicht erlaubt, einzelne Zustände zu überspringen. Dies Darstellung entspricht ebenfalls der Abarbeitungsreihenfolge einzelner Arbeitsschritte innerhalb eines Montageablaufplans unter der Annahme, dass keine Korrekturen innerhalb einer Montageaufgabe durchgeführt werden. Dies ist im vorliegenden Fall nicht im Fokus der Betrachtung und gilt somit als Voraussetzung.

Die Zustände des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung auf der obersten Hierarchiestufe entsprechen den Arbeitsvorgängen im Montageablaufplan des Crash-Bobby. Jeder Arbeitsvorgang muss erfolgreich beendet werden, damit die zeitlich folgenden Arbeitsschritte auch durchführbar sind. Damit eine Zuordnung der Beobachtungen zu den Zuständen im Videomaterial möglich ist, müssen zunächst die einzelnen Arbeitsschritte aus dem Montageablaufplan in übergeordnete Arbeitsvorgänge zusammengefasst werden. Ausgehend von den in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten acht Arbeitsvorgängen beschreiben diese die oberste Hierarchiestufe im Montageablaufplan des Crash-Bobby. Hiermit lässt sich ein Links-Rechts-Modell erstellen. Abbildung 4.34 zeigt die vereinfachte Darstellung des zu dieser Hierarchiestufe gehörenden HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung. Zusätzlich zu den acht Arbeitsvorgängen im Montageablaufplan

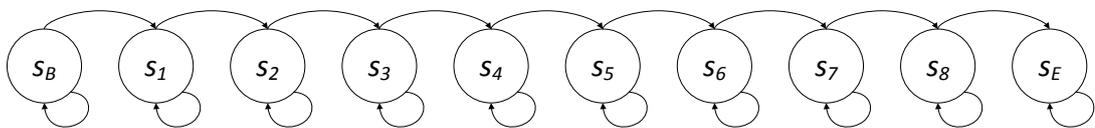


Abbildung 4.34: Links-Rechts-Modell des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung - In dieser Abbildung ist die vereinfachte Darstellung der oberste Hierarchiestufe des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung zu sehen. Es beinhaltet acht Arbeitsvorgänge, sowie einem Zustand für den Beginn (s_B) und das Ende (s_E) der Montage des Crash-Bobby.

des Crash-Bobby verfügt das Modell sowohl über einen zusätzlichen Zustand für den Beginn (s_B), als auch für das Ende (s_E) der Montage. Mittels Zustand s_B kann der Werkerabhängige Beginn der Montage modelliert werden. Ist der Crash-Bobby komplett aufgebaut und finalisiert, wird mittels Zustand s_E die Fertigstellung des Crash-Bobby modelliert. Die Übergangswahrscheinlichkeit zum Verbleib im jeweils eigenen Zustand repräsentiert die Bearbeitung des zugeordneten Arbeitsvorgangs. Aus Gründen der Vereinfachung und Übersichtlichkeit wurden die Symbole und Übergänge für gemachte Beobachtungen weggelassen.

Ein Arbeitsvorgang lässt sich im hier vorgestellten Szenario prinzipiell in zwei Gruppen von Werkeraktionen unterscheiden: Greifen von Bauteilen und Verbauen der gegriffenen Bauteile. Die oberste Hierarchieebene des HMM zur Arbeitsvorgangserkennung modelliert den Zusammenhang der einzelnen Arbeitsvorgänge, nicht jedoch

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

die Werkeraktionen innerhalb eines Arbeitsvorgangs. Um diese detaillierter betrachten zu können, lassen sich die Zustände s_1 bis s_8 in theoretische Sub-HMMs feiner untergliedert. Für die Montage der Hauptplatine (Arbeitsvorgang s_6) ist diese feinere Modellierung in Abbildung 4.35 exemplarisch visualisiert. Die einzelnen Werkeraktionen

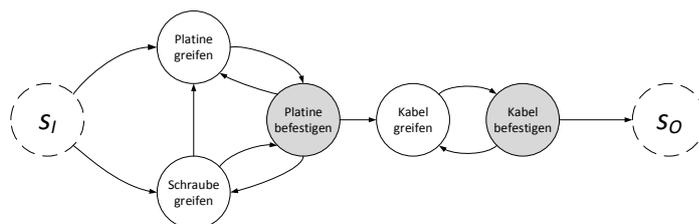


Abbildung 4.35: Detailansicht des Arbeitsvorgangs zur Montage der Hauptplatine

- In dieser Abbildung ist die detaillierte Struktur des Arbeitsvorgangs s_6 des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung zu sehen. Die einzelnen Werkeraktionen für Greifen und Montieren sind durch verschiedene Hintergründe unterschieden. Des Weiteren sind Zustände für den Einsprung (s_I) in und den Aussprung (s_O) aus dem Sub-HMM angegeben.

der Gruppen *Greifen* und *Montieren* sind durch verschiedene Hintergründe voneinander unterschieden. Greifaktionen sind weiß, Montageaktionen sind grau hinterlegt. Die Wahrscheinlichkeit für den Verbleib im eigenen Zustand wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit in der Abbildung weggelassen. Des Weiteren sind Zustände für den Einsprung (s_I) in und den Aussprung (s_O) aus dem Sub-HMM angegeben (gestrichelte Kreise). Diese künstlich hinzugefügten Zustände dienen der Visualisierung des Übergangs zwischen den Arbeitsvorgängen.

Mit der beschriebenen Modellierung können nun die Arbeitsvorgänge durch Beobachtung der 16 möglichen Greifvorgänge des Werkers unterschieden werden. Beendet der Werker beispielsweise einen Montagevorgang, so wird er im nächsten Schritt ein neues Bauteil greifen. Da dieses Bauteil zu einem neuen Arbeitsvorgang gehört, muss dieser Vorgang in der Arbeitsschritterkennung erkannt werden. Für die Modellierung bedeutet somit der Greifvorgang eines Bauteils mit Zugehörigkeit zum nächsten Arbeitsvorgang den Zustandswechsel in der obersten Hierarchieebene des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung. Dies ist auch in Abbildung 4.35 erkennbar. Nach dem Einsprung erfolgt im Allgemeinen ein Greifvorgang, der Aussprung erfolgt nach einem Montagevorgang. Somit lassen sich die Arbeitsvorgänge voneinander trennen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass das HMM zur Arbeitsvorgangserkennung kein reines Links-Rechts-Modell ist. Wenn ein Arbeitsschritt das Greifen mehrerer gleicher Bauteile erfordert, so wird dies durch Zustandswechsel zwischen Greifen und Montage modelliert – also durch Rücksprünge. Jedoch wird für die folgende Betrachtung

angenommen, dass keine Rücksprünge zwischen Arbeitsvorgängen stattfinden. Somit bleibt die Struktur aus Abbildung 4.34 als Links-Rechts-Modell grundsätzlich erhalten, jedoch mit der Modifikation in den unteren Hierarchieebenen.

Zur Datengewinnung wurden Versuche im Zuge des PPMK am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der Technischen Universität München durchgeführt [91]. Die VPs waren Studenten des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik. Alle waren etwa gleichen Alters.

In diesem Rahmen entstanden acht Videosequenzen, die anschließend ausgewertet wurden. Die VPs mussten den Crash-Bobby montieren, während sie von oben mit einer Kamera überwacht wurden. Aus den Handbewegungen der VPs wurden mittels dem Optical Flow-Algorithmus Emissionen für das HMM zur Arbeitsvorgangserkennung generiert. Jede Videosequenz wurde annotiert, um die Zuordnung der Arbeitsvorgänge zu den aufgezeichneten Daten zu erlauben. Somit lag nach der Annotation des Videomaterials zu jedem Bild der zugehörige Zustand im Montageablaufplan vor. Ausgehend von den im Versuch aufgezeichneten Videos und der anschließenden Annotation der Daten wurde ein HMM zur Arbeitsvorgangserkennung mittels des EM-Algorithmus trainiert. Dazu wurde die MATLAB-Toolbox PMTK3 von Matt Dunham et al. [56] verwendet. Als Parameter für die MATLAB-Funktion wurden für jedes Bild der Videosequenz der zugehörige Arbeitsvorgang als Zustand übergeben. Nach Abbildung 4.34 beträgt diese Anzahl zehn Zustände. Ferner wurden jedem der Bilder die Werte der Beobachtungen übergeben. Da die Anzahl der Felder auf der Arbeitsfläche des Werkers 17 beträgt, umfasst der Zustandsvektor je Zeitschritt 17 Werte. Mit diesen Daten wurden die Parameter des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung bestimmt.

Arbeitsschritterkennung mittels Viterbi-Algorithmus Mit den im Training gewonnenen Parametern des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung kann nun die Fortschrittserkennung des Werkers innerhalb des Montageablaufplans erfolgen. Zur Bestimmung des aktuellen Arbeitsvorgangs des Werkers wird der Viterbi-Algorithmus verwendet. Die Implementierung des Viterbi-Algorithmus ist ebenfalls in der MATLAB-Toolbox PMTK3 vorhanden. Entsprechend wurde auch hier diese Toolbox eingesetzt. Zur Erstellung der Beobachtungen wurden die mittels Optical Flow gewonnenen Daten verwendet. Diese werden in Form einer Matrix als Observationen der Toolbox übergeben. Aus diesen Observationen wird dann eine Sequenz der zugehörigen geschätzten Zustände ermittelt. Diese Sequenz entspricht den dekodierten Arbeitsvorgängen, die der Werker in der untersuchten Videosequenz durchgeführt haben soll.

4.3.4 Evaluierung des HMMs zur Arbeitsschritterkennung

Anhand eines Papier-basierten Montageablaufplans wurde der Crash-Bobby zusammengesetzt. Da hier alle relevante Bauteile bereits je Arbeitsvorgang aufgelistet sind, sollten die Werker je Sequenz die gerade benötigten Bauteile in unterschiedlicher Reihenfolge greifen. Zusätzlich zur unterschiedlichen Greifreihenfolge wurden die VPs angewiesen, benötigte Schrauben einzeln nacheinander, sowie gleichzeitig mehrere mit einer Greifbewegung zu holen. Da es mit der verwendeten Kamera nicht möglich ist, die Anzahl von kleine Schrauben auf der Arbeitsfläche eindeutig zu ermitteln, wurde so die Variabilität in das Modell eingebracht, mit einem Greifvorgang auch mehrere Bauteile gleichzeitig zu holen.

Ferner sollten die Werker die logische Reihenfolge der Arbeitsschritte einhalten. Es sollte vermieden werden, Bauteile zu greifen, die nicht im aktuellen Arbeitsschritt benötigt werden. Die Zwischenlagerung von solchen Bauteilen stand nicht im Fokus der Betrachtung.

Zuletzt musste darauf geachtet werden, dass die VPs je Greifvorgang nur eine Bauteilkategorie in den Arbeitsbereich legen. Das gleichzeitige Holen verschiedener Bauteile konnte nicht erfasst werden. Der Abschluss eines Greifvorgangs sollte durch die Bewegung der Hände in den Arbeitsbereich signalisiert werden. Dies ist im HMM zur Arbeitsvorgangserkennung so modelliert, dass nach dem Greifzustand der Montagezustand folgt (vgl. Abbildung 4.35).

Unter diesen Randbedingungen konnten verschieden Varianten von Vorkommnissen in den aufgezeichneten Videos beachtet werden. Somit kann die Bewertung des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung anhand der Testvideos vorgenommen werden.

Zur Anwendung des Viterbi-Algorithmus wurde für die Testvideos jeweils der Optical Flow bestimmt. Anschließend wurden die Bewegungsvektoren den Bauteilregionen auf dem Arbeitstisch des Werkers nach dem in Abschnitt 4.3.3.3 beschriebenen Verfahren zugeordnet. Damit die qualitative Bewertung des Erkennungsergebnisses des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung möglich ist, wurde den Testvideos per manueller Annotation die 16 Greifaktionen und die korrespondierenden acht Arbeitsvorgänge zugeordnet [91]. So konnte der tatsächliche Zustand des Werkers im Testvideo mit dem per Viterbi-Algorithmus ermittelten Zustand verglichen werden.

Zur Bewertung des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung wurde die Erkennungsrate zum gewählten Ansatz berechnet und die acht Testvideos einer Kreuzvalidie-

zung [57] unterzogen. Die Erkennungsrate $P(R)$ wurde wie folgt ermittelt:

$$P(R) = \frac{\sum_{t=1 \dots T} K(t)}{T} \quad (4.41)$$

$$K(t) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \hat{s}(t) = s(t) \\ 0, & \text{wenn } \hat{s}(t) \neq s(t) \end{cases} \quad (4.42)$$

So wird überprüft, ob der geschätzte Zustand \hat{s} zum Zeitpunkt t für den korrespondierenden Arbeitsvorgang mit dem tatsächlichen Zustand s übereinstimmt. Analog zu Gleichung (4.41) gilt für die Fehlerrate $P(E)$ die Beziehung

$$P(E) = 1 - P(R) \quad (4.43)$$

Mit dieser Berechnungsvorschrift wurde anhand der acht Testvideos die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte statistische Erkennung des aktuellen Arbeitsvorgangs getestet. Der Vergleich zwischen per Annotation gewonnener Ground Truth und dem per HMM zur Arbeitsvorgangserkennung erzeugter Daten liefert nach Kreuzvalidierung das Ergebnis aus Tabelle 4.3. Der Mittelwert der Erkennungsrate beträgt 56.1%.

Tabelle 4.3: Erkennungsraten der Testsequenzen - Die Tabelle zeigt die Erkennungsrate $P(R)$ des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung in Kreuzvalidierung je Videosequenz. Ferner ist der Mittelwert angegeben.

Video	Erkennungsrate $P(R)$
1	48.0%
2	57.3%
3	52.4%
4	48.2%
5	65.4%
6	67.1%
7	54.6%
8	55.5%
Mittelwert	56.1%

Vergleicht man diese Werte mit den Ansätzen von Padoy et al. in [43] (Erkennungsrate 92.4%) und [33] (Erkennungsrate 90.5%), so erscheint das hier vorgestellte Ergebnis schlechter als die Ergebnisse in den angegebenen Arbeiten. Zunächst bleibt festzuhalten, dass im hier vorgestellten Verfahren ausschließlich Merkmale verwendet wurden,

die mittels Optical Flow aus 2D-Bildern gewonnen wurde. Padoy et al. haben hingegen 3D-Daten verwendet. Zusätzlich haben sie Informationen über die Benutzung der bei der Operation benötigten Instrumente in das Modell eingebracht. Im hier vorliegenden Fall der manuellen Montage wurden nur selten Werkzeuge verwendet, was die Verwendung dieses Merkmals kaum merklich in den Montageprozess eingebracht hat. Ferner haben Padoy et al. einen Bereich von ± 5 s Fehlertoleranz um einen Zustandswechsel bei ihrem Vergleich mit der Ground Truth gewährt. Ein Toleranzbereich bei der Erkennung des Arbeitsvorgangs wurde bei den Ergebnissen aus Tabelle 4.3 hingegen nicht berücksichtigt. Somit kann das Ergebnis des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung nicht eins-zu-eins mit dem Ansatz von Padoy et al. verglichen werden. Betrachtet man die Aufnahme der Testsequenzen, so ist Bewegungsunschärfe in den Videodaten festzustellen [91]. Bedingt durch die Bildwiederholrate der verwendeten Kamera konnte dem Effekt nicht entgegengewirkt werden. Um eine höhere Abtastrate zu erreichen, hätte man ein System mit höherer Rechenleistung benötigt. Ein solches System war zum Zeitpunkt der Aufnahme nicht vorhanden. Des Weiteren liefern acht Testsequenzen wenig variierende Daten. Um ein großes Spektrum an Vorkommnissen während der manuellen Montage zu beobachten, sollte eine größere Anzahl an Trainingssätzen verwendet werden.

4.3.5 Bewertung des HMMs zur Arbeitsschritterkennung

Bei einer quantitativen Beurteilung des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung erscheinen die erzeugten Ergebnisse verbesserungswürdig. Betrachtet man qualitativ das Ergebnis, so erscheint das vorgestellte Verfahren jedoch in einem anderen Licht. In Abbildung 4.36 ist exemplarisch das Erkennungsergebnis des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung der Ground Truth gegenübergestellt. Die Abbildung zeigt den Zustandsübergang des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung in Bezug auf die Montage des Crash-Bobby in Testvideo 7. Arbeitsvorgang 0 entspricht dabei der Vorbereitungsphase des Werkers, Arbeitsvorgang 9 symbolisiert das Ende der Montage des Crash-Bobby. Des Weiteren ist die per Annotation ermittelte Ground Truth als Pfad dargestellt. Dieser wird mit dem Ergebnis des Viterbi-Algorithmus verglichen. Wie zu sehen ist, springt der geschätzte Wert für den aktuellen Arbeitsvorgang früher auf die nächste Stufe, als es notwendig wäre. Für einen Demonstrator wäre dieses Verhalten vermutlich nicht von Nachteil.

Ein System zur Assistenz in der manuellen Montage soll den Montageablaufplan weiter schalten und die nächste Information anzeigen, wenn der Werker den aktuellen Arbeitsvorgang abgeschlossen hat. Geht man davon aus, dass der Werker erst nach

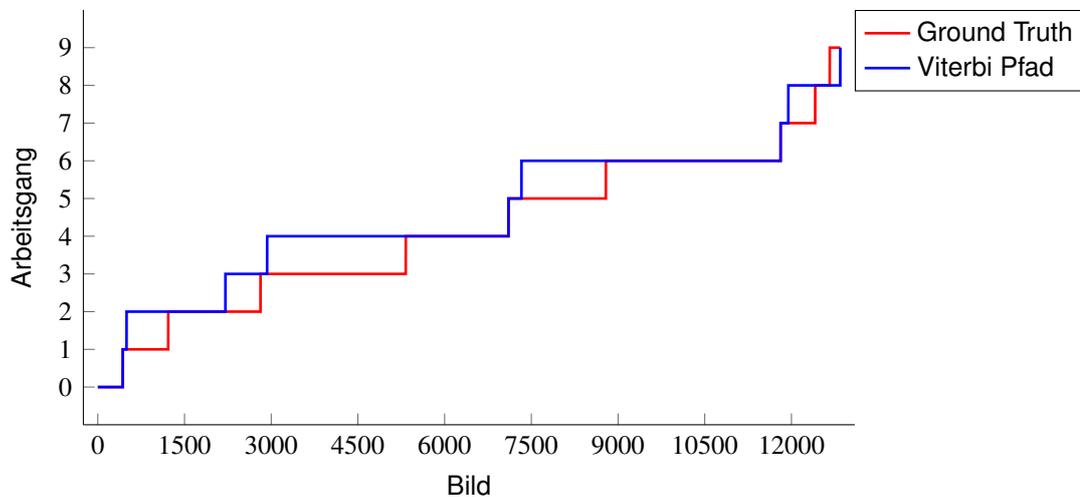


Abbildung 4.36: Ergebnis Testvideo 7 - Diese Abbildung zeigt den Zustandsübergang des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung. Verglichen wird die per Annotation ermittelte Ground Truth mit dem Ergebnis des Viterbi-Algorithmus.

Beendigung seiner aktuellen Tätigkeit neue Informationen vom Montageablaufplan-Assistent holt, so ist das vorzeitige Umschalten der Anzeige kein Problem. Das vorzeitige Umschalten würde entstehen, wenn ein Anzeigesystem den Statuswechsel aus Abbildung 4.36 als Event verwenden würde. Ebenfalls sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die statistische Arbeitsschritterkennung als experimentelle Methode zu bewerten ist. Durch Optimierung der verwendeten Merkmale könnte auch eine Verbesserung bei den statistischen Methoden erlangt werden. Da in dieser Dissertation das Augenmerk auf dem Gesamtsystem liegt, wurde in diesem Abschnitt der statistische Ansatz auf eine grundsätzliche Realisierbarkeit überprüft. Die optimale Auslegung ist jedoch nicht im Fokus der Arbeit.

4.4 Diskussion der Bestimmung des Arbeitsschrittes

In diesem Kapitel wurden zwei Ansätze zur Erkennung der Tätigkeiten eines Werkers während der manuellen Montage eines Produkts diskutiert. Der Versuchsaufbau umfasst einen Arbeitstisch, der von oben Kamera-basiert überwacht wird. Durch die Verwendung optischer Sensorik wurde eine nicht-invasive Erfassung der Werkeraktionen ermöglicht. So wurde der Werker nicht durch das Tragen zusätzlicher Geräte bei der Ausführung seiner Tätigkeiten eingeschränkt.

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

Im ersten Teil dieses Kapitels wurde ein Ansatz zur Arbeitsschritterkennung beschrieben, der regelbasiert die Handlungen des Werkers überwacht. Dazu wurde über der Arbeitsfläche eine Tiefenbildkamera angebracht, mit der die Handbewegungen des Werkers erfasst wurden. Die Positionsdaten der Hände wurden anschließend mit einem Zustandsautomat ausgewertet. Die Koordinaten der Hände des Werkers liefern die Merkmale, die zur Weiterschaltung der Repräsentation der Werkeraktion in der Arbeitsschritterkennung führen. Über die Dauer der Versuche haben die VPs sich an das Kinect-basierte Verfahren zur Handverfolgung gewöhnt. Die Ergebnisse der Positionsbestimmung der Hände haben sich bei der wiederholten Durchführung der Montageaufgabe stetig verbessert. Insgesamt lag die Erkennungsrate im schlechtesten Fall bei 89.7%, im besten Fall bei 98.1%. Ausgehend von den gewonnenen Daten konnte immer auf den aktuellen Arbeitsschritt im Montageablaufplan inferiert werden.

Im zweiten Teil dieses Kapitels wurde ein statistischer Ansatz mit einem HMM zur Arbeitsschritterkennung präsentiert. Bei diesem Konzept wird der Werker von oben mit einer 2D-Kamera überwacht. Aus den Videodaten der Kamera wurde mittels Optical Flow Bewegungsvektoren der Pixel berechnet. Diese Bewegungsvektoren wurden mit Positionsdaten von sich auf der Arbeitsfläche befindenden Bauteilen abgeglichen und daraus Merkmale für das HMM zur Arbeitsvorgangserkennung gewonnen. Nach dem Training des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung mittels EM-Algorithmus erfolgte die Auswertung der Testdatensätze mittels Kreuzvalidierung. Zur Überprüfung der Tauglichkeit des vorgestellten Verfahrens wurde die Erkennungsrate bestimmt, die im Mittel 56.1% beträgt. Nach qualitativer Betrachtung des Vergleich zwischen berechnetem und tatsächlichen Arbeitsvorgang des Werkers bleibt festzuhalten, dass der geschätzte Zustandsübergang früher eintritt, als es tatsächlich der Fall war. Für ein Assistenzsystem ist dieses Verhalten jedoch nicht von Nachteil, da damit eine Assistenzinformation lediglich früher als notwendig angezeigt würde.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass mit der Tiefenbild-basierten Methode die Hände des Werkers gut verfolgt werden konnten. Der statistische Ansatz konnte qualitativ den Wechsel in den nächsten Arbeitsvorgang vorhersagen noch bevor der Werker den aktuellen Arbeitsschritt abgeschlossen hatte. Würde man den Tiefenbild-basierten Sensor mit der statistischen Auswertung verbinden, so könnten vermutlich bessere Ergebnisse bei der Prädiktion des Arbeitsvorgangs erzielt werden. Für sich genommen haben die präsentierten Ansätze die an sie gestellten Aufgaben erfüllt. Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen und dem Blick auf die Voraussetzung der Robustheit im industriellen Umfeld sollte die auf Zustandsautomaten basierende Methode bevorzugt in einem Produktivsystem eingesetzt werden. Mit dem vorgestellten System wurde gezeigt, dass Arbeitsschritte nicht-invasiv aus der Beobachtung des

Werkers mittels Kinect erkannt werden können. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die hier beschriebene Event-Methode auch mit einem zur Kinect vergleichbaren Tiefenbildsensor verwendet werden kann. Ein alternatives Modell wäre der *Asus Xtion*¹. In Kombination mit einer automatischen Erkennung der Arbeitsfläche der Arbeitsstation ließe sich mit diesem System ein manueller Arbeitsplatz nachrüsten und auch in einer realen Fabrik betreiben.

¹http://www.asus.com/de/Multimedia/Xtion_PRO/

4. AUTOMATISCHE ERMITTLUNG VON ARBEITSSCHRITTEN

Visualisierung von Montageablaufplänen

In diesem Kapitel wird vorgestellt, wie eine Unterstützung des Werkers für manuelle Tätigkeiten in Form eines Assistenzsystems aussehen kann. Grundlage für diese Untersuchung ist der Anwendungsfall der manuellen Montage eines für den Werker neuen und vorher unbekanntes Produkts. Um eine schnelle Einarbeitungszeit zu ermöglichen, wird auf die gute Verständlichkeit und leichte Bedienbarkeit eines solchen Assistenzsystems Wert gelegt. Unterstützt wird der Werker von einem Assistenzsystem, das benötigte Informationen zum Arbeitsablauf digital liefert. Die Entwicklung dieses Systems erfolgt in drei Abschnitten: Zunächst wird eine herkömmliche Papier-basierte Arbeitsanweisung untersucht und daraus die zugrundeliegende Information extrahiert. Diese wird dem Werker im zweiten Abschnitt mittels einer Monitor-basierten GUI präsentiert. Der dritte Abschnitt beschreibt ein Verfahren zur kontaktanalogen Darstellung der Arbeitsanweisung im direkten Sichtbereich des Werkers. Die entwickelten Konzepte werden jeweils in Probandenversuchen evaluiert und die Ergebnisse vorgestellt.

5.1 Digitale Werker-Unterstützung

In Kapitel 4 wurden zwei Ansätze vorgestellt, die es erlauben aus den Aktionen eines Werkers auf seinen Fortschritt bei der Montage eines Produkts im Montageablaufplan zurückzuschließen. Dieses Wissen wird nun verwendet, um dem Werker während seiner Montagetätigkeit benötigte Assistenzinformationen anzuzeigen. Es werden verschiedene Möglichkeiten beschrieben, beginnend bei rein Papier-basierten Montageablaufplänen. Ferner wird ein digitaler Montageablaufplan vorgestellt, der mit einer

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Anzeige von Arbeitsanweisungen im Arbeitsbereich des Werkers im Rahmen dieser Dissertation realisiert wurde.

In industriellen Montagelinien gibt es¹ wenige Methoden zur Anzeige von Arbeitsanweisungen im produktiven Betrieb. Es werden vorwiegend Anleitungen in Papierform verwendet, um die notwendigen Schritte bei der Montage eines Produktes anzugeben². Eine Erweiterung davon ist die Anzeige der Arbeitsanweisung auf Monitoren³. Jedoch wird diese elektronische Variante im Prinzip wie eine Papier-basierte Version verwendet. Bei der Massenproduktion in Produktionslinien haben Werker meistens die Aufgabe, einen speziellen Montageschritt durchzuführen. Hierzu werden sie bei Übergabe der Arbeitsposition instruiert, wie Ihre Aufgabe auszuführen ist. Da sich der Montageablauf innerhalb der Serie generell nicht ändert, benötigen die Werker keine weitere ausführliche Anleitung. Sie führen stets den gleichen Montageschritt aus.

Bei der Kleinserienfertigung können Produktwechsel innerhalb der Linie öfter auftreten. Entsprechend werden dem Werker hier vorwiegend Montageablaufpläne in Papierform dargeboten, die die zu erfüllenden Arbeitsschritte enthalten und erklären. Abhängig von der Komplexität des zu fertigenden Werkstücks sind diese Montageablaufpläne entsprechend unterschiedlich detailliert beschrieben.

Bei der Einzelproduktion muss bei jedem einzelnen Werkstück ein eigener Montageablaufplan mitgeführt werden. Jeder Arbeitsschritt wird hier nicht sehr häufig ausgeführt. Im Extremfall wird ein Werkstück nur ein einziges Mal gefertigt. Für die Betrachtung des Falls der Losgröße 1 bedeutet dies für die Montage eines Unikats einen hohen Verwaltungsaufwand (vgl. Abschnitt 2.1.2). Jedes Produkt erfordert einen eigenen Montageablaufplan, der individuell erstellt werden muss. Eine automatisierte Methode zum Entwurf von Arbeitsanweisungen wäre hier wünschenswert.

Erste Arbeiten auf dem Gebiet der digitalen Werker-Unterstützung bei der Montage wurden bereits 1993 durchgeführt. Das sogenannte *KARMA (Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance) System* [58] wurde verwendet, um einen Kunden mittels Head-mounted Display (HMD) durch die Wartung seines Laser-Druckers zu leiten. Ferner gibt es Forschungsarbeiten zum Thema der Unterstützung von Montagearbeiten an Flugzeugen mithilfe eines mobilen Anzeigegerätes und Techniken aus dem Gebiet der Augmented Reality (AR) [59]. Weitere Arbeiten auf dem Gebiet der virtuellen Informationsdarstellung zur Assistenz bei Montagetätigkeiten wurden bei Siemens untersucht [60]. Ferner stellt VTT Technical Research Centre of

¹zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertation

²vor Ort gesehen bei der Firma Transtechnik Bahntechnik (Büchlberg, Bayern, Deutschland)

³vor Ort gesehen bei der Firma LOEWE (Kronach, Bayern, Deutschland)

Finland (VTT) in [61] dem Werker animierte 3D-Modelle aus abgeleiteten Montageablaufplänen auf einem Computerdisplay dar. Diese Technik wurde exemplarisch auch im Projekt CustomPacker implementiert.

In diesem Kapitel wird nun auf zwei mögliche Darstellungsmethoden eingegangen, die für das Anwendungsgebiet in der manuellen Montage realisiert wurden. Diese umfassen die Entwicklungsstufen von Papierdokumenten über die Anzeige auf Monitoren hin zu eingeblendeten Montageinformationen im Arbeitsbereich des Werkers.

5.1.1 Abstrakte Repräsentation eines Montageablaufplans

Eines der Ziele dieser Arbeit ist die Kozeptionierung einer einfachen Definition von Montageablaufplänen. In Abschnitt 3.2 wurde bereits das im Kontext dieser Dissertation entwickelte Konzept für Montageablaufpläne beschrieben. Diese iterative Gestaltungsform ermöglicht eine einfache Erweiterbarkeit des Plans um neue Arbeitsschritte. Zusammenfassend kann an dieser Stelle bezüglich dieses Konzepts festgehalten werden, dass jede für die Fertigstellung des Produkts benötigte Baugruppe für sich isoliert über die Abhängigkeit von beteiligten Bauteilen definiert wird. Diese erforderlichen Bauteile können dabei echte Basis-Bauteile oder bereits montierte Baugruppen sein (vgl. Abbildung 3.3). Um diese Definition abbilden zu können, wurde eine Datenstruktur entworfen, die eine solche Modellierung von Montageablaufplänen ermöglicht.

Der Werker soll unterstützende Informationen zu seiner Montageaufgabe bekommen. Dazu werden ihm Arbeitsanweisungen zur Verfügung gestellt, die Beschreibungen zu den durchzuführenden Arbeitsschritten enthalten. Bei der generellen Betrachtung dieser Beschreibungen kann festgehalten werden, dass prinzipiell zwei Arten von Informationen in solchen Anweisungen enthalten sind:

- benötigte Bauteile für den aktuellen Arbeitsschritt
- Beschreibung der durchzuführenden Montagetätigkeit

Zudem liegt eine solche Arbeitsanweisung dem Werker meistens in Papierform vor. Die Gestaltung einer Arbeitsanweisung reicht von tabellarisch (vgl. Tabelle 3.1) bis hin zu optisch aufbereiten Ausdrucken mit weiterführenden Fotos. Dabei sind meist Texte enthalten, die verschieden ausführlich die Montageaufgabe als Ganzes beschreiben, oder einzelne Arbeitsschritte in Stichpunkten. Ein Beispiel einer erweiterten und aufbereiteten Arbeitsanweisung zeigt Abbildung 5.1. Die zuvor aufgelisteten Informationen sind auch hier enthalten: benötigte Bauteile und durchzuführende Arbeitsschritte. Dieses Beispiel einer Arbeitsanweisung beschreibt alle durchzuführenden Arbeitsschritte eines aktuellen Arbeitsvorgangs. In der oberen Hälfte der Arbeitsanweisung

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

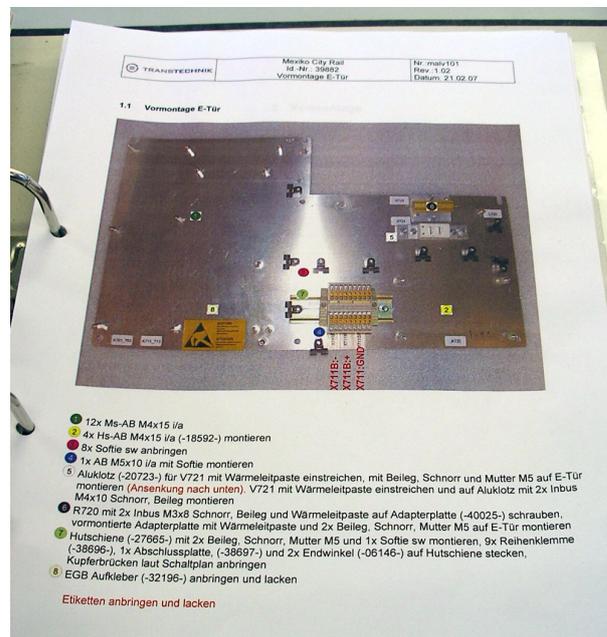


Abbildung 5.1: Arbeitsanweisung in Papierform - Die abgebildete Arbeitsanweisung zeigt die Beschreibung von Arbeitsschritten. Im oberen Teil ist ein Foto des Bauteils nach durchgeführtem Arbeitsschritt zu sehen. Die einzelnen Arbeitsschritte sind im unteren Teil der Arbeitsanweisung notiert. Eigenes Foto aufgenommen bei Transtechnik Bahntechnik (Büchlberg, Bayern, Deutschland).

ist ein Foto der zu bearbeitenden Baugruppe zu sehen. Die Abbildung zeigt die Baugruppe nach bereits durchgeführten Arbeitsschritten, also das Zielbild.

Das Foto zeigt somit den Sollzustand der Baugruppe, der nach Durchführung des Arbeitsvorgangs zu erreichen ist. Die zugehörigen Arbeitsschritte sind im unteren Teil der Arbeitsanweisung tabellarisch erklärt. Die Reihenfolge der Arbeitsschritte ergibt sich durch die Reihenfolge der Notierung.

Zusätzlich ist bei jedem Arbeitsschritt in der Tabelle farblich eine Nummer eingetragen, die sich ebenfalls auf dem Foto der Baugruppe wiederfindet. Die Nummer befindet sich an der Position, an der die in der Tabelle beschriebenen Arbeitsschritte vom Werker durchzuführen sind.

Die Definition einer Arbeitsanweisung und das zugehörige Anzeigesystem zur Interpretation und Visualisierung müssen so flexibel sein, damit die oben genannten Informationen berücksichtigt werden können. Dies ist mit der Voraussetzung der Adaptierbarkeit begründet, die dieser Dissertation zu Grunde liegen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind verschiedene Möglichkeiten einer technischen Repräsentation für diese

Aufgabenstellung denkbar. Die Wahl der maschinenlesbaren technischen Implementierung eines Montageablaufplans fiel in dieser Arbeit auf die Metasprache Extensible Markup Language (XML) [62]. Dieses Format ist weit verbreitet und wird bereits vielfach verwendet, um z. B. Konfigurationen von Programmen abzulegen. Ein Montageablaufplan ist im weitesten Sinne ebenfalls eine Art Konfiguration für ein Programm. XML ermöglicht es, Daten und Datenkonstrukte hierarchisch in Textdateien zu definieren und zu strukturieren.

Nachstehendes Beispiel erklärt bezogen auf die manuelle Montage die prinzipielle Struktur des entwickelten Montageablaufplans in der Metasprache XML. Zur Veranschaulichung des Konzepts dient hier wieder das Fischertechnik-Auto. Bereits in Abschnitt 3.3.3 wurde der Montageablaufplan in Jess-Notation gezeigt. Hier ist der gleiche Montageablaufplan nun in Abbildung 5.2 in der entwickelten XML-Notation wiedergegeben. Wie zu sehen ist, erfolgt die Definition der Bauteile über die Nennung ihrer Namen. Baugruppen werden über ihre zugehörigen Abhängigkeiten bezüglich zu verbauender Bauteile definiert, analog zur entwickelten Jess-Notation. Dabei erfolgt die Nennung der benötigten Bauteile je Baugruppe innerhalb der einfassenden *Teil*-Beschreibung. Zusätzlich ist noch angegeben, wie viele Bauteile je Typ für die aktuell definierte Baugruppe benötigt werden. Jede Baugruppe kann bei dieser Art der Definition wieder ein Bauteil für einen anderen Arbeitsschritt in der Montage sein. Damit wird ein hohes Maß an Flexibilität erreicht. Jeder Arbeitsschritt muss somit nur für sich beschrieben werden. Zusammenhänge zwischen den einzelnen Arbeitsschritten ergeben sich später automatisch über die rekursive Verknüpfung der Bauteilbeschreibungen. Muss ein Montageablaufplan erweitert werden, so sind an entsprechender Stelle die zugehörigen Baugruppen zu verändern oder hinzuzufügen. Die neue Gesamtstruktur des Montageablaufplans ergibt sich dann wieder automatisch.

Zusätzlich zum XML-basierten Montageablaufplan wurde eine Formatvorlage in Form einer *XML Schema Definition (XSD)*¹ erstellt, die es erlaubt, die XML-Datei auf ihre Gültigkeit zu überprüfen. Dazu kann z. B. der XML-Validator von [63] verwendet werden, um die Syntax des Montageablaufplans auf Gültigkeit zu überprüfen. Abbildung 5.3 zeigt das zum XML-basierten Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos aus Abbildung 5.2 gehörende XSD-Schema. Analog zur XML-Datei ist die XSD-Datei ebenfalls hierarchisch aufgebaut. Jedes Element enthält die Beschreibung von den definierten Objekten sowie zugeordnete Attribute. Neben einer allgemeinen Typ-Definition der XSD-Datei (Kopfzeilen) wird in Abbildung 5.3 zunächst das `Produkt` definiert. Dieses Element enthält eine Liste von benötigten Bauteilen des Typs

¹http://de.wikipedia.org/wiki/XML_Schema

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Abbildung 5.2: XML-basierter Montageablaufplan - Montageablaufplan des Fischer-technik-Autos in der entwickelten XML-Notation

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Produkt Name="Fischertechnik-Auto">
  <Teil Name="Reifen" />
  <Teil Name="Dach" />
  <Teil Name="Boden" />
  <Teil Name="Strebe_kurz" />
  <Teil Name="Strebe_lang" />
  <Teil Name="Achse" />
  <Teil Name="Felge" />
  <Teil Name="mod_Dach" istBaugruppe="true">
    <benTeil Name="Dach" benoetigt="1" />
    <benTeil Name="Strebe_kurz" benoetigt="2" />
  </Teil>
  <Teil Name="mod_Boden" istBaugruppe="true">
    <benTeil Name="Boden" benoetigt="1" />
    <benTeil Name="Strebe_lang" benoetigt="2" />
  </Teil>
  <Teil Name="mod_Rad" istBaugruppe="true">
    <benTeil Name="Reifen" benoetigt="1" />
    <benTeil Name="Felge" benoetigt="1" />
    <benTeil Name="Achse" benoetigt="1" />
  </Teil>
  <Teil Name="mod_Rumpf" istBaugruppe="true">
    <benTeil Name="mod_Boden" benoetigt="1" />
    <benTeil Name="mod_Dach" benoetigt="1" />
  </Teil>
  <Teil Name="prod_Auto" istBaugruppe="true">
    <benTeil Name="mod_Rad" benoetigt="1" />
    <benTeil Name="mod_Rumpf" benoetigt="4" />
  </Teil>
</Produkt>
```

`Teil` und kann theoretisch unendlich viele Bauteile enthalten, mindestens jedoch ein Element `Teil`. Außerdem verfügt das `Produkt` über ein Attribut `Name`, welches das zu fertigende Produkt beschreibt.

Das Element `Teil` ist analog zum Typ `Produkt` aufgebaut. Im Fall einer vorliegenden Baugruppe enthält dieses Element zusätzlich eine Liste mit benötigten Bauteilen `benTeil`. Diese Liste kann leer sein bis theoretisch unendliche viele Einträge enthalten. Neben dem Namensattribut verfügt es über eine Markierung, mit der angegeben wird, ob das `Teil` ebenfalls eine Baugruppe ist (`istBaugruppe`).

Das Element `benTeil` modelliert die Abhängigkeit der Baugruppe von Bauteilen. Als

Abbildung 5.3: Beispiel einer XML Schema Definition - XSD der zum Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos gehörenden XML Datei

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:element name="Produkt">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="Teil" minOccurs="1" maxOccurs="unbounded" />
      </xs:sequence>
      <xs:attribute name="Name" type="xs:string" use="required" />
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="Teil">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence minOccurs="0">
        <xs:element ref="benTeil" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded" />
      </xs:sequence>
      <xs:attribute name="Name" type="xs:string" use="required" />
      <xs:attribute name="istBaugruppe" type="xs:boolean" default="false" />
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="benTeil">
    <xs:complexType>
      <xs:attribute name="Name" type="xs:string" use="required" />
      <xs:attribute name="benoetigt" type="xs:integer" use="required" />
    </xs:complexType>
  </xs:element>
</xs:schema>

```

Attribute verfügt dieses Element einen Namen (Name) sowie die Anzahl der benötigten Bauteile `benoetigt`. Mit diesem Schema aus Abbildung 5.3 ist die XML-Datei aus Abbildung 5.2 beschrieben und kann mittels eines Validators auf formale Richtigkeit geprüft werden.

Die in diesem Abschnitt vorgestellte XML-Definition und die zugehörige XSD-Datei ist als grundlegendes Beispiel für das entwickelte Konzept der Struktur einer Arbeitsanweisung zu verstehen. Dabei können mittels der verschiedenen Typen von Informationen unterschiedliche Visualisierungsformen gewählt werden. Bauteil-Beschreibungen enthalten im Demonstrator noch weitere Eigenschaften in der vorgestellten XML-Notation. Dazu zählt z. B. die Angabe eines Dateipfades eines erklärenden Bildes, das für die spätere digitale Anzeige verwendet werden kann. Während Texte direkt angezeigt werden können, benötigen Bilder die Angabe eines Dateipfades,

der den Speicherort des Bildes im Dateisystem angibt, welches geladen und angezeigt werden kann. In den folgenden Abschnitten wird die technische Realisierung der Visualisierung der in XML definierten Arbeitsanweisungen vorgestellt. Die Aufbereitung der Arbeitsanweisung in Form einer GUI wird in Abschnitt 5.2 beschrieben. Die Verwendung der Information für eine Visualisierung im direkten Sichtfeld des Werkers wird in Abschnitt 5.3 erklärt.

5.1.2 Bewertung von Anzeigekonzepten mittels der System Usability Scale

In der Norm ISO 9241-210 *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210* [64] wird der Prozess zur Gestaltung von interaktiven Systemen beschrieben. Zur Bewertung der in diesem Kapitel vorgestellten Anzeigekonzepte wird in diesem Abschnitt die Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit (engl. *Usability*) [65] eines Demonstrators erläutert. Angewendet auf das Gebiet der Montage eines Produkts wird im Folgenden mit dem Begriff der Usability ein Maß beschrieben, das angibt, wie effektiv, effizient und zufriedenstellend die Werker den entwickelten Demonstrator nutzen konnten, um ihre Montageaufgabe erfolgreich abzuschließen. Die Usability wurde in Probandenversuchen mittels eines Fragebogens ermittelt.

Zur Bestimmung der Usability wird eine Kennzahl aus Referenzfragen berechnet, die nach Brooke [66] auch als System Usability Scale (SUS) bezeichnet wird. Der zugehörige Fragebogen umfasst zehn Fragen auf einer Likert Skala. Diese lauten in Anlehnung an Brooke [66] wie folgt:

Frage 1: *Ich kann mir sehr gut vorstellen, dieses System regelmäßig zu nutzen.*

Frage 2: *Ich empfinde das System als unnötig komplex.*

Frage 3: *Ich finde es einfach, das System zu nutzen.*

Frage 4: *Ich denke, dass ich technischen Unterstützung brauchen würde, um das System nutzen zu können.*

Frage 5: *Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.*

Frage 6: *Ich finde, dass das System zu viele Inkonsistenzen beinhaltet.*

Frage 7: *Ich kann mir gut vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.*

Frage 8: *Ich empfinde die Bedienung des Systems sehr umständlich.*

Frage 9: *Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.*

Frage 10: *Ich musste einige Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.*

Jede dieser Fragen kann auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet werden. Der niedrigste Wert entspricht dabei der Aussage „Ich stimme gar nicht zu“, der höchste Wert hat die zugehörige Aussage „Ich stimme voll zu“.

Aus diesen Einschätzungen wird dann der SUS-Wert SU berechnet. Dazu werden die Bewertungen W_i des Fragebogens mit folgender Formel in den SU umgerechnet:

$$SU = \frac{100}{40} \cdot \left[\sum_{i \in \{1,3,5,7,9\}} (W_i - 1) + \sum_{j \in \{2,4,6,8,10\}} (5 - W_j) \right] \quad (5.1)$$

Gleichung (5.1) ergibt einen Wertebereich von 0 bis 100 für den SUS-Wert SU . Je höher dieser Wert ist, desto benutzerfreundlicher ist das getestete System. Dies ist auch in Abbildung 5.4 zu sehen. Abhängig vom SUS-Wert kann mithilfe dieser Umrech-

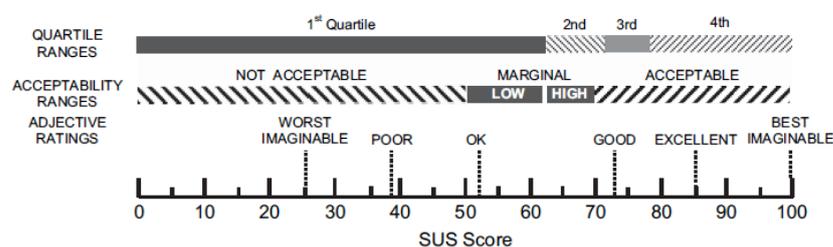


Abbildung 5.4: Umrechnung des SUS-Wertes - In dieser Abbildung ist die Bedeutung des SUS-Wertes in Quartile, Akzeptanz und beschreibende Adjektive angegeben [67].

nungsvorschrift die Bedeutung des Wertes in Quartile, Akzeptanz oder beschreibende Adjektive übersetzt werden. Ein SUS-Wert von $SU > 73$ gilt nach Rauer [67] somit als gut. Bei Werten größer als 85 gilt die Usability bereits als exzellent. Anhand dieser Kennzahl werden die in diesem Kapitel vorgestellten Anzeigekonzepte für Arbeitsanweisungen evaluiert.

5.2 Montageablaufplan-GUI

In diesem Abschnitt wird der Entwurf und die Realisierung eines Montageablaufplan-Assistenten behandelt. Dazu wurden die entwickelten Konzepte für Montageablaufpläne und Arbeitsanweisungen in eine technische Auslegung übergeführt und in ein

Testsystem integriert. Anhand dieses Testsystems wurde eine Nutzerstudie durchgeführt. Als Produkt wurde bei dieser Untersuchung der Crash-Bobby verwendet (vgl. Abbildung 4.15). Abschließend wurden die Ergebnisse dieser Studie bestimmt und ausgewertet.

5.2.1 GUI Konzept zur Präsentation von Arbeitsanweisungen

Als erste Ausbaustufe des Montageablaufplan-Assistenten wurde im Rahmen dieser Dissertation eine GUI entwickelt. Diese GUI wird dazu verwendet, eine Papier-basierte Arbeitsanweisung digital auf einem Monitor zu präsentieren. Die Umsetzung dieser Digitalisierung erfolgt anhand eines Konzeptentwurfs einer Montageablaufplan-GUI, welcher in Abbildung 5.5 zu sehen ist. Die GUI ist in vier Regionen aufgeteilt.

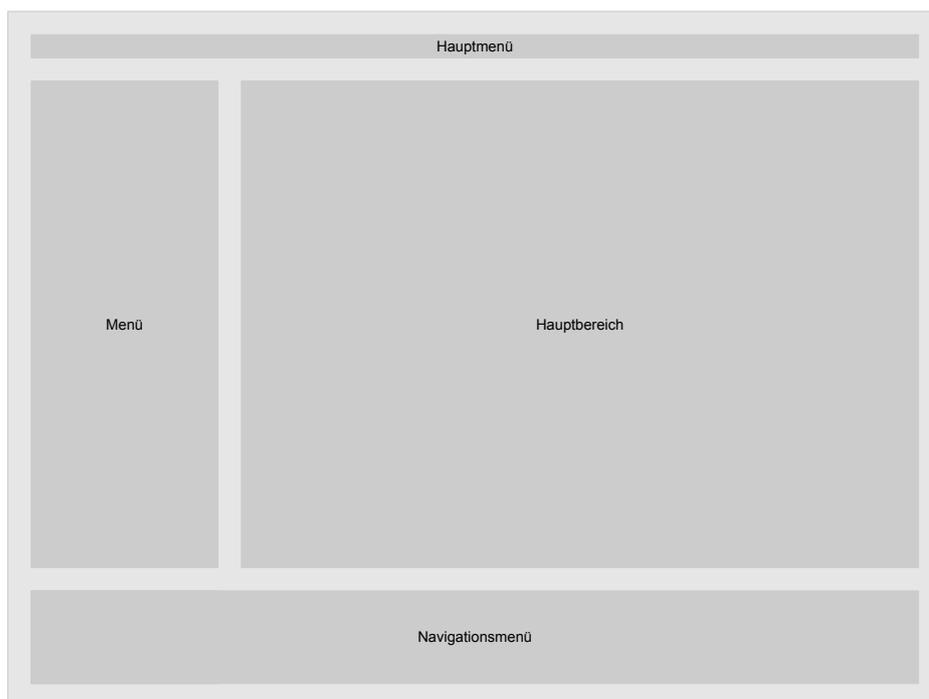


Abbildung 5.5: Konzeptentwurf der Montageablaufplan-GUI - In dieser Abbildung ist der Konzeptentwurf der Montageablaufplan-GUI für die technische Visualisierung von Arbeitsanweisungen zu sehen. Die Hauptbereiche der GUI sind in Form von Rechtecken hervorgehoben und umfassen vier Regionen.

In der Kopfzeile befindet sich das *Hauptmenü*. Dieses ist dafür vorgesehen, XML-basierte Montageablaufpläne zu laden oder die Montageablaufplan-GUI zu beenden. Ferner kann hier der Detailgrad der Montageablaufplan-GUI konfiguriert werden.

Im linken Randbereich der GUI ist das *Menü* für die Steuerung der Montageablaufplan-GUI vorgesehen. Hier kann eine Auswahl der verfügbaren Montageablaufpläne mittels Schaltflächen erfolgen.

Direkt rechts an diesen Menübereich angrenzend ist der *Hauptbereich* der GUI zu sehen, der zur Anzeige der Assistenzinformationen verwendet wird. Diese Informationen können dem Werker in Textboxen präsentiert werden. Ebenso erfolgt an dieser Stelle die Visualisierung der durchzuführenden Arbeitsschritte. Innerhalb dieser Übersicht können in Bildregionen Fotos von Bauteilen dargestellt oder unter Verwendung von Schaltflächen dynamische Inhalte präsentieren werden. Ferner wird hier die eigentliche Arbeitsanweisung ausgegeben. Schließlich wird im *Hauptbereich* der aktuell relevante Inhalt dynamisch dargestellt. Hierzu werden Visualisierungsmethoden verwendet, die gerade für den aktuellen Arbeitsschritt notwendig sind.

In der Fußzeile der Montageablaufplan-GUI befindet sich das *Navigationsmenü*. Dieses kann vom Werker verwendet werden, um durch die einzelnen Arbeitsschritte im Montageablaufplan zu springen. Die zugehörigen Arbeitsanweisungen werden dann im Hauptbereich der Montageablaufplan-GUI angezeigt.

5.2.1.1 Hauptmenü der GUI

Das *Hauptmenü* stellt die Möglichkeit bereit, die Montageablaufplan-GUI zu kontrollieren. Dazu zählen Funktionen, wie z. B. einen Montageablaufplan zu laden oder zu ändern. Abbildung 5.6 zeigt den konzeptionellen Aufbau des *Hauptmenüs*. Die Unter-

Assistent	Montageplan	Einstellungen	Hilfe
Neues Produkt	Ändern	Detailgrad ändern	Bedienungshilfe
Neustart	Prüfen	Ausgabesprache	Über
Beenden			

Abbildung 5.6: Hauptmenü der Montageablaufplan-GUI - Diese Abbildung zeigt den konzeptionellen Aufbau des *Hauptmenüs* mit eingeblendeten Untermenüs.

menüs je Schaltfläche sind in dieser Darstellung eingeblendet, um die zugeordneten Unterfunktionen zu visualisieren. Der erste Menüpunkt *Assistent* ist zur grundsätzlichen Bedienung der Montageablaufplan-GUI gedacht. Hier wird der Start einer Montage initiiert (*Neues Produkt*). Ferner kann der Assistent neu gestartet werden (*Neustart*). Schließlich lässt sich die Montageablaufplan-GUI herunterfahren (*Beenden*). Im Menüpunkt *Montageablaufplan* wird die Datenbasis der Anzeige kontrolliert. Hier

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

kann ein neuer XML-basierter Montageablaufplan in den Assistenten geladen werden (*Ändern*). Zusätzlich kann der Montageablaufplan auf Gültigkeit geprüft werden (*Prüfen*). Diese Prüfung erfolgt anhand der XSD-Datei, die zu dem aktuell geladenen Montageablaufplan gehört (vgl. Abschnitt 5.1.1).

Der Menüpunkt *Einstellungen* beinhaltet einen Zugang zu den Konfigurationsparametern der Montageablaufplan-GUI. Hier kann der Detailgrad der Arbeitsanweisung eingestellt werden (*Detailgrad ändern*). Diese Einstellung konfiguriert, wie detailreich die Assistenzinformationen im *Hauptbereich* dargestellt werden, z. B. ob nur ein Bild oder auch zusätzlich beschreibender Text zu einem Arbeitsschritt angezeigt wird. Ferner kann die Sprache der Arbeitsanweisungen konfiguriert werden.

Im Menüpunkt *Hilfe* kann eine allgemeine *Bedienungshilfe* zur Montageablaufplan-GUI aufgerufen werden. Diese Hilfestellung enthält Hinweise zur Bedienung der aktuell aktiven GUI-Ansicht. Diese Information ist hauptsächlich relevant für die Versuchsdurchführung. Schließlich können Informationen zur GUI angezeigt werden (*Über*).

Bezüglich des Detailgrades bleibt anzumerken, dass es sich bei den an den Versuchen beteiligten Nutzern ausschließlich um unerfahrene Werker handelte (Studenten). Entsprechend wurde auf die Realisierung dieser Schaltfläche im Versuchsetup aus Gründen der Vereinfachung verzichtet und stets der maximale Detailgrad vorgegeben.

5.2.1.2 Menü-Leiste

Die *Menü-Leiste* im linken Bereich der GUI ist mit Schaltflächen realisiert. Je nachdem wo sich der Werker im Montageablaufplan gerade befindet, wird das Aussehen und der Inhalt der Menü-Leiste entsprechend adaptiert. In diesem Bereich wird visualisiert in welcher Ebene des Montageablaufplans sich der Nutzer gerade befindet. Abbildung 5.7 zeigt den prinzipiellen Aufbau des *Menüs*. Im *Menü*-Bereich werden die hierarchischen Ebenen des Montageablaufplans visualisiert. Beginnend auf der obersten Ebene *Start* werden alle N-Ebenen des Montageablaufplans aufgelöst und abgebildet. Mittels farblicher Darstellung wird ebenfalls die aktuell aktive Ebene hervorgehoben. Dazu wird die aktive Schaltfläche, die der aktuellen Ebene entspricht, ausgegraut. Die Ebenen darunter oder darüber bleiben aktiv (nicht ausgegraut). So kann der Werker durch Anklicken jederzeit einen Ebenenwechsel durchführen.

Je detaillierter die Ansicht im *Hauptbereich* dargestellt wird, desto mehr Schaltflächen werden im *Menü* angezeigt. Die hierarchischen Ebenen werden dabei von oben (keine Details) bis unten (maximale Details) gegliedert. Während der Werker die Montageablaufplan-GUI verwendet, werden alle Punkte der Hierarchie angezeigt, was ihm jederzeit die Möglichkeit gibt, die Ebene zu wechseln.

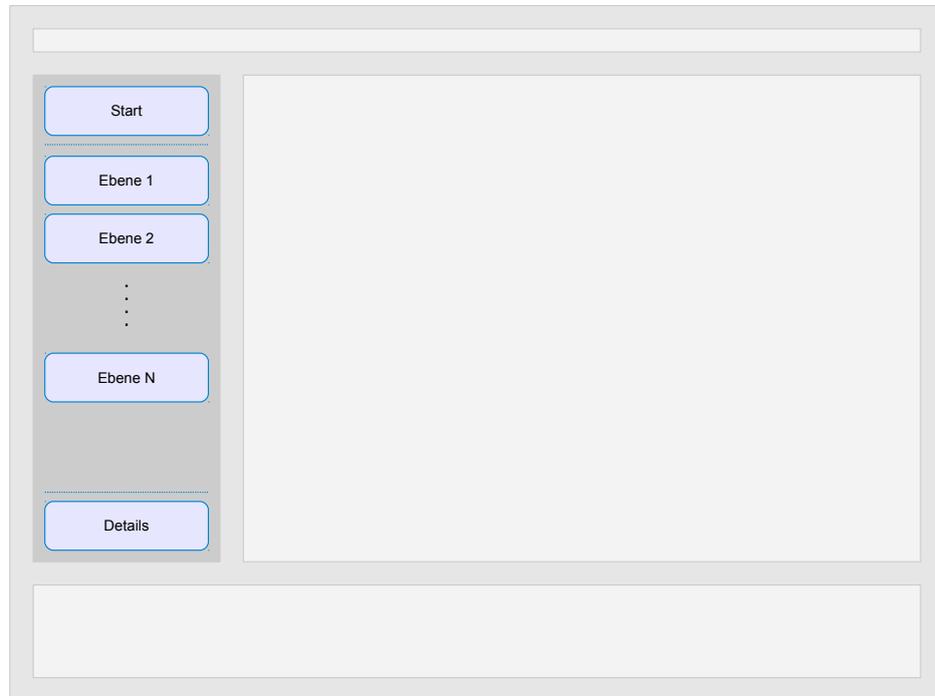


Abbildung 5.7: Menü-Leiste der Montageablaufplan-GUI - In diesem Bereich werden die hierarchischen Ebenen des Montageablaufplans beginnend bei *Start* bis zur *Ebene N* dargestellt. Zusätzlich enthält das *Menü* eine Schaltfläche *Details* um weiterführende Informationen einzublenden.

Zusätzlich enthält das *Menü* eine Schaltfläche *Details*, um weiterführende Informationen einzublenden. Der Nutzer behält mit diesem Designkonzept jederzeit die Entscheidungshoheit über den dargestellten Inhalt und die korrespondierende Tiefe im Montageablaufplan.

5.2.1.3 Navigationsmenü der GUI

Das *Navigationsmenü* ist im wesentlichen der Haupt-Interaktionsbereich zwischen Nutzer und GUI. Abbildung 5.8 zeigt die Standardansicht des *Navigationsmenüs*. Während der manuellen Montage des Produkts können hier drei Aktionen mittels Schaltflächen selektiert werden: *letzter Schritt*, *Zurück* und *nächster Schritt*. Mit den Pfeiltasten kann der Werker durch den Montageablaufplan navigieren. Die verknüpften Aktionen sind vergleichbar mit dem Vor- oder Zurückblättern in einer Papier-basierten Arbeitsanweisung. Bezogen auf die Jess-basierte Wissensbasis des Montageablaufplan-Assistenten wird die Vorwärtsbewegung im Montageablaufplan als Quittierung des aktuellen Ar-



Abbildung 5.8: Navigationsmenü der Montageablaufplan-GUI - Diese Abbildung zeigt drei Schaltflächen zur Navigation durch den Montageablaufplan (von links nach rechts): *letzter Schritt*, *Zurück* und *nächster Schritt*.

beitsschritts interpretiert (vgl. Quittiertaster Abschnitt 3.3.3.2). Nach Betätigung der Schaltfläche gilt der aktuelle Arbeitsschritt als abgeschlossen. Die Rückwärtsbewegung hingegen macht diesen Arbeitsschritt rückgängig.

Die dritte Schaltfläche dient der Rückkehr in die vorherige Ansicht. Diese Aktion ist vergleichbar mit dem „Home-Button“ eines Internetbrowsers. Hat der Werker beispielsweise eine Detail-Information zum aktuellen Bauteil aufgerufen, bewirkt die Selektion der *Zurück*-Schaltfläche die Rückkehr zur vorherigen Ansicht im *Hauptbereich*.

Als weiteres Merkmal ist es möglich, das *Navigationsmenü* auch durch die im *Hauptbereich* dargestellten Elemente anzupassen. Ein Anwendungsfall hierfür ist das Einblenden einer *Details*-Schaltfläche für die Anzeige weiterführender Informationen. Diese Schaltfläche würde nur erscheinen, wenn beim verknüpften Bauteil im XML-Montageablaufplan ein entsprechender Inhalt hinterlegt ist. Eine Anwendung hierfür könnte ein Weblink sein, der weiterführende Informationen bereit stellt. Da für die Versuchsdurchführung jedoch keine Notwendigkeit der Bereitstellung solcher Informationen bestand, da die relevanten Assistenzinformationen im Montageablaufplan hinterlegt wurden, wurde auf diese Funktionalität aus Gründen der Vereinfachung verzichtet.

5.2.1.4 Hauptbereich

Der *Hauptbereich* der Montageablaufplan-GUI ist eine dynamische Region, in der verschieden detaillierte Seiten angezeigt werden können (ähnlich dem Fenster eines Webrowsers). Dieser Bereich enthält alle wesentlichen und relevanten Informationen, die der Arbeitsanweisung zum zugehörigen Arbeitsschritt entsprechen. Die Anzeige einer Übersicht über alle durchzuführenden Arbeitsschritte entspricht der Darstellung der Arbeitsanweisung mit niedrigstem Detailgrad (vgl. *Start*-Ebene aus Abbildung 5.7). Je tiefer der Werker die Ebene im *Menü* wählt, desto detaillierter werden die angezeigten Arbeitsanweisungen. Damit steigt die Menge der darzustellenden Informationen

je Seite in der GUI an. Dies kann man sich leicht vorstellen: Umfasst z. B. die gesamte Montageaufgabe des Werkers fünf Arbeitsschritte, so kann dies mittels fünf Bildern bei niedrigem Detailgrad dargestellt werden. Wird nun der Detailgrad erhöht und damit zusätzliche Textblöcke angezeigt, so sollten die einzelnen Arbeitsschritte aus Gründen der Übersichtlichkeit auf Unterseiten angezeigt werden. Deshalb erfolgt die Darstellung aller Arbeitsschritte mit höchstem Detailgrad auf mehreren Unterseiten. Die Navigation durch diese Arbeitsschritte wird somit notwendig.

Als Beispiel für eine Seite mit einer Arbeitsanweisung mit hohem Detailgrad zu einem Arbeitsschritt zeigt Abbildung 5.9 den schematischen Aufbau. Die dargestellte

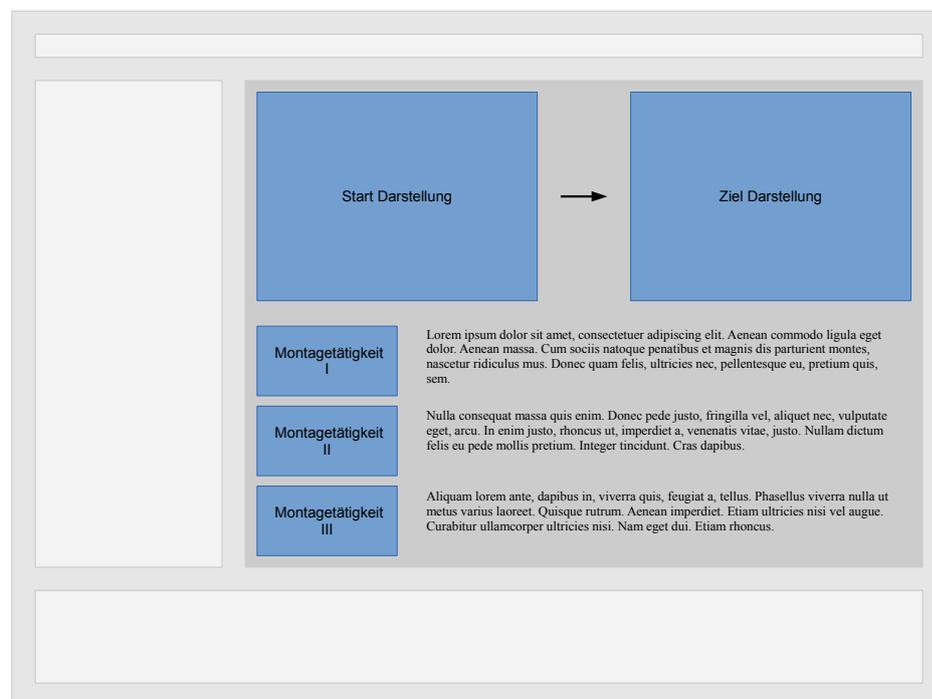


Abbildung 5.9: Hauptbereich der Montageablaufplan-GUI - In diesem Bereich wird die Arbeitsanweisung angezeigt. Das Beispiel zeigt eine Seite mit hohem Detailgrad: *Start Darstellung* des Bauteils vor und *Ziel Darstellung* nach durchgeführtem Arbeitsschritt sowie durchzuführende Montagetätigkeiten mit beschreibendem Bild und Text.

Momentaufnahme ist als Beispiel einer möglichen Visualisierungsform zu verstehen. In Blau sind Platzhalter für Bilder zu sehen. Der durchzuführende Arbeitsschritt ist in Form zweier Bilder als Überblick im oberen Bereich der Anzeige enthalten. Dieser Überblick ist mittels einer *Start Darstellung* des Bauteils zu Beginn des Arbeitsvorgangs und einer *Ziel Darstellung* nach durchgeführtem Arbeitsvorgang zusammenge-

fasst. Die einzelnen durchzuführenden Montagetätigkeiten sind darunter mit kleineren Einzelbildern und zugehöriger Beschreibung in Textform ergänzt.

Die Übersicht über alle Arbeitsschritte wird aus dem Montageablaufplan erzeugt. Dazu werden die zu fertigenden Baugruppen und deren zugehörige Namen extrahiert und anschließend linear aufgelistet. Die nächste Ebene im Detailgrad entspricht die Extraktion der im Montageablaufplan nächst tieferliegenden Information je Baugruppe. Diese werden jeweils auf einer eigenen Seite dargestellt, wodurch eine Navigation notwendig wird. Führt man diese Untergliederung rekursiv für alle Arbeitsanweisungen durch (Baugruppen können wiederum aus Baugruppen bestehen), so werden daraus immer neue und detailliertere Unterseiten erzeugt. Im höchsten Detailgrad würde so zu jedem Arbeitsschritt eine einzelne Seite erzeugt werden, was der größten Granularität an Informationen entspricht. Nachteil dieser Darstellungsform ist, dass der Nutzer jeden dieser Arbeitsschritte zu quittieren hat. Da er durch den Montageablaufplan navigieren muss, entspricht dies einem hohen Bedienungsaufwand, wodurch ein hoher Detailgrad in der Praxis wenig komfortabel erscheint. Das in dieser Dissertation vorgestellte Konzept der Montageablaufplan-GUI würde eine solche granulare Darstellung jedoch unterstützen und die Information aus dem XML-basierten Montageablaufplan extrahieren. Unerfahrene Werker würden vermutlich genauere Assistenzinformationen wünschen, geübte Werker bevorzugen vermutlich nur eine Übersicht über die durchzuführenden Arbeitsvorgänge.

5.2.2 Technische Auslegung der Montageablaufplan-GUI in Qt

Als Entwicklungsumgebung für die Realisierung des GUI-Demonstrators wurde das „Cross-platform application and User Interaction (UI) framework“ (Qt) gewählt. Qt bietet ein plattformunabhängiges Framework zur Gestaltung von GUIs. Die verwendeten Qt-Objekte beschränken sich im wesentlichen auf drei Elemente zur Visualisierung von Montageablaufplänen: `QPushButton`, `QLabel` und `QPixmap`. Zum interagieren mit der GUI werden dem Nutzer Schaltflächen dargeboten (`QPushButton`). Information in Textform wird innerhalb von definierten Flächen (`QLabel`) ausgegeben. Schließlich können Bildregionen innerhalb dieser Flächen definiert werden, in welchen Fotos von Bauteilen oder Baugruppen angezeigt werden (`QPixmap`).

Jedem Informationstyp in der digitalen XML-basierten Arbeitsanweisung wurde eine Eigenschaft im zugehörigen XSD zugewiesen. Bei der Implementierung wurde einem solchen XSD-Datum eines der Qt-Elemente zugeordnet. Damit sind die verschiedenen im Montageablaufplan enthaltenen Medientypen auf Grundlage des XSD in Qt

maschinenlesbar und können entsprechend durch die passende GUI-Komponente visualisiert werden. Der in XSD definierte Typ der Information der Arbeitsanweisung bedingt somit den Typ des GUI-Elements in Qt.

Generell greift die technische Auslegung des GUI-Demonstrators einige Konzepte der Montageablaufplan-GUI aus Abschnitt 5.2.1 auf und realisiert diese. Der entwickelte GUI-Demonstrator wurde mittels einer Nutzerstudie [92] im Rahmen des PPMMK evaluiert. Im Folgenden werden die verschiedenen Ansichten des GUI-Demonstrators beschrieben. Ferner wird gezeigt, wie das vorgestellte GUI-Konzept in einem funktionsfähigen GUI-Demonstrator realisiert wurde.

5.2.2.1 Startansicht der GUI

Das Fenster des GUI-Demonstrators gliedert sich in drei Hauptbereiche. Im Vergleich zum Konzeptentwurf aus Abbildung 5.5 wurde auf das Hauptmenü im oberen Bereich verzichtet, da bei der späteren Evaluierung die Funktionsweise der GUI mit einer herkömmlichen Papier-Arbeitsanweisung verglichen wird. Entsprechend wurde die Funktionalität auf die dafür notwendigen Komponenten reduziert. Abbildung 5.10 zeigt die Startansicht des GUI-Demonstrators. Im linken Randbereich des GUI-De-

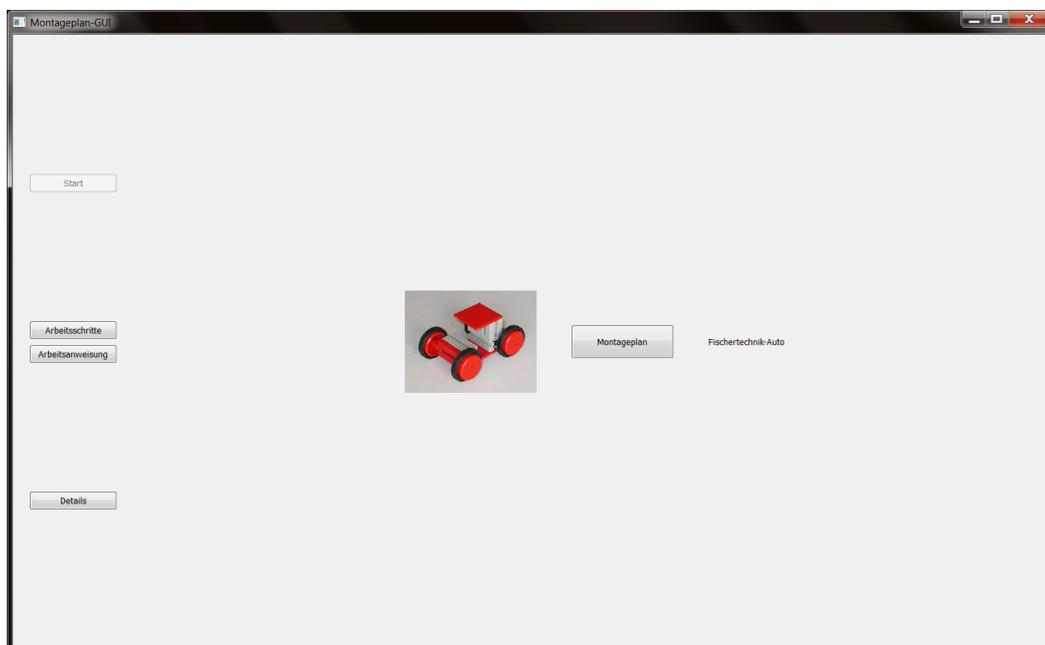


Abbildung 5.10: GUI-Demonstrator in der Startansicht - Links befindet sich die *Menü-Leiste* zur Ebenen-Navigation durch den Montageablaufplan. Rechts daneben befindet sich der *Hauptbereich* der GUI mit der Auflistung aller auswählbaren Montageablaufpläne.

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

monstrators befindet sich die *Menü*-Leiste. Die Abbildung zeigt die Startansicht der Ebenen-Navigation durch den Montageablaufplan. Entsprechend ist die *Start*-Schaltfläche ausgegraut.

Rechts neben der Menü-Leiste befindet sich der *Hauptbereich* der GUI. Hier werden alle im GUI-Demonstrator verfügbaren Montageablaufpläne aufgelistet. Die Auswahl des Produkts wird mittels Betätigung der Schaltfläche getroffen.

Die verfügbaren Montageablaufpläne werden beim Start der GUI automatisch aus den zugehörigen XML-Dateien ausgelesen. Im dargestellten Beispiel entspricht das einer Bildregion mit dem Bild des Fischertechnik-Autos sowie dem zugehörigen Produktnamen. Im Vergleich zum Konzeptentwurf wurde in diesem Demonstrator auf die Fähigkeit des XSD-Ladens verzichtet, da der Montageablaufplan vor Versuchsbeginn bereits mit dem XML-Validator auf Gültigkeit geprüft wurde. Während des Versuchs erfolgt keine Veränderung des Montageablaufplans.

5.2.2.2 Übersicht der Arbeitsschritte

Wählt der Nutzer einen Montageablaufplan aus, so wird die Arbeitsanweisung zum ersten Arbeitsschritt aus dem XML-basierten Montageablaufplan extrahiert und angezeigt. Abbildung 5.11 zeigt die zu bearbeitenden Schritte bei der Montage des Fischertechnik-Autos. In der *Menü*-Leiste ist nun die Schaltfläche *Arbeitsschritte* selektiert. Ein Rücksprung zur Startansicht wäre mittels der sich darüber befindenden *Start*-Schaltfläche möglich.

Im *Hauptbereich* der GUI sind die vom Werker durchzuführenden Arbeitsschritte angezeigt. Die Reihenfolge der Arbeitsschritte ist aufsteigend nummeriert. Die dargestellten Informationen sind aus dem XML-Montageablaufplan extrahiert. Diese umfassen je Baugruppe ein Foto der zu fertigende Baugruppe, die Anzahl der herzustellenden Baugruppen und eine kurze Beschreibung der Arbeitsschritte. Die Reihenfolge der Arbeitsschritte wird durch den mit dem GUI-Demonstrator verbundenen Montageablaufplan-Assistenten bestimmt. Dieser extrahiert die notwendigen Arbeitsschritte aus dem Montageablaufplan und priorisiert die einzelnen Montagetätigkeiten nach der Ebene, in welcher die Baugruppen montiert werden müssen, um das finale Produkt zu erhalten. Für die Evaluierung des GUI-Demonstrators wurde das Fischertechnik-Auto gewählt, da es auf wenige unterschiedliche Weisen montiert werden kann. Betrachtet man den Montageablaufplan aus Abbildung 3.4, so ist schnell ersichtlich, dass der Werker mit der Montage der Baugruppe *mod_Dach*, *mod_Boden* oder *mod_Rad* beginnen könnte. Das Design der Montageablaufplan-GUI ist so gewählt, dass der Werker an jeder dieser Stellen im Montageablaufplan einspringen kann und die zugehörige

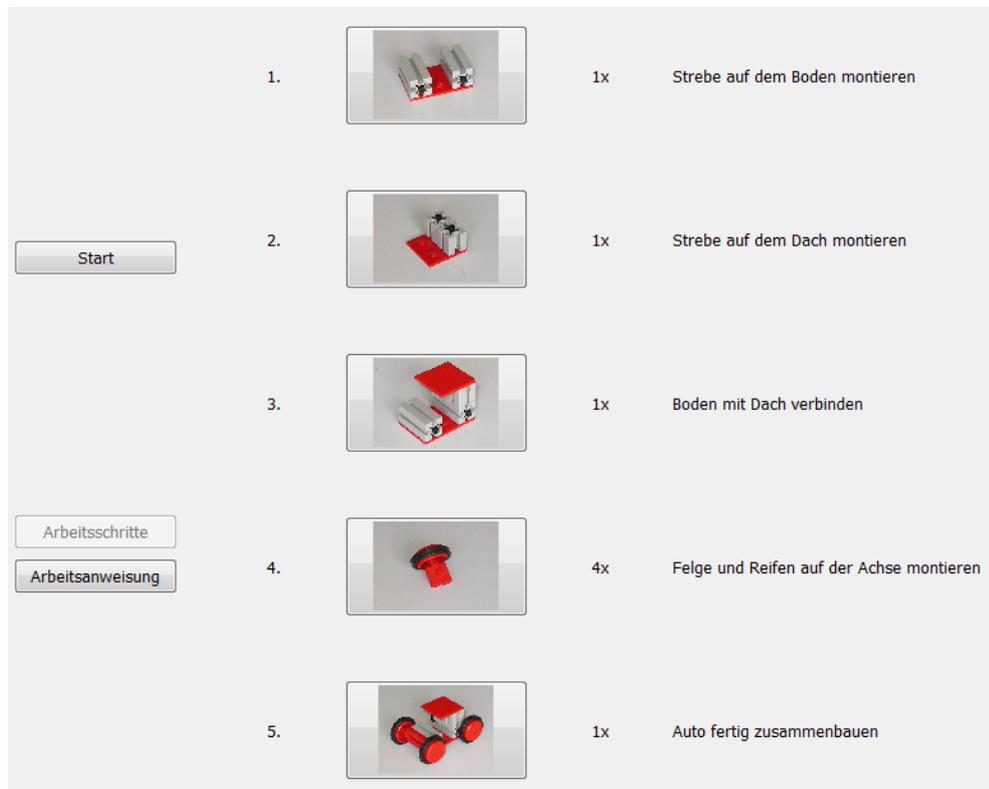


Abbildung 5.11: GUI-Demonstrator in der Arbeitsschritt-Ansicht - Links in der *Menü*-Leiste ist die Schaltfläche *Arbeitsschritte* selektiert. Im *Hauptbereich* der GUI werden die Arbeitsschritte des ausgewählten Montageablaufplans angezeigt.

Assistenzinformation erhält. Hat er einen Arbeitsvorgang beendet, stellt die Montageablaufplan-GUI den nächsten möglichen Schritt dar und führt den Werker so durch die Montage, bis das Produkt fertiggestellt ist.

Für die Beurteilung der Darstellungsweise der Arbeitsanweisung mit dem GUI-Demonstrator ist die alternative Auswahlmöglichkeit des Montagebeginns nicht von Interesse, da der Informationsgehalt der Darstellung evaluiert werden soll. Entsprechend wurde der Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos so modifiziert, dass es nur eine mögliche Reihenfolge von durchzuführenden Arbeitsschritten gibt. Der Werker wird somit durch den Montageablaufplan geführt und muss nicht entscheiden, womit er beginnt. In der dargestellten Ansicht des GUI-Demonstrators ist ein Überblick über die zu fertigenden Baugruppen gegeben. Möchte der Werker detailliertere Arbeitsanweisungen haben, kann er im linken *Menü* die Schaltfläche *Arbeitsanweisung* wählen. Dadurch gelangt der Nutzer des GUI-Demonstrators zum ersten Arbeitsschritt im Montageablaufplan.

5.2.2.3 Beschreibung der detaillierten Arbeitsanweisung

Während der Montage des Fischertechnik-Autos navigiert der Nutzer durch die notwendigen Arbeitsschritte. Im *Hauptbereich* des GUI-Demonstrators erfolgt die Anzeige der zum Arbeitsschritt gehörenden Arbeitsanweisung. Abbildung 5.12 zeigt dies für die Baugruppe *mod_Rad* (4. Arbeitsschritt). Links in der *Menü-Leiste* ist die Schalt-

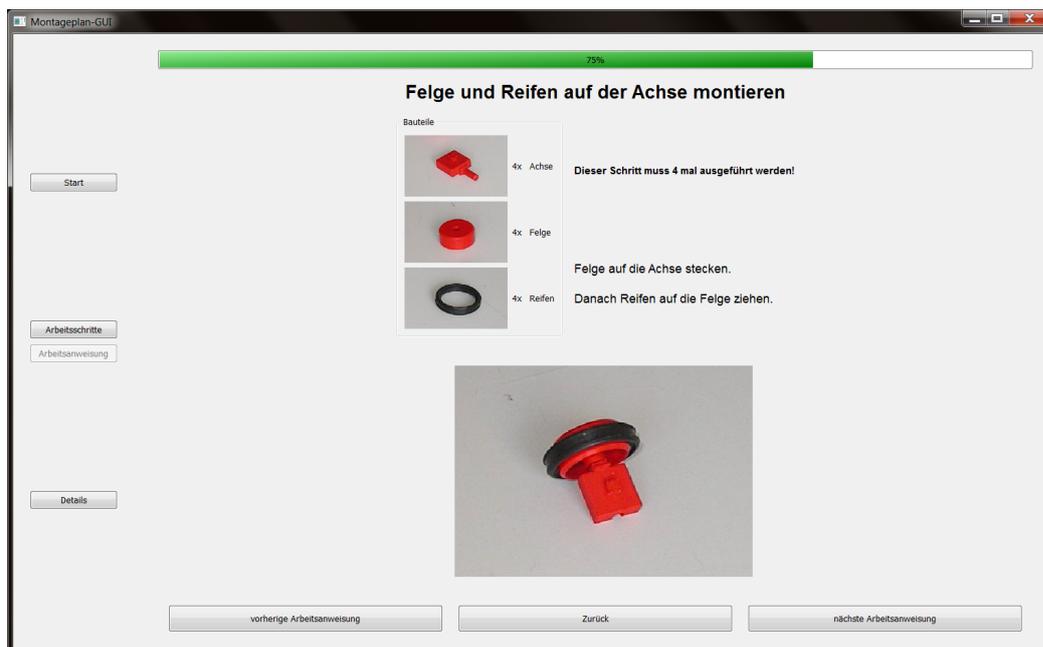


Abbildung 5.12: GUI-Demonstrator in der Arbeitsanweisungs-Ansicht - Links in der *Menü-Leiste* ist die Schaltfläche *Arbeitsanweisung* selektiert. Im *Hauptbereich* der GUI werden detaillierte Arbeitsanweisungen zum ausgewählten Arbeitsschritt angezeigt. Ferner ist im oberen Bereich ein Fortschrittsbalken zu sehen.

fläche *Arbeitsanweisung* selektiert. Im *Hauptbereich* der GUI werden detaillierte Arbeitsanweisungen zum ausgewählten Arbeitsschritt angezeigt. Im obersten Teil dieses Bereichs ist ein Fortschrittsbalken zu sehen, der den Werker über den prozentualen Fortschritt im Montageablaufplan informiert. Diese Fortschrittsanzeige wurde als Ergebnis der Evaluierung eines GUI-Prototypen integriert (siehe Abschnitt 5.2.3.1). Der prozentuale Wert wird aus dem Anteil der bearbeiteten Arbeitsschritte in Relation zur Anzahl der insgesamt durchzuführenden Arbeitsschritte berechnet. Unter dem Fortschrittsbalken befindet sich in Form des Seitentitels die Kurzanweisung zum aktuellen Arbeitsschritt innerhalb einer Textbox. Dies ist der gleiche Text, der zuvor in der Arbeitsschritt-Übersicht aus Abbildung 5.11 zu sehen war.

Unter der Kurzanweisung befindet sich die Übersicht über die für den Arbeitsschritt benötigten Bauteile und die zugehörige Anzahl. Neben der Bauteilübersicht ist die detaillierte Arbeitsanweisung zu sehen. Darunter ist der zu erreichende Zielzustand der Baugruppe in Form eines Fotos dargestellt.

In der Fußzeile der GUI ist in dieser Ansicht das *Navigationsmenü* eingeblendet. Hiermit kann der Nutzer zur *vorherigen* oder zur *nächsten Arbeitsanweisung* über die zugehörigen Schaltflächen springen. Es wurde ein einfacher Vorwärts-Rückwärts-Mechanismus implementiert, wie man ihn z. B. von der Navigation durch die Historie eines Internet-Browsers kennt.

Um wieder zur Arbeitsschritt-Übersicht zurückzukehren, kann der Nutzer entweder links im *Menü* die entsprechende Ebene, oder im *Navigationsmenü* die *Zurück*-Schaltfläche (Mitte) wählen.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass eine erfasste Werkeraktion (vgl. Kapitel 4) ebenfalls die *nächste Arbeitsanweisung*-Schaltfläche auslösen kann. Dazu wurde eine Software-Schnittstelle implementiert, die diesen Mechanismus von außerhalb des GUI-Demonstrators ansprechen kann. So kann die Arbeitsanweisungs-Ansicht automatisch weitergeschaltet werden, wenn der Montageablaufplan-Assistent erkennt, dass der Werker den aktuellen Arbeitsschritt abgeschlossen hat, was z. B. mit dem vorgestellten Zustandsautomaten aus Abschnitt 4.2.3 erfolgen kann. Ferner wurde beim Entwurf der GUI auf ausreichend große Schaltflächen geachtet, damit eine Bedienung mittels berührungssensitivem Bildschirm (welcher für die Versuche nicht zur Verfügung stand) möglich ist.

5.2.3 Probandenversuche und Ergebnisse

Die in Abschnitt 5.2.2 beschriebene technische Auslegung der Konzepte der Montageablaufplan-GUI wurde im Rahmen einer Nutzerstudie [92] evaluiert. Diese Beurteilung erfolgte in zwei Stufen: einem Vorversuch mit einem GUI-Prototypen und einer abschließenden Evaluierung des finalen GUI-Demonstrators. Der Vorversuch diente dem Sammeln von ersten Eindrücken bezüglich des GUI-Konzeptes im Prototypen mit vollem Funktionsumfang der Montageablaufplan-GUI. Das Hauptaugenmerk lag auf der Beurteilung der Benutzerfreundlichkeit des Bedienkonzeptes der Montageablaufplan-GUI und der Darstellung der Arbeitsanweisungen. Im zweiten Versuch wurde der finale GUI-Demonstrator beurteilt. Dieser enthielt die im Vorversuch gewonnenen Anmerkungen der Nutzer.

In Abbildung 5.13 ist der Versuchsaufbau zu sehen, der für beide Versuche eingerichtet wurde. Links in der Abbildung ist ein PC-Monitor zu sehen, auf dem die GUI

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN



Abbildung 5.13: Versuchsaufbau zur Montageablaufplan-GUI - An diesem Arbeitsplatz wurde die Montageablaufplan-GUI evaluiert [92]. Links ist der Monitor zu sehen, der die GUI anzeigt. Die Interaktion mit der GUI erfolgt mittels Maus und Tastatur. Rechts neben dem Monitor sind die Bauteile gelagert.

anzeigt wird. Die Interaktion der Nutzer mit der GUI erfolgt mittels den Standard Eingabegeräten Maus und Tastatur.

Rechts neben dem Monitor liegen die benötigten Bauteile bereit. Die Bauteile für das Fischertechnik-Auto sind in den roten Boxen auf der Arbeitsfläche aufbewahrt. Davor befinden sich direkt auf der Arbeitsfläche die Bauteile für die Montage des Crash-Bobby. Während der Versuchsdurchführung wurden den VPs jeweils nur die benötigten Bauteile vorgelegt.

Je Versuchsreihe mussten die VPs zwei Produkte montieren: den Crash-Bobby und das Fischertechnik-Auto. Das Produkt Crash-Bobby wurde zunächst mit einer Papierbasierten Arbeitsanweisung montiert. Nach der Hälfte der Montage wurden die verbleibenden Arbeitsschritte mit der digitalen Version an der GUI vollendet. Die Papierversion war die original Bauanleitung des Herstellers qfix¹, aus der ebenfalls die relevanten Arbeitsanweisungen für die Montageablaufplan-GUI abgeleitet wurden. Der Vergleich beider Varianten wurde anhand dieses Produkts vorgenommen. Der Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos wurde nur mit der GUI visualisiert und zur Beurteilung der GUI-Darstellung herangezogen.

5.2.3.1 Evaluierung des GUI-Prototypen

Im ersten Durchgang der Evaluierung wurde ein Prototyp der Montageablaufplan-GUI evaluiert. Dazu haben 16 Probanden unter Zuhilfenahme eines Papierbasierten Montageablaufplans und der Montageablaufplan-GUI den Crash-Bobby montiert. Die VPs waren Studenten des Studiengangs Elektrotechnik und Informationstechnik an

¹qfix robotics GmbH – Roboterbausatz Crash-Bobby (<http://www.qfix.de>)

der Technischen Universität München. Alle waren ähnlichen Alters. Die Beurteilung erfolgte im Rahmen des PPMK mittels eines Fragebogens.

Der Schwerpunkt der Beurteilung lag hierbei auf den wichtigsten Konzeptideen, um eine Optimierung der finalen Version der Montageablaufplan-GUI zu ermöglichen. Der Fragebogen zum Vorversuch umfasste acht Fragen [92] und stellt teilweise eine Abwandlung der Fragen des SUS (vgl. Abschnitt 5.1.2) dar.

Frage 1: *Die Anordnung der Elemente ist gut strukturiert*

Frage 2: *Die Bedienbarkeit ist intuitiv*

Frage 3: *Die digitale Version ist besser als die Papierversion*

Frage 4: *Die Sequenz der Arbeitsschritte ist besser strukturiert als auf der Papierversion*

Frage 5: *Die dargebotenen Informationen waren ausreichend, um die Montage erfolgreich abzuschließen*

Frage 6: *Die dargestellten Informationen sind gut lesbar*

Frage 7: *Der Montageablaufplan-Assistent sollte automatisch den aktuellen Arbeitsschritt erkennen können und die Ausgabe weiter schalten*

Frage 8: *Ich wünsche mir mehr Eingabemodalitäten in der digitalen Version*

Die subjektive Bewertung der Fragen durch die Probanden erfolgte in fünf Abstufungen. Beginnend bei Stufe 1 mit zugehöriger Aussage „Ich stimme gar nicht zu“ konnte bis zur Stufe 5 mit zugehöriger Aussage „Ich stimme voll zu“ ein Urteil getroffen werden.

Die Darstellung der Evaluierungsergebnisse der Probandenversuche erfolgt mittels Box-Whisker-Plot [68]. Innerhalb der in blau gefärbten Boxen befinden sich 50% der Abstimmungsergebnisse. Der Rand der Boxen beschreibt jeweils das untere ($Q_{0.25}$) bzw. das obere Quartil ($Q_{0.75}$). Der Median jeder Frage ist mittels einer roten Linie im Diagramm eingetragen. Die in schwarz eingetragenen Antennen visualisieren die Maximalwerte der Abstimmungsergebnisse. Die maximale Länge der Antennen entspricht dem 1.5-fachen Interquartilabstand. Liegt der Minimal- bzw. Maximalwert eines Messwertes innerhalb dieses Abstands, so endet die Antenne bei diesem Wert. Alle Werte, die außerhalb dieses Abstands liegen, werden als Ausreißer separat behandelt.

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Sollten Ausreißer bei einer Frage vorkommen, so sind diese mit grünen Kreisen im Graph eingetragen. Diese gewählte Darstellungsform gilt im Folgenden für alle mit Box-Whisker-Plot visualisierten Daten.

Das Evaluierungsergebnis des Vorversuchs ist in Abbildung 5.14 zu sehen. Wie

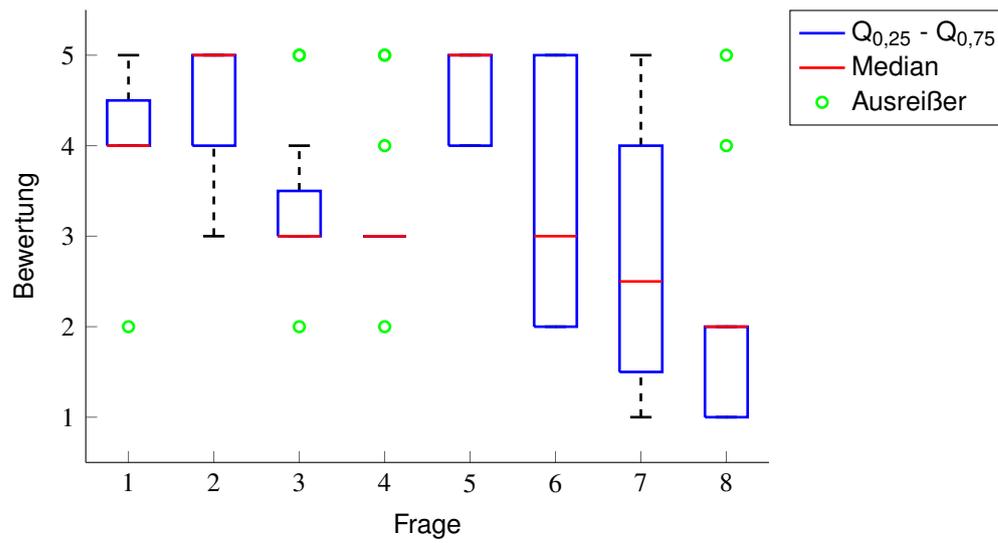


Abbildung 5.14: Ergebnisse des Vorversuchs - Diese Abbildung zeigt das Evaluierungsergebnis der 16 Probanden des Vorversuchs [92].

der Darstellung zu entnehmen ist, fanden die Probanden die Anordnung der Elemente größtenteils gut (Frage 1). Ebenfalls hat die Bedienbarkeit der GUI gut abgeschnitten (Median der Frage 2 bei 5). Bei der Frage nach Vorteilen der digitalen vs. der Papierbasierten Arbeitsanweisung wurde die GUI durchschnittlich mit Tendenz zu leichten Vorteilen bewertet (Frage 3). Die Sequenz der Arbeitsanweisungen spielte beim Vorversuch eine untergeordnete Rolle, da das zu fertigende Produkt keine hohen Ansprüche an die Fertigkeiten der Probanden stellte. Dies zeichnet sich auch in dem Ergebnis der Beurteilung von Frage 4 ab. Die Strukturierung der Arbeitsanweisungen wurde durchschnittlich bewertet, mit drei Ausreißern. Die präsentierte Assistenzinformation war jedoch durchweg ausreichend, um die Montageaufgabe zu erfüllen (Frage 5). Bei der Lesbarkeit der Arbeitsanweisungen waren sich die Probanden uneinig. Das Abstimmungsspektrum wurde hier fast vollständig ausgeschöpft (Frage 6). Manche Nutzer bevorzugen große Schriften, andere eher kleine.

Frage 7 zielte auf die Integration einer Arbeitsschritterkennung im Sinne von Kapitel 4 ab. Da die Probanden zum Zeitpunkt der Evaluierung keine Erfahrungen mit einer solchen Systemkomponente hatten und diese auch nicht in die Montageablaufplan-GUI

integriert war, wurde diese Frage ebenfalls unklar beantwortet.

Die Bedienung der Montageablaufplan-GUI wurde mittels PC Tastatur und Maus vorgenommen (vgl. Abbildung 5.13). Dies war ausreichend, um die Montage durchzuführen, da der Großteil der Probanden keine weiteren Eingabemodalitäten verlangt hat (Frage 8).

Bei den Fragen 1, 2, 5 und 6 handelt es sich um eine Abwandlung der SUS-Fragen aus Abschnitt 5.1.2. Dabei haben alle Fragen eine positive Eigenschaft bei maximaler Bewertung mit voller Punktzahl. Damit lässt sich ein reduzierter Wert RSU_{GUIpre} analog nach Gleichung (5.1) für die getätigten Bewertungen W_i nach der Formel

$$RSU_{GUIpre} = \frac{100}{16} \cdot \left[\sum_{i \in \{1,2,5,6\}} (W_i - 1) \right] \quad (5.2)$$

berechnen. Durch die Skalierung mit dem Faktor $\frac{100}{16}$ erreicht der RSU_{GUIpre} einen Wertebereich von 0 bis 100 analog zum SUS-Wert SU . Entsprechend gilt hier für einen höheren Wert RSU_{GUIpre} ebenfalls die Entsprechung einer besseren Benutzerfreundlichkeit der Anzeige, analog zum SU . Der nach Gleichung (5.2) berechnete RSU_{GUIpre} für den Vorversuch ergibt einen Wert von 79.30 über die elf VPs. Die Einordnung dieses Werts in die Skala aus Abbildung 5.4 bedeutet eine akzeptable Usability, sowie die Bewertung *gut*.

Bemerkung: Der Wert RSU kann nicht eins zu eins auf die Skala des SU übertragen werden, da zur Bestimmung des RSU ein reduzierter Fragebogen verwendet wurde. Jedoch zur Abschätzung der Usability und zur Einordnung des Testergebnisses der VPs in eine textuelle Wertung wird in dieser Arbeit der RSU als Tendenz verstanden und zur Beurteilung verwendet.

Die Vorversuche beinhalteten als weiteres Ergebnis den Wunsch der Nutzer nach einer Anzeige ihres Fortschritts im Montageablaufplan. Diesem Wunsch wurde mit der Integration eines Fortschrittsbalken in den Hauptbereich der Montageablaufplan-GUI nachgekommen. In Abbildung 5.12 ist dieser Fortschrittsbalken bereits im oberen Teil der Montageablaufplan-GUI zu sehen.

5.2.3.2 Evaluierung der Montageablaufplan-GUI

Unter Berücksichtigung des Vorversuchs wurde der GUI-Demonstrator verbessert und erneut evaluiert. Die wesentlichen Änderungen betrafen den bereits erwähnten Fortschrittsbalken. Zusätzlich wurden die Arbeitsanweisungen der Papierversion angepasst und je Arbeitsschritt überarbeitet. Die Hauptevaluierung der Montageablaufplan-GUI wurde mit elf VPs durchgeführt. Diese mussten zu Beginn einen Fragebogen zu ihrer

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Person ausfüllen. Die Probanden waren ausschließlich Studenten der Elektrotechnik und Informationstechnik mit einem Anteil von 36% weiblichen und 64% männlichen Probanden. Alle Probanden gaben einen Altersbereich von 18 bis 25 Jahren an, mit hohen bis sehr hohen Kenntnissen im Bedienen von Computern.

Die Evaluierung wurde in vier Schritten durchgeführt. Nach Bearbeitung der jeweiligen Arbeitsschritte mussten die Probanden einen Frageblock ausfüllen, der zu den jeweiligen Aufgaben spezifische Einschätzungen enthielt [92]. Die Darstellung der Ergebnisse je Frageblock erfolgt wiederum mittels Box-Whisker-Plot. Der subjektive Eindruck der Probanden wird dabei je Frage auf einer Skala von 1 bis 8 bewertet mit zugehöriger textueller Beschreibung „Stimme gar nicht zu“ bis „Stimme voll zu“. Es wurde hier bewusst auf eine ungerade Anzahl von Bewertungseinheiten verzichtet, um die Tendenz der Probanden abfragen zu können. Bei einer geraden Anzahl von Bewertungseinheiten müssen sich die Probanden für eine positive oder negative Tendenz entscheiden, da es so keine Auswahlmöglichkeit für einen mittleren Wert mit der Entsprechung *neutral* gibt.

Frageblock 1 dient der Beurteilung des Designs des Menüs und des Hauptbereichs. Hier standen die oberen Ebenen der Montageablaufplan-GUI mit geringem Detailgrad im Vordergrund der Bewertung. Die Probanden mussten folgende Aussagen in Bezug auf die Arbeitsschritt-Ansicht (vgl. Abbildung 5.11) beurteilen:

Frage 1: *Die graphische Gestaltung ist ansprechend.*

Frage 2: *Die Anordnung der Elemente ist gut strukturiert.*

Frage 3: *Der Text ist gut lesbar.*

Frage 4: *Die Bezeichnungen der Schaltflächen sind leicht zu verstehen.*

Frage 5: *Die Bedienbarkeit ist intuitiv.*

Das Ergebnis dieser Bewertung von Frageblock 1 ist in Abbildung 5.15 zu sehen. Bei Betrachtung der Mediane fällt sofort die positive Bewertung der Montageablaufplan-GUI auf. Die Fragen 1 bis 3, die auf das Design der GUI ausgerichtet sind, wurden positiv bewertet. Auch die Verständlichkeit der Schaltflächen war durchweg gegeben. Schließlich wurde die Bedienbarkeit der Montageablaufplan-GUI (bis auf einen Ausreißer) mit der maximal möglichen Wertung beurteilt.

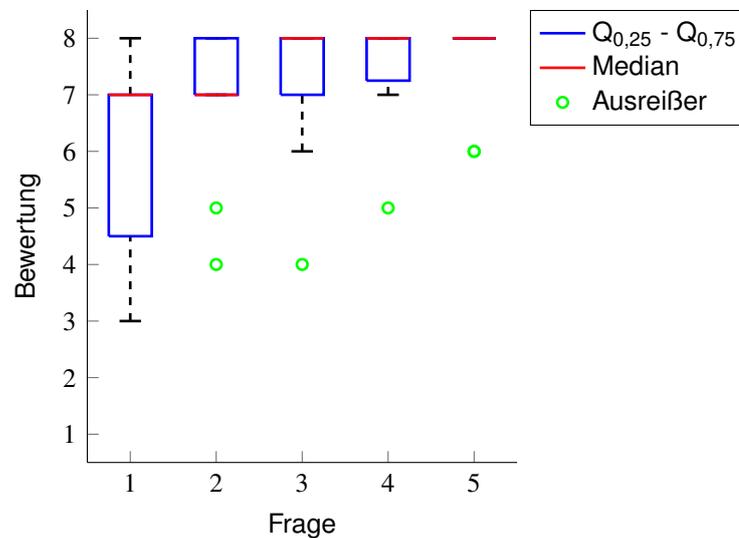


Abbildung 5.15: Ergebnisse des ersten Frageblocks - Diese Abbildung zeigt das Evaluierungsergebnis der elf Probanden der Arbeitsschritt-Ansicht der Montageablaufplan-GUI [92].

Bei den Fragen 1 bis 5 handelt es sich ebenfalls um eine Abwandlung der SUS-Fragen aus Abschnitt 5.1.2. Damit lässt sich ein reduzierter Wert RSU_{GUIf1} analog nach Gleichung (5.1) für die getätigten Bewertungen W_i nach der Formel

$$RSU_{GUIf1} = \frac{100}{35} \cdot \left[\sum_{i \in [1;5]} (W_i - 1) \right] \quad (5.3)$$

berechnen. Durch die Skalierung mit dem Faktor $\frac{100}{35}$ erreicht der RSU_{GUIf1} einen Wertebereich von 0 bis 100 analog zum SUS-Wert SU . Der nach Gleichung (5.3) berechnete RSU_{GUIf1} für die Bewertung des Designs der Montageablaufplan-GUI ergibt einen Wert von 86.49 über die elf VPs. Die Einordnung dieses Werts in die Skala aus Abbildung 5.4 unter Berücksichtigung der Bemerkung aus Abschnitt 5.2.3.1 bedeutet eine akzeptable Usability, sowie die Bewertung *exzellent*.

Frageblock 2 dient der Untersuchung der subjektiven Bewertung der detaillierten Präsentation der Arbeitsanweisung. Dazu mussten die Probanden die folgenden Aussagen bezüglich der Arbeitsanweisungs-Ansicht (vgl. Abbildung 5.12) beurteilen:

Frage 6: *Die graphische Gestaltung ist ansprechend.*

Frage 7: *Die Anordnung der Elemente ist gut strukturiert.*

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Frage 8: *Der Text ist gut lesbar.*

Frage 9: *Die Bezeichnungen der Schaltflächen sind leicht zu verstehen.*

Frage 10: *Die Bedienbarkeit ist intuitiv.*

Frage 11: *Die Inhalte der Bilder sind gut zu erkennen.*

Frage 12: *Die Bilder haben mich bei der Montage unterstützt.*

Frage 13: *Die Anzeige der Bauteile hat mich bei der Montage unterstützt.*

Frage 14: *Der Fortschrittsbalken war hilfreich.*

Das Ergebnis dieser Bewertung von Frageblock 2 kann Abbildung 5.16 entnommen werden. Die Fragen 6 bis 10 sind die gleichen, wie in Frageblock 1, jedoch bezogen

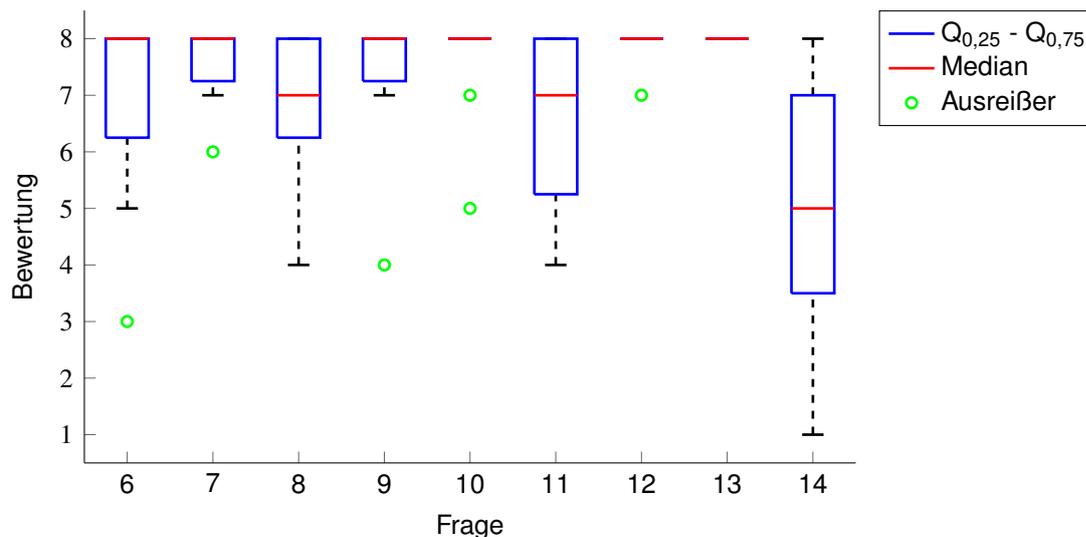


Abbildung 5.16: Ergebnisse des zweiten Frageblocks - Diese Abbildung zeigt das Evaluierungsergebnis der Arbeitsanweisungs-Ansicht der Montageablaufplan-GUI [92].

auf die Arbeitsanweisungs-Ansicht der Montageablaufplan-GUI. Die Bewertung der Probanden ist auch hier sehr gut ausgefallen, was das zu Grunde liegende Designkonzept der GUI zu unterstützen scheint.

Frage 11 bezieht sich auf die Qualität der Bilder in den Arbeitsanweisungen. Hier ist aus den Ergebnissen herauszulesen, dass sich die Probanden überwiegend positiv zu den Fotos geäußert haben. Es ist eine positive Tendenz zu erkennen, wenngleich auch

die Streuung der Bewertung bis zur Mitte der Skala reicht. Entsprechend könnten die Fotos der Bauteile und Arbeitsschritte verbessert werden, was jedoch für die Bewertung des Konzepts der Montageablaufplan-GUI irrelevant ist. In dieser Untersuchung geht es um die technische Auslegung von herkömmlichen Papier-basierten Arbeitsanweisungen und nicht um die Qualität der beinhalteten Information. Dennoch wurde der Vollständigkeit halber auch diese abgefragt.

Frage 12 und 13 zielen auf die erfolgreiche Unterstützung des Werkers bei der Erfüllung seiner Montageaufgabe ab. Hier ist eindeutig zu erkennen, dass die Probanden nach ihrem Empfinden hervorragend unterstützt wurden (Beurteilung mit der höchst möglichen Stufe).

Bei Frage 14 bezüglich des zuvor eingeführten Fortschrittsbalkens waren sich die Probanden uneins über dessen Notwendigkeit. Dies begründet sich wohl im persönlichen Geschmack der Nutzer. Um dem zu entsprechen, ließe sich der Fortschrittsbalken z. B. über das Hauptmenü der Montageablaufplan-GUI zu- oder abschalten. Auf die erfolgreiche Durchführung der Montage hatte dieses Element jedoch keinen Einfluss.

Frageblock 3 dient zum Vergleich zwischen der Papier-basierten Arbeitsanweisung des Crash-Bobby und der digitalen Version dieses Montageablaufplans. Die Probanden hatten folgende Aussagen für den Vergleich zu bewerten:

Frage 15: *Die digitale Version des Crash-Bobby-Montageablaufplans ist übersichtlicher als die Papier-basierte Arbeitsanweisung.*

Frage 16: *Die Abfolge der Arbeitsschritte ist bei der Montageablaufplan-GUI besser strukturiert als bei der Papier-basierten.*

Frage 17: *Die Montage mit der digitalen Version benötigt wahrscheinlich weniger Zeit als mit der Papierversion.*

In Abbildung 5.17 sind die Evaluierungsergebnisse des dritten Frageblocks zu sehen. Zunächst wurde die Übersichtlichkeit der Montageablaufplan-GUI gegenüber der Papier-basierten Arbeitsanweisung bewertet. Die zugehörige Frage 15 hat hier im Schnitt sehr gute Ergebnisse erzielt: Median bei 8, nur ein Ausreißer bei 5, jedoch mit einer Tendenz zu besser (neutral wäre 4.5).

Auch die automatisch erzeugte Abfolge der Arbeitsschritte hat bei der Montageablaufplan-GUI überzeugt. Die Papier-basierte Arbeitsanweisung konnte hier nicht punkten: Median bei 7, nur ein Ausreißer bei 5.

Schließlich hatten die Probanden den subjektiven Eindruck, dass sie mit der digitalen

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

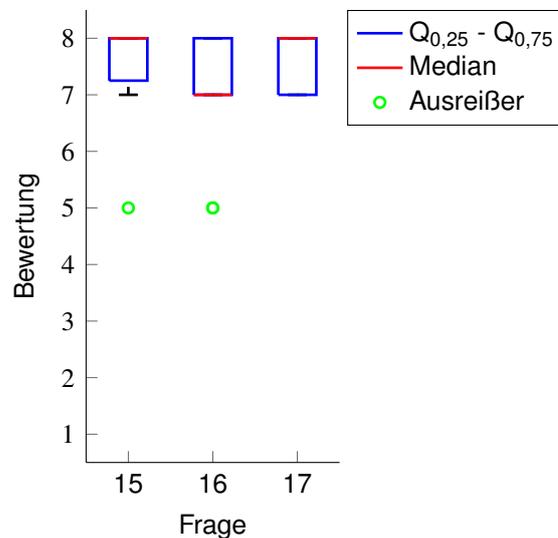


Abbildung 5.17: Ergebnisse des dritten Frageblocks - Diese Abbildung zeigt das Evaluierungsergebnis des Vergleichs zwischen Papier-basierter Arbeitsanweisung vs. Montageablaufplan-GUI zur Präsentation des Montageablaufplans des Crash-Bobby [92].

Version der Arbeitsanweisung weniger Zeit für die Montage des Crash-Bobby benötigen, als mit der Papier-basierten Version. Dies spiegelt sich beim Ergebnis zu Frage 17 wider. Alle Probanden werteten mit 7 oder 8, wobei der Median bei 8 liegt.

Frageblock 4 erlaubt den Probanden, allgemeine Aspekte der Montageablaufplan-GUI zu beurteilen. Die Aspekte konnten mittels folgender Aussagen beurteilt werden:

Frage 18: *Die dargebotenen Arbeitsanweisungen sind ausreichend, um die Montage erfolgreich abzuschließen.*

Frage 19: *Ich bevorzuge die Eingabe mit der Tastatur gegenüber der Bedienung mit der Maus.*

Frage 20: *Ich würde mir mehr / andere Eingabearten wünschen.*

Frage 21: *Ich würde die Montageablaufplan-GUI wieder verwenden.*

Frage 22: *Die GUI sollte automatisch den aktuellen Arbeitsschritt erkennen und die Arbeitsanweisung weiter schalten können.*

In Abbildung 5.18 sind die Evaluierungsergebnisse des vierten Frageblocks zu sehen. Alle Nutzer konnten mithilfe der Montageablaufplan-GUI ihre Aufgabe erfüllen. Dies

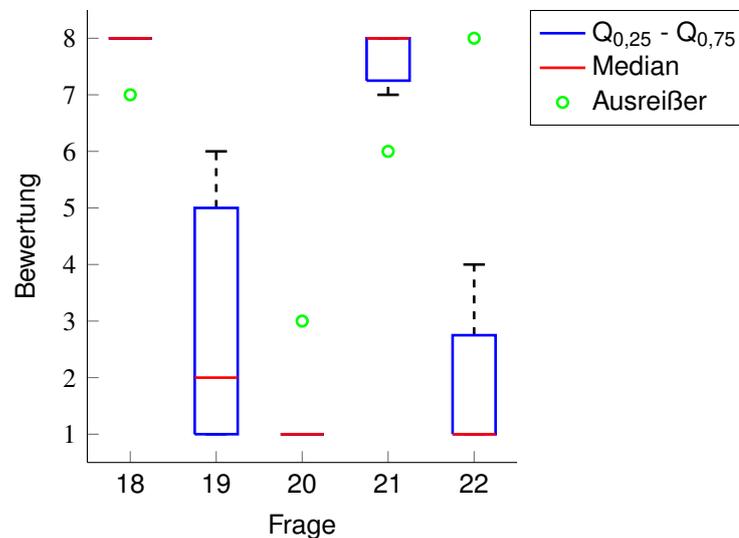


Abbildung 5.18: Ergebnisse des vierten Frageblocks - Beurteilung weiterer Aspekte der Montageablaufplan-GUI [92].

spiegelt sich in der Beantwortung der Frage 18 wider. Die Bestnote gaben zehn von elf Probanden für die Beantwortung der Frage, ob die angezeigten Arbeitsanweisungen ausreichend für den erfolgreichen Abschluss der Montage waren. Hier zeigt sich, dass das gewählte Konzept geeignet ist, das zu Grunde liegende Ziel der Assistenz in der manuellen Montage zu erreichen.

Die Frage nach der bevorzugten Eingabemodalität zeigte, dass die Probanden eher die Maus als die Tastatur verwendet haben. Da sich nur ein Proband vorstellen konnte, weitere Eingabemodalitäten zu verwenden (Frage 20 mit Bewertung 3), ist die Bedienung mit Maus ausreichend. Zehn von elf Probanden wünschen sich keine weiteren Modalitäten. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Probandenversuche war eine Bedienung von GUIs mit berührungssensitiven Bildschirmen im privaten Haushalt noch nicht weit verbreitet. So ließe sich erklären, weshalb auch kein Wunsch nach einer solchen Modalität geäußert wurde.

Die Erfahrungen, die die Nutzer mit der Montageablaufplan-GUI gesammelt hatten, waren ebenfalls so gut, dass sie sich eine weitere Benutzung dieses Systems vorstellen konnten. Dieses Ergebnis zeigt sich in Frage 21 mit einer durchwegs positiven Bewertung.

Die Frage nach einer automatischen Weiterschaltung der Arbeitsanweisung wurde in Frage 22 eher zurückhaltend bewertet. Bis auf einen Ausreißer (Bewertung 8) stimmten die Probanden im unteren Bereich ab (Median bei 1). Analog zum Vorversuch kann

angenommen werden, dass sich die Probanden nur schwer vorstellen konnten, wie ein solches System funktionieren würde. Wie bereits beschrieben, war diese Funktionalität zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung nicht integriert. Der Schwerpunkt der Evaluierung lag auf dem Entwurf der GUI, nicht auf der Arbeitsschritterkennung (vgl. Kapitel 4). Entsprechend kann diese Aussage an dieser Stelle vernachlässigt werden.

5.2.4 Fazit

In diesem Abschnitt wurde das Konzept der Montageablaufplan-GUI detailliert beschrieben. Die Grundstruktur beinhaltet ein Hauptmenü, ein Kontext-abhängiges Menü zur Auswahl der Darstellungstiefe der Arbeitsanweisungen, sowie einen Hauptbereich, der die eigentliche Assistenzinformation beinhaltet. Dieses Konzept wurde implementiert und in einem ersten Prototyp evaluiert. Nach Auswertung des Vorversuchs mittels Berechnung des RSU_{GUIpre} konnte bereits eine gute Usability erreicht werden. Die dabei gewonnene Rückmeldung der Nutzer wurde verwendet, um den GUI-Demonstrator zu verbessern.

Anschließend wurde die GUI erneut in Probandenversuchen evaluiert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die VPs die digitale Arbeitsanweisung in Form der Montageablaufplan-GUI einer Papier-basierten vorziehen. Die einfache Navigation durch den Montageablaufplan mittels Schaltflächen zur Vorwärts-Rückwärts-Navigation konnte die Probanden überzeugen. Dies konnte durch Bestimmung des RSU_{GUIfl} belegt werden, da der Wert der Usability von *gut* im Vorversuch auf *exzellent* gesteigert werden konnte. Ferner hat sich gezeigt, dass das entwickelte GUI-Konzept geeignet ist, einen Werker bei der Durchführung seiner Montageaufgabe zu unterstützen.

Das zu Grunde liegende Ziel der Assistenz in der manuellen Montage konnte somit erreicht werden. Die Evolutionsstufe vom Papier auf den Monitor wurde subjektiv durch die Probanden als gelungen beurteilt. Die Repräsentation der Montageablaufpläne mittels GUI konnte erfolgreich umgesetzt und getestet werden.

5.3 Kontaktanaloge Visualisierung von Montageablaufplänen

Die in Abschnitt 5.2 diskutierte Montageablaufplan-GUI verfügt über einen Bildschirm, der zur Interaktion mit dem Werker verwendet wird. Der Werker muss seinen Blick vom Arbeitsbereich abwenden, um die aktuelle Arbeitsanweisung vom Monitor ablesen zu können. Damit einher gehend erscheint es logisch, dass eine Visualisierung mit

direkter Anzeige der Arbeitsanweisung im Sichtbereich des Werkers eine sinnvolle Ergänzung für einen solchen Arbeitsplatz darstellt. Eine Untersuchung von Stoessel et al. in [69] hat ergeben, dass eine Anzeige der Informationen auf einer Arbeitsfläche am manuellen Arbeitsplatz bei ihrem Experiment eine Verbesserung der Effizienz in der manuellen Montage ergeben hatte. In diesem Abschnitt wird das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Konzept zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen beschrieben.

5.3.1 Visualisierungskonzepte

Bei dem im folgenden beschriebenen Konzept zur Präsentation von Arbeitsanweisungen stand im Vordergrund, generelle Gestaltungsmöglichkeiten zu entwickeln und diese in einem Probandenversuch auf Anwendbarkeit zu untersuchen. Die beteiligten Komponenten sollen leicht austauschbar und flexibel in einen bestehenden Aufbau integrierbar sein. Die Nachrüstbarkeit und Austauschbarkeit ist dem dieser Dissertation zu Grunde liegenden Konzept der Modularität geschuldet. Es sollen Informationen direkt in den Arbeitsbereich des Werkers eingebracht werden. Da dies nicht-invasiv erfolgen soll, wurde von am Körper getragenen Komponenten, wie z. B. HMDs, Abstand genommen. Entsprechend ist der Arbeitsplatz des Werkers so auszurüsten, dass eine Anzeige von Informationen möglich wird. Als Ort der Darstellung ist die Tischebene des Arbeitsplatzes ausgewählt worden. Hier befinden sich die zu verwendenden Bauteile. Somit wird der Blick des Werkers meistens auf diesen Bereich seines Arbeitsplatzes gerichtet sein.

Damit eine Anzeige von Arbeitsanweisungen auf dem Arbeitstisch möglich ist, sind zwei Methoden denkbar. Die erste Methode ist die Ausstattung der Arbeitsfläche mit einem großen Monitor. Das Display muss bei dieser Methode liegend unter der Arbeitsfläche montiert werden. Damit zeigt die Normale der Monitorebene senkrecht nach oben. Die Arbeit müsste der Werker bei dieser Installation auf dem Monitor vornehmen. Dies ist jedoch wenig praktikabel, da Geräte mit genügend großer Diagonale (der Fläche, die dem Arbeitsbereich entspricht) vergleichsweise schwer sind. Ferner eignet sich die Monitoroberfläche eines herkömmlichen LCD- oder LED-Displays nicht als Arbeitsfläche für Montagetätigkeiten. Eine Abwandlung dieses Ansatzes ist die Aufbringung einer Glasschicht, die als Arbeitsfläche dient. Diese Methode bietet zwar die Möglichkeit, ein solches Display als Arbeitsfläche zu verwenden, jedoch wird die Berücksichtigung der Eigenschaft der Nachrüstbarkeit bei diesem Ansatz erschwert. Es müsste die Arbeitsfläche der Arbeitsstation durch einen genügend großen Monitor mit robuster Glasfläche ersetzt werden, was einem hohen Aufwand entspricht.

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Die zweite Möglichkeit ist die Erweiterung des Arbeitsplatzes der manuellen Montage durch einen Beamer. Dieser projiziert die darzustellenden Information direkt auf die Oberfläche. Damit dieser Ansatz kontaktanalog funktionieren kann, ist sinnvoller Weise die Beleuchtung der Tischebene des Arbeitsplatzes vorzunehmen. Unter dem Begriff *kontaktanalog* wird im Rahmen dieser Dissertation die Integration von anzuzeigenden Objekten direkt in die umgebene Szenerie verstanden. Dadurch entsteht der Effekt des Verschmelzens der Elemente mit der Umwelt (nach [65]). Um diese Anzeigemöglichkeit zu verwenden, muss der Beamer über dem Arbeitsplatz montiert werden. Die Projektionsrichtung ist hierbei von oben nach unten gerichtet. So wird die Ausnutzung der Tischebene als Projektionsfläche gewährleistet.

Mit diesem Aufbau ist zusätzlich zur Visualisierung von Informationen eine Beleuchtung von Objekten auf der Arbeitsfläche von oben möglich. Der Beamer kann als Lichtquelle für feste oder flexible Orte auf der Tischebene verwendet werden. Stellt man sich ein Bild vor, das nur an spezifischer Position weiße Pixel enthält, so wird diese Stelle mit dem Beamer mit weißem Licht angestrahlt. Bei dieser Versuchsanordnung bedeutet dies im Fall des manuellen Arbeitsplatzes eine Beleuchtung der Tischebene an der zu diesen Pixeln gehörenden Position in der Bildebene. Befindet sich ein Objekt an eben dieser Position, so kann dieses Objekt beleuchtet werden. So ließe sich Assistenz mittels *Pick-by-Light* [70] realisieren. *Pick-by-Light* wird z. B. beim Kommissionieren von zu verpackenden Gütern verwendet. Regale sind hierbei mit LEDs o. ä. ausgerüstet. Soll nun ein bestimmtes Gut aus einem bestimmten Fach vom Werker gegriffen werden, so wird dies durch Aufleuchten des Lämpchens am zugehörigen Fach signalisiert. Der Werker muss so nicht die Bezeichnungen auf den Fächern lesen. Er muss nur die Lichtsignale beachten. Im Kontext dieser Dissertation wird eine Abwandlung dieses Lichtsignals realisiert. Hier wird das für den aktuellen Arbeitsschritt relevante Bauteil mit dem Beamer angeleuchtet oder optisch hervorgehoben. Diese Hervorhebung wird im Folgenden auch mit dem Begriff *kontaktanaloge Beleuchtung* bezeichnet.

Durch die Anbringung eines Beamers oberhalb des manuellen Arbeitsplatzes sind kaum Anpassungen an bestehenden Aufbauten notwendig. Die Überkopf-Anordnung der Projektionseinheit kann einfach nachträglich in die Arbeitsstation eingebracht werden. Verfügt der verwendete Beamer über eine genügend große Darstellungsebene bei gewählter Entfernung von der Arbeitsplatte, so ist es möglich, eine flexible Anzeige im Arbeitsbereich zu realisieren. Deckt der Beamer den gesamten Bereich ab, kann die freie Fläche für die Darstellung von Assistenzinformationen genutzt werden.

Im Kontext dieser Dissertation ist die kontaktanaloge Darstellung von Arbeitsanweisungen die nächste Evolutionsstufe der technischen Abbildung einer Arbeitsanwei-

sung. In Abschnitt 5.2 wurde bereits beschrieben, wie Arbeitsanweisungen auf einem Monitor angezeigt werden können. Die kontaktanaloge Darstellung erfordert dabei weitere Anpassungen an die nun per Projektion erfolgende Darstellung. Es wurden drei Konzepte entwickelt und evaluiert. Zur Erklärung dieser Konzepte dient das schema-



Abbildung 5.19: Schematisches Produkt - Diese Abbildung zeigt ein schematisches Produkt anhand dem die Beschreibung der entwickelten kontaktanalogen Visualisierungskonzepte vorgenommen wird.

tische Produkt aus Abbildung 5.19 und wird im Folgenden in den Konzeptentwürfen verwendet. Dieses Produkt besteht aus einer Basisplatte (grau) und drei geometrischen Objekten (gelb). Diese Objekte sind auf der Basisplatte angebracht.

5.3.1.1 Context-Bubble

Das erste Konzept zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen ist die Context-Bubble. Dieses Anzeigekonzept wurde von Googles Image Swirl [71] inspiriert. Die Idee hierbei ist, verknüpfte Information im Umfeld des sich momentan im Fokus der Betrachtung befindenden Objektes darzustellen. Jing et al. beschreiben in [72] die Funktionsweise dieses Systems. Das System verwendet die 200000 beliebtesten Anfragen an die Google Bildersuche. Basierend auf einer Anfrage extrahiert das System Merkmale aus den Bildinhalten wie z. B. Farbe, Form, Gesichter und Bild-Metadaten aus einer Auswahl von Treffern im Suchergebnis. Diese Treffer werden anschließend vom Algorithmus mittels paarweisem Vergleich hierarchisch gruppiert und in einer Baumstruktur abgebildet. Eine dynamische Web-basierte Benutzeroberfläche ermöglicht es dem Benutzer, innerhalb dieser hierarchischen Baumstruktur zu navigieren. Durch die vorgenommene Gruppierung kann der Nutzer sich schnell einen Überblick über die verschiedenen Ergebnisse verschaffen. Abbildung 5.20 zeigt diese Visualisierung am Beispiel des Suchbegriffs „golden gate bridge“. Je Ast sind in dieser Darstellungsform die extrahierten Merkmalen in Gruppen gegliedert. Bewegt sich der Nutzer auf einem Ast weiter, würde die Selektion in das Zentrum der Visualisierung rücken. Ausgehend davon würde ein neuer Baum erzeugt und dargestellt werden.

Die Visualisierung von mit einem Referenzdatum verknüpften Daten kreisförmig angeordnet um die Referenz bei der Aufbereitung von Suchergebnissen von Bildern in

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

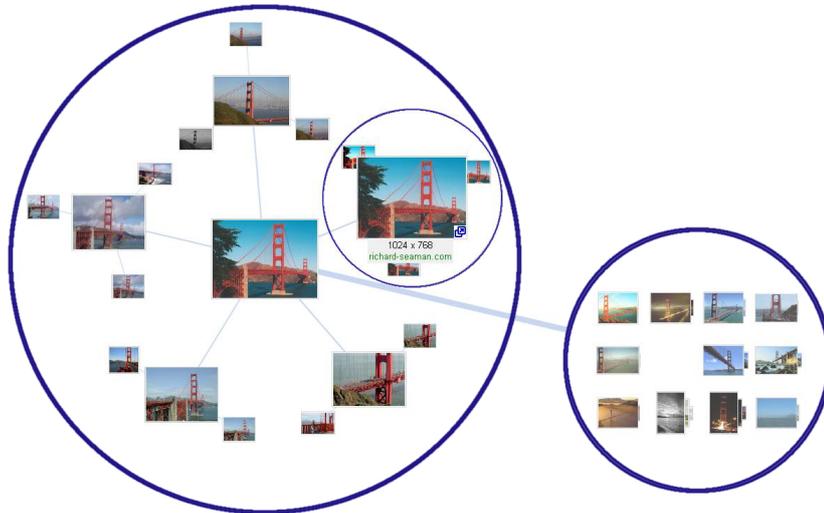


Abbildung 5.20: Google Image Swirl - Diese Abbildung zeigt das mittels Google Image Swirl aufbereitete Suchergebnis zu „golden gate bridge“ [73].

Google Image Swirl [71] dient als Grundlage zum entwickelten Konzept der Context-Bubble. Bei Montageablaufplänen befindet sich der aktuelle Montagezustand des Produkts im Zentrum der Betrachtung. Ausgehend davon soll der Werker Assistenzinformationen erhalten, die angeben, welche weiteren Arbeitsschritte durchzuführen sind. Die fehlenden Bauteile entsprechen also den Ästen der Baumdarstellung der Arbeitsanweisung. Dies ist analog zu den Kategorien der Bildersuche bei Google Image Swirl zu verstehen. Somit befindet sich, bezogen auf die Arbeitsanweisungen, die gerade zu montierende Baugruppe im Mittelpunkt dieser Visualisierung und die Anzeige wird ausgehend vom aktuellen Kontext (engl. *context*) erzeugt. Übertragen auf den vorliegenden Anwendungsfall entspricht dieser Kontext der aktuell bearbeiteten Baugruppe.

Bestimmt durch den aktuellen Montagezustand der Baugruppe werden die für die nächsten Arbeitsschritte benötigten Bauteile kreisförmig um die Baugruppe herum angezeigt. Diese Darstellungsform der benötigten Bauteile erinnert an Seifenblasen (engl. *bubble*). Betrachtet man eine Werkzeugwand in der industriellen Produktion, so findet man häufig Konturzeichnungen, die die Sollposition von Werkzeugen angeben. Dies wird auch als *Schattenarbeitsplatz* bezeichnet. Abbildung 5.21 zeigt ein Beispiel mit der Belegung einer Werkzeugwand und den zugehörigen Konturen. Im Hintergrund befinden sich die passenden Konturzeichnungen zu den zugeordneten Werkzeugen. Dazu wird der Umriss der Werkzeuge an den zugeordneten Lagerorten mit schwarzer Farbe angebracht. Die Form des fehlenden Brecheisens ist mit einer schwarzen Linie eingezeichnet. Mit diesem Schattenarbeitsplatz kann der Werker schnell erkennen, wo



Abbildung 5.21: Belegung einer Werkzeugwand - In dieser Abbildung ist die Belegung einer Werkzeugwand an einem Schattenarbeitsplatz als Grundlage für das Design zur Context-Bubble zu sehen. Im Hintergrund befinden sich die passenden Konturzeichnungen zu den zugeordneten Werkzeugen. Eigenes Foto aufgenommen bei Transtechnik Bahntechnik (Büchlberg, Bayern, Deutschland).

das verwendete Werkzeug zu lagern ist. Dieses Konzept dient als weitere Inspiration für die Darstellung der Context-Bubble.

Abbildung 5.22 zeigt eine schematische Darstellung des Konzepts der Context-Bubble. Auf dem Arbeitstisch befinden sich alle Bauteile, die zur Montage des Produkts (vgl. Abbildung 5.19) benötigt werden. Die Quantität der benötigten Bauteile ist hier nicht berücksichtigt. In der aktuellen Ansicht arbeitet der Werker an der Baugruppe unten links. Wie zu sehen ist, benötigt der Werker noch das rautenförmige und das runde Bauteil. Ausgehend vom aktuellen Montagezustand wird dies durch Einblenden der fehlenden Bauteile in grüner Farbe visualisiert. Innerhalb dieser grünen Regionen kann der Werker selbständig seine Bauteile vorkonfektionieren. Damit der Werker weiß, was er zu bauen hat, wird hier zusätzlich der Zielzustand der Baugruppe angezeigt. Dieser ist über der „realen“ Baugruppe innerhalb eines blauen Rahmens eingezeichnet. Die Anzeige erfolgt bei diesem Konzept kontaktanalog am Ort der bearbeiteten Baugruppe. Der Werker erhält bei diesem Anzeigekonzept stets die Information über die Bauteile, die er noch zur Vervollständigung seiner Montagetätigkeit benötigt.

Bei dieser Art der Visualisierung von Arbeitsanweisungen bekommt der Werker nur die Information, die zum Beenden des aktuellen Arbeitsschritts notwendig ist. Im Vergleich zur herkömmlichen Arbeitsanweisungen in Papierform ist bei dem vorgestellten Konzept die dargebotene Information auf das Wesentliche reduziert. Die örtliche Anordnung der angezeigten zu verbauenden Bauteile resultiert von Googles Image Swirl, die Vorkonfektionierung der Bauteile auf dem Tisch vom Schattenarbeitsplatz. Mit der Context-Bubble wird der Schritt vom Monitor auf die kontaktanaloge Anzeige

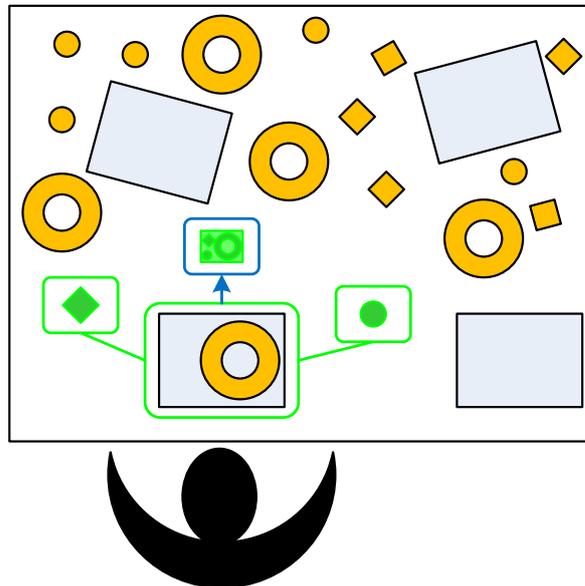


Abbildung 5.22: Anzeigekonzept Context-Bubble - Auf dem Arbeitstisch befinden sich verschiedene Bauteile. Die vom Werker aktuell bearbeitete Baugruppe befindet sich links unten. In grün werden um diese Baugruppe herum die noch fehlenden Bauteile angezeigt, die für das Erreichen des Zielzustands der Baugruppe noch verbaut werden müssen (Bild im blauen Rahmen).

innerhalb der Arbeitsfläche realisiert.

5.3.1.2 Kontaktanaloges Pick-by-Light

Die vorgestellte Context-Bubble blendet relevante Informationen zum aktuellen Arbeitsschritt direkt in den Arbeitsbereich des Werkers ein. Im Gegensatz zur Verwendung eines Monitors muss der Werker so seinen Blick nicht von der Baugruppe nehmen. Der nächste Schritt in der Entwicklung eines Assistenzsystems für die manuelle Montage ist die Anreicherung der kontaktanalogen Anzeige mit Assistenzinformationen zusätzlich zur Arbeitsanweisung. Mit dieser Assistenzinformation soll der Werker bei der Erfüllung seiner Aufgabe unterstützt werden. Zur Realisierung dieser Vorgabe wurde das Konzept der Context-Bubble um eine unterstützende Komponente erweitert. Der Werker bekommt vom System die Bauteile angezeigt, die er für den aktuellen Arbeitsschritt benötigt. Dies wurde bei der Context-Bubble mit der kreisförmigen Anordnung der korrespondierenden Bilder erreicht. Eine Möglichkeit, den Werker nun zu unterstützen, ist es, ihm bei der Suche nach den richtigen Bauteilen zu

helfen. Pick-by-Light ist eine Variante, bei welcher durch Lichtzeichen die Aufmerksamkeit auf relevante Bereiche des Arbeitsplatzes gelenkt wird. Diese Lichtzeichen sind in der Regel ortsfeste Lampen, die meist an Regalen angebracht sind, und sollen z. B. beim Kommissionieren und Verpacken von Bestellungen helfen [70].

Der Arbeitsplatz des Werkers soll flexibel sein. Somit sind fest installierte Lichtsignale keine praktikable Lösung. Eine Alternative zu Lampen ist das aktive Anleuchten der Bauteile mittels des Beamers. Der Beamer befindet sich über der Arbeitsfläche und kann somit als Lichtquelle verwendet werden. Mit diesem Vorgehen ist es möglich, eine kontaktanaloge Hervorhebung zu erzeugen, also ein Konzept für kontaktanaloges Pick-by-Light. Abbildung 5.23 zeigt die schematische Darstellung dieses Konzepts. Auf dem abgebildeten Arbeitstisch befinden sich verschiedene Bauteile. Die vom Wer-

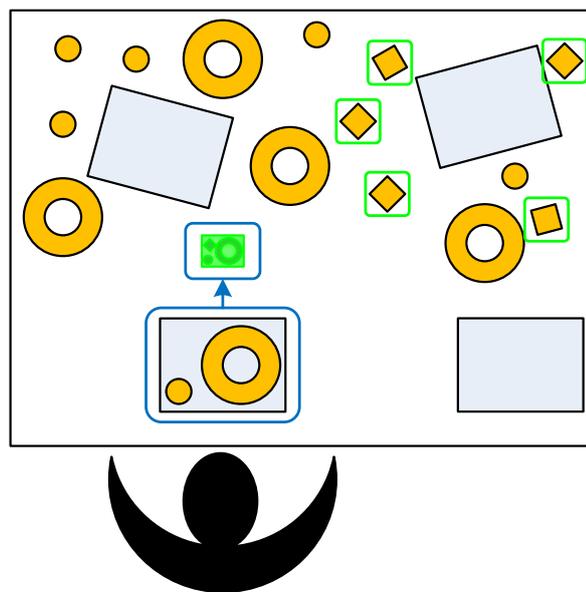


Abbildung 5.23: Anzeigekonzept kontaktanaloges Pick-by-Light - Auf dem Arbeitstisch befinden sich verschieden Bauteile. Die vom Werker aktuell bearbeitete Baugruppe befindet sich links unten (blau eingerahmt). Darüber wird der Zielzustand der Baugruppe angezeigt (grünes Bild im blauen Rahmen). Die verwendbaren Bauteile zur Vervollständigung der Baugruppe werden mit grünen Rahmen hervorgehoben.

ker aktuell bearbeitete Baugruppe befindet sich links unten (blau eingerahmt). Darüber wird der vom Werker herzustellende Zielzustand der Baugruppe mittels Beamer angezeigt. In diesem Beispiel ist dies mithilfe des grünen Bildes im blauen Rahmen dargestellt. Die Bauteile, die dazu erforderlich sind, werden mittels grünen Rahmen

hervorgehoben. Da die Bauteile nicht ortsfest sind, erfolgt die Hervorhebung kontaktanalog.

5.3.1.3 Visual Guidance

In den zuvor besprochenen Konzepten wurde im ersten Schritt die Anzeige der Arbeitsanweisung vom Monitor auf die Arbeitsfläche übergeführt. Beim zweiten Konzept wurde diese Anzeige mit einer Komponente zur visuellen Hervorhebungen von benötigten Bauteilen erweitert. Die nächste Evolutionsstufe bei der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen ist die visuell geführte Montageunterstützung des Werkers. Dazu wird wiederum die Möglichkeit der kontaktanalogen Darstellung von Informationen verwendet. Im Unterschied zu den bisher erläuterten Anzeigekonzepten ist das in diesem Abschnitt beschriebene noch um eine kontaktanaloge Anzeige des zu erreichenden Zielzustands der aktuell bearbeiteten Baugruppe erweitert. Bei den Konzepten Context-Bubble und kontaktanaloges Pick-by-Light wurde der zu erreichende Zielzustand mit dem zugehörigen Bild in der Nähe des Arbeitsbereichs dargestellt. In Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23 ist dies mit der in grün gezeichneten Grafik oberhalb der Baugruppe dargestellt. Bei diesem Ansatz wird der Werker Arbeitsschritt für Arbeitsschritt durch den Montageablaufplan geleitet. Dies wird durch visuelle Unterstützung (engl. *Visual Guidance*) des Werkers erreicht. Bei den in den vorigen Abschnitten vorgestellten Konzepten musste der Werker die benötigten Bauteile selbst suchen. Wird hier eine Unterstützung vom Assistenzsystem integriert, kann dadurch die Arbeit erleichtert werden. Betrachtet man den flexiblen Arbeitstisch, so befinden sich Bauteile gleichen Typs an nicht vorher bestimmten Positionen verteilt auf der Arbeitsfläche. Relevant ist je Arbeitsschritt jedoch nur eines davon. Beim Konzept der Visual Guidance wird nun nur das benötigte Bauteil hervorgehoben.

Poitschke beschreibt in [74] wie mittels eines Lichtpunkts die Aufmerksamkeit eines Nutzers auf relevante Bereiche einer GUI gelenkt werden kann. Diese graphische Aufmerksamkeitslenkung nutzt das Wissen über die Blickrichtung des Nutzers. Unter Voraussetzung der bekannten Blickrichtung des Nutzers kann so bestimmt werden, auf welchen Bereich einer GUI der Nutzer gerade seine Aufmerksamkeit gerichtet hat. Soll nun diese Aufmerksamkeit auf einen anderen Bereich gelenkt werden, so wird ein kleiner Führungspunkt auf der Anzeige eingeblendet [75]. Dabei wird darauf geachtet, dass der Führungspunkt immer in Richtung des hervorzuhebenden wichtigen Bereichs versetzt ist, der betrachtet werden soll. Ändert der Nutzer nun seine Blickrichtung zum Führungspunkt hin, so wird der Führungspunkt weiter verschoben. Dadurch kann der Blick gelenkt werden. Die Augen des Nutzers versuchen diesen Punkt

im Zentrum ihres Sichtfeldes zu fokussieren. Da sich jedoch der Punkt immer vom Zentrum des Sichtfeldes weg bewegt, gelingt diese Fokussierung nicht und der Blick folgt der Bewegung des Führungspunktes. Man kann also durch Anzeige eines Punktes die Blickrichtung des Nutzers beeinflussen.

Bei der Visual Guidance erfolgt die Hervorhebung des im aktuellen Arbeitsschritt benötigten Bauteiles mit einer ähnlichen Methode, wie mit dem zuvor beschriebenen optischen Führungspunkt. Zusätzlich dazu wird die Darstellung des zu erreichenden Zielzustands der bearbeiteten Baugruppe kontaktanalog eingeblendet. Abbildung 5.24 zeigt die schematische Darstellung dieses Konzepts innerhalb eines Arbeitsschritts. Im

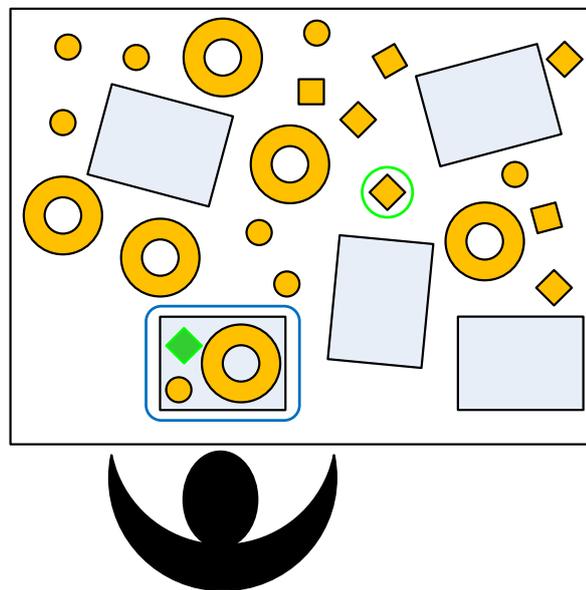


Abbildung 5.24: Anzeigekonzept Visual Guidance - Auf dem Arbeitstisch befinden sich mehrere Bauteile. Die vom Werker aktuell bearbeitete Baugruppe befindet sich links unten (blau eingerahmt). Der zu erreichende Zielzustand im aktuellen Arbeitsschritt wird kontaktanalog auf der Baugruppe angezeigt (grünes Bild auf Baugruppe). Das zu verwendende Bauteile für den nächsten Arbeitsschritt ist mit einem grünen Rahmen eingekreist.

dargestellten Beispiel befinden sich auf dem Arbeitstisch mehrere Bauteile gleichen Typs. Der Werker arbeitet hier im linken unteren Bereich des Arbeitstisches. Die Baugruppe befindet sich im blau eingerahmten Bereich. Die zugehörige Arbeitsanweisung zum aktuellen Arbeitsschritt wird kontaktanalog auf der Baugruppe angezeigt. Dazu wird mit dem Beamer die Silhouette des nächsten zu verwendenden Bauteils an der korrespondierenden Montageposition eingeblendet (grüne Raute auf Baugruppe). Das zu verwendende Bauteile für diesen Arbeitsschritt wird mit einem grünen Rahmen

eingekreist. Analog zum zuvor beschriebenen Verfahren des Führungspunkts wird die Aufmerksamkeit des Werkers somit gelenkt, jedoch bewegt sich der Rahmen im Vergleich zum Ansatz von Poitschke [74] nicht. Hier wurde auf die örtliche Beleuchtung des Bauteils im Sinne von Pick-by-Light Wert gelegt, da der angezeigte Rahmen ortsfest das Bauteil beinhaltet und der Werker so keine Zeit bei der Auswahl des richtigen Bauteils benötigt. Wie zu sehen ist, gibt es in diesem Beispiel mehrere Bauteile gleichen Typs. Aus Gründen der Effizienz erfolgt die Auswahl des beleuchteten Bauteils nach einer einfachen Regel: Es wird das Bauteil angeleuchtet, das dem Werker am nächsten liegt.

5.3.2 Technische Realisierung der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen

Die in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Konzepte zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen wurden im Rahmen dieser Dissertation implementiert. Im Folgenden wird die technische Realisierung dieser Konzepte und die anschließende Integration in ein Montageanzeigesystem erläutert.

5.3.2.1 Versuchsaufbau

Über dem Arbeitstisch ist der Beamer befestigt. Abbildung 5.25 zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaus dieser Beamer-Installation. Ferner ist die perspektivische Darstellung der Oberfläche eines Arbeitsplatzes zu sehen. Exemplarisch sind auf dem in grau abgebildeten Arbeitstisch einige Bauteile (gelb) abgelegt. Oberhalb des Arbeitsplatzes ist der hängend installierte Beamer angedeutet. Die Projektionsrichtung ist dabei parallel zur Normalen der Tischebene ausgerichtet. In diesem Beispiel leuchtet der Beamer eines der rechteckigen Objekte an, was durch die grün eingefärbte Oberfläche visualisiert ist. Zusätzlich zum Beamer ist eine Webcam abgebildet. Diese symbolisiert die optische Überwachung des Arbeitsbereichs (vgl. Kapitel 4). Damit näher auf die Implementierung der Visualisierungskonzepte aus Abschnitt 5.3.1 eingegangen werden kann, ist es erforderlich, die bei dem gewählten Versuchsaufbau relevanten Koordinatensysteme zu diskutieren. Die Koordinatensysteme der Projektionsfläche und des Beamers sind in Abbildung 5.27 eingezeichnet. Damit eine kontaktanaloge Darstellung möglich ist, muss die Anzeige am richtigen Ort erfolgen. Die Lage des richtigen Orts wird mit der Berechnung der Koordinaten in den zugehörigen Koordinatensystemen und die jeweilige Umrechnung in die zugehörigen Koordinatensysteme bestimmt. Um die Position des Tisches in Relation zum Beamer zu finden,

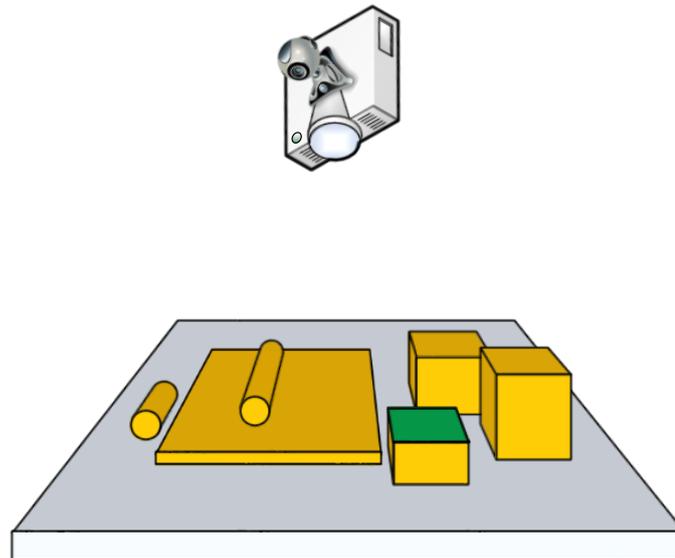


Abbildung 5.25: Versuchsaufbau zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen - In dieser Abbildung ist der schematische Aufbau der entwickelten kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen zu sehen. Exemplarisch sind einige Objekte (gelb) auf dem Arbeitstisch (grau) abgelegt. Eines dieser Objekte ist hier durch Beleuchtung mit dem Beamer hervorgehoben (grün eingefärbte Oberfläche).

wurde ebenfalls eine Kamera oberhalb des Beamers angebracht. Mit der optischen Rückkopplung über diesen Sensor wird die Anzeige zum Tisch kalibriert. Ferner kann der Nutzer des Systems im Livebild der Kamera nach erfolgreicher Kalibrierung und Umrechnung der Koordinaten Objekte auf der Arbeitsfläche selektieren, welche anschließend mit dem Beamer beleuchtet werden können.

5.3.2.2 Kalibrierung

Der mathematische Zusammenhang zwischen verschiedenen Koordinatensystemen wird mithilfe einer Kalibrierung bestimmt.

Kamera-Kalibrierung Der Ausgangspunkt der Kalibrierung für die kontaktanaloge Darstellung von Arbeitsanweisungen ist die Kamera. Das Thema der Kamera-Kalibrierung wurde bereits intensiv erforscht. In der Bildverarbeitung wird meist die Methode nach Zhang [76] verwendet. Generell sind die extrinsischen und intrinsischen Parameter der untersuchten Kamera zu ermitteln. Bedingt durch das Lochkammermodell erfolgt bei der Aufnahme einer 3D-Szene mittels einer Kamera die Projektion von

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Welt-Koordinaten in Kamera-Koordinaten. Durch die Kalibrierung werden die Werte bestimmt, die diese Projektion mathematisch beschreiben. Bei Verwendung homogener Koordinatendarstellung [77] kann diese Abbildung für eine 3D-Welt-Koordinate wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{array}{ccc} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} & \xrightarrow[\text{Parameter}]{\text{extrinsische}} & \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} & \xrightarrow[\text{Parameter}]{\text{intrinsische}} & \begin{bmatrix} x_K \\ y_K \\ 1 \end{bmatrix} \\ \text{Welt} & & & & \text{Kamera} \end{array}$$

Die extrinsischen Parameter beschreiben die Position der Kamera in einem gegebenen Welt-Koordinatensystem. Innerhalb der Kamera wird die Abbildung der Bildebene von Linse auf den Chip mittels der intrinsischen Parameter beschrieben. Wurde die Kalibrierung durchgeführt, sind diese Parameter bekannt. Unter Zuhilfenahme dieser Parameter können durch die Linse hervorgerufene Verzerrungseffekte entfernt werden. Das Ergebnis der Kamera-Kalibrierung ist ein verzerrungsfreies Aufnahmebild der kalibrierten Kamera. Um dieses Bild zu erhalten, wurde die Bildverarbeitungsbibliothek OpenCV¹ verwendet. In dieser frei verfügbaren Software-Bibliothek gibt es automatisierte Algorithmen, die aus einem Satz aufgenommener Bilder die Kameraparameter bestimmen. Führt man die in [78] angegebenen Schritte zur Kalibrierung durch, können die Kameraparameter damit angenähert werden. Mittels dieser Parameter können anschließend Aufnahmen entzerrt werden. In Abbildung 5.26 sind zwei Kamerabilder zu sehen. In der linken Abbildung ist ein unkalibriertes Kamerabild [78] zu sehen, in der rechten Abbildung ein entzerrtes Kamerabild [78]. Hier sind die Verzerrungseffekte der Kameraabbildung bereinigt. Dies lässt sich feststellen, indem man die Linien der beiden Schachbrettmuster vergleicht. Im entzerrten Bild sind diese gerade und rechtwinklig, was im Originalbild nicht der Fall ist. Außerdem sieht man am Rand des rechten Bildes die bereinigte Krümmung.

Mathematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen verschiedenen Koordinatensystemen Unter der Annahme, dass die Kamera senkrecht zur Tischebene montiert und kalibriert ist, erhält man ein geometrisch richtiges Abbild der 3D-Szene vom Arbeitsbereich des Werkers. Damit eine Zuordnung von Tisch-Koordinaten in Kamera-Koordinaten möglich ist, müssen die zugrundeliegenden Koordinatensysteme ineinander umgerechnet werden. Bei der gewählten homogenen Koordinatendarstellung entspricht dieser Vorgang einer Matrix-Vektor-Multiplikation. Abbildung 5.27 zeigt

¹<http://opencv.org>

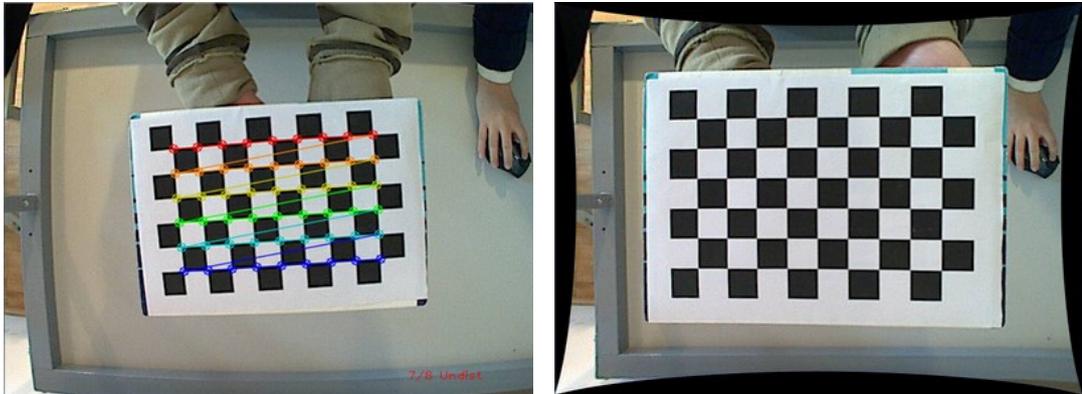


Abbildung 5.26: Beispielbild zur Kamera-Kalibrierung - Die erste Abbildung zeigt eine unkalibrierte Aufnahme eines Schachbrettmusters. Die zweite Abbildung zeigt ein kalibriertes Kamerabild. Hier sind Verzerrungseffekte der Kameraabbildung bereinigt [78].

die relevanten Koordinatensysteme für den Versuchsaufbau zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen. Es sind insgesamt vier Koordinatensysteme zu be-

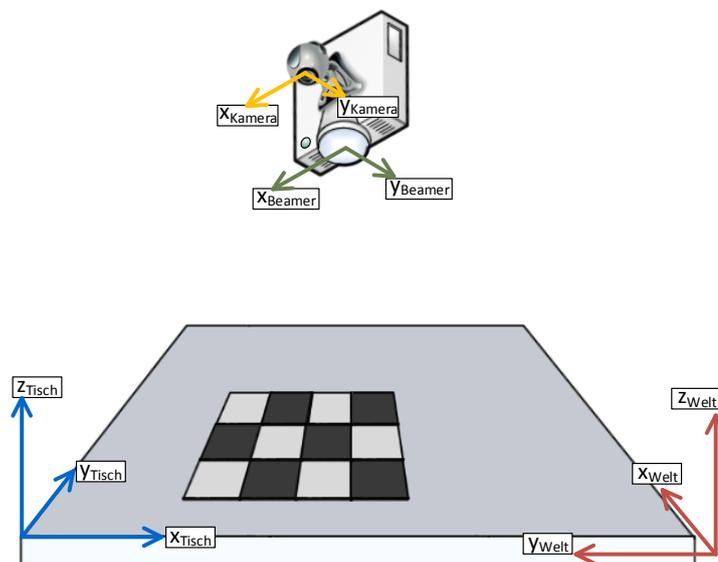


Abbildung 5.27: Koordinatensysteme im Versuchsaufbau - In dieser Abbildung sind die Koordinatensysteme der Komponenten für die kontaktanaloge Darstellung von Arbeitsanweisungen eingetragen. Ein Schachbrettmuster zur Kalibrierung der Koordinatensysteme ist ebenfalls zu sehen.

achten. Der gesamte Aufbau befindet sich an einer festen Position im Welt-Koordinatensystem. Dieses Welt-Koordinatensystem ist in Abbildung 5.27 mit roten Pfeilen

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

ingezeichnet. Das Welt-Koordinatensystem ist der Bezugspunkt aller anderen Koordinatensysteme. Durch Rotation und Translation kann dieses in das Tisch-Koordinatensystem (blaue Pfeile) umgerechnet werden. In homogenen Koordinaten kann dies wie folgt mathematisch beschrieben werden:

$$\vec{x}_W = [\mathbf{R} \cdot \mathbf{T}]_{WT} \cdot \vec{x}_T = \mathbf{A}_{WT} \cdot \vec{x}_T \quad (5.4)$$

Mit \mathbf{A}_{WT} ist in Gleichung (5.4) eine (4×4) -Transformationsmatrix \mathbf{A}_{ij} angegeben, die die Umrechnungsvorschrift von Welt- (Index $i = W$) in Tisch-Koordinaten (Index $j = T$) beinhaltet. Mit den Vektoren \vec{x}_i werden Koordinaten in den korrespondierenden Koordinatensystemen i repräsentiert. Im dargestellten Beispiel wäre das eine Translation (Matrix \mathbf{T}) des Ursprungs des Welt-Koordinatensystems in den Ursprung des Tisch-Koordinatensystems mit anschließender Rotation (Matrix \mathbf{R}) um die z -Achse des Tisch-Koordinatensystems. Zur Vereinfachung kann das Welt-Koordinatensystem mit dem Tisch-Koordinatensystem gleichgesetzt werden. Dazu muss die Lage der Kamera und des Beamers in Tisch-Koordinaten bestimmt werden.

Für die Bestimmung der Lage des Kamera-Koordinatensystems (gelbe Pfeile) wurde ein Marker-basierter Ansatz gewählt. Dazu wurde auf den Arbeitstisch ein AR-Marker gelegt. Zum Finden dieses Markers wurde das ARToolKit¹ eingesetzt. Diese freie Softwarebibliothek analysiert Kamerabilder und bestimmt die Position des AR-Markers. Abbildung 5.28 zeigt den verwendeten Marker. Die ARToolKit-Marker sind



Abbildung 5.28: AR-Marker - In dieser Abbildung ist der ARToolKit Marker *Hiro* zu sehen. Dieser wird für den Abgleich des Kamera-Koordinatensystems mit dem Tisch-Koordinatensystem verwendet.

rechteckig und haben einen schwarzen Rahmen. Innerhalb des Markers befinden sich eindeutige Muster. Diese Muster können sich voneinander unterscheiden. So können in einem Bild mehrere Marker gefunden und eindeutig zugeordnet werden. Die Dimension des Markers ist ebenfalls bekannt. So erlaubt es die Bibliothek, die 3D-Position der Kamera in Relation zum gefundenen Marker zu berechnen. Für weitere Details zur Funktionsweise kann Kato und Billinghurst [79] herangezogen werden.

¹<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit>

Als Ergebnis der Verarbeitungskette in ARToolKit erhält man die Transformationsmatrix, die diese Relation beschreibt. Es wird also die Matrix \mathbf{A}_{KM} mit der Beschreibung der Beziehung Kamera-zu-Marker berechnet. Legt man den Nullpunkt $\vec{0}_{\text{Marker}}$ des Markers in den Nullpunkt $\vec{0}_{\text{Tisch}}$ des Tisch-Koordinatensystems, so wird die Transformationsmatrix \mathbf{A}_{KT} direkt vom ARToolKit geliefert:

$$\mathbf{A}_{KM} \Big|_{\vec{0}_{\text{Tisch}} = \vec{0}_{\text{Marker}}} = \mathbf{A}_{KT} \quad (5.5)$$

Damit ist die Kamera (Index K) zum Tisch kalibriert. Objekten auf der Arbeitsfläche können nun im Kamerabild Tisch-Koordinaten zugeordnet werden.

Beamer-Kalibrierung Die noch fehlende mathematische Beschreibung der Koordinatensysteme ist die Beziehung zwischen Beamer-Koordinaten und Tisch-Koordinaten. Betrachtet man die Funktionsweise eines Beamers, so kann man diese im Allgemeinen als inverse Operation zur Kameraaufnahme betrachten. Eine Kamera erfasst eine 3D-Szene und erzeugt daraus ein digitales 2D-Abbild auf dem Kamerachip, was einer digitalen Abtastung entspricht. Bei der Beamer-Projektion wird ein digitales 2D-Bild per Lichtstrahlen auf eine Projektionsfläche (hier: der Arbeitstisch des Werkers) projiziert. Die Abbildungsvorschrift ist hier invers zu Kameraabtastung. Durch die Linse des Beamers werden die Lichtstrahlen ausgesendet. Verzerrungseffekte, wie sie bei der Kamera auftreten, können bei der hier geführten Betrachtung vernachlässigt werden, da aktuelle Geräte selbst über Entzerrungsfunktionen verfügen (Trapezkorrektur, etc.). Das Ausgabebild soll unverzerrt auf der Projektionsfläche auftreffen, was mit der geeigneten Einstellung des Beamers erreicht werden kann. Bei der Berechnung der Transformationsmatrix sind diese Effekte als bereits eliminiert anzunehmen. Formal sind die intrinsischen Beamer-Parameter damit als Einheitsmatrix zu setzen.

Die extrinsischen Parameter der Beamer-Projektion können analog zur Kamera-Kalibrierung bestimmt werden [80]. Dazu wird mit dem Beamer ein Schachbrettmuster auf die Arbeitsfläche projiziert. Unter der Voraussetzung, dass der Beamer ein entzerrtes Bild liefert, kann nun die Lage und die Abmessung dieses Musters auf der Tischebene gemessen werden. Mit diesen Daten lässt sich eine Koordinate \vec{x}_B im Beamer-Koordinatensystem (Index B) in das Tisch-Koordinatensystem umrechnen. Verwendet man drei Ecken des Schachbrettmusters, so kann mit diesen drei Koordinaten eine Ebene auf dem Arbeitstisch aufgespannt werden (Aufpunkt und Richtungsvektoren der Ebene) [81]. Die Ecke auf dem Schachbrett, die im Schnittpunkt der die Ebene aufspannenden Vektoren liegt, wird als Aufpunkt des Schachbretts festgelegt. Nun kann über das Koordinatensystem des Schachbretts (Index S) die Beziehung zwischen

Beamer-Koordinatensystem und Tisch-Koordinatensystem bestimmt werden. Die Beamer-Koordinaten des Schachbretts sind bekannt, da das Muster mit dem Beamer erzeugt wird:

$$\vec{x}_B = \mathbf{A}_{BS} \cdot \vec{x}_S \quad (5.6)$$

Wurde die Lage des Schachbretts auf dem Tisch bestimmt, so gilt für die Umrechnung eines Punktes \vec{x}_T im Tisch-Koordinatensystem in das Koordinatensystem des Schachbrettmusters der mathematische Zusammenhang

$$\vec{x}_S = \mathbf{A}_{ST} \cdot \vec{x}_T \quad (5.7)$$

Wird Gleichung (5.7) in Gleichung (5.6) eingesetzt, so erhält man damit die Beschreibung

$$\vec{x}_B = \mathbf{A}_{BS} \cdot \mathbf{A}_{ST} \cdot \vec{x}_T = \mathbf{A}_{BT} \cdot \vec{x}_T \quad (5.8)$$

für die Abbildungsvorschrift Beamer-Koordinatensystem in das Tisch-Koordinatensystem. Damit ist das Koordinatensystem des Schachbrettmusters aus den Gleichungen entfernt worden.

Setzt man nun alle Berechnungen zusammen, so kann die Transformationsmatrix für die Beziehung zwischen Kamera-Koordinatensystem und Beamer-Koordinatensystem berechnet werden:

$$\vec{x}_K = \mathbf{A}_{KT} \cdot \mathbf{A}_{TB} \cdot \vec{x}_B = \mathbf{A}_{KB} \cdot \vec{x}_B \quad (5.9)$$

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die inverse Berechnung der Transformationsmatrizen durch die Wahl des homogenen Koordinatensystems die Invertierung der bekannten Transformationsmatrizen bedeutet:

$$\mathbf{A}_{ji} = \mathbf{A}_{ij}^{-1} \quad (5.10)$$

So können Koordinaten von einem Koordinatensystem in ein anderes umgerechnet werden. Die Rückrechnung erfolgt analog nach Gleichung (5.10). Die Indizes i und j sind als Platzhalter für die jeweiligen Bezeichnungen der beteiligten Koordinatensysteme zu verstehen.

5.3.2.3 Realisierung der Konzepte

Mit den in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahren zur Kalibrierung und Umrechnung der relevanten Koordinatensysteme können nun die Konzepte zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen realisiert werden. Dazu wurde ein Demonstrator eingerichtet. Dieser wurde anschließend unter Laborbedingungen in Probandenversuchen evaluiert. Aus Gründen der einfachen Handhabbarkeit von zu montierenden

Produkten wurde als Baumaterial LEGO¹ verwendet. Mit diesen Bauteilen können unterschiedliche Formen und abstrakte Produkte erzeugt werden. Abbildung 5.29 zeigt den Aufbau des Demonstrators zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen. Der Arbeitsplatz ist in dieser Abbildung bereits mit LEGO-Bauteilen ausge-



Abbildung 5.29: Demonstrator zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen - In dieser Abbildung ist der Arbeitsplatz am Demonstrator zu sehen. Oberhalb der Arbeitsfläche ist ein Beamer montiert.

stattet. Oberhalb der Arbeitsfläche ist der Beamer montiert (außerhalb der Abbildung). Als Produkt wird hier je Konzept eine abstrakte Struktur aus LEGO-Steinen verwendet. LEGO eignet sich hervorragend, um unterschiedliche Strukturen aus wenigen verschiedenen Basisteilen herzustellen.

Im Schwerpunkt dieses Abschnitts wird die kontaktanaloge Visualisierung von Montageablaufplänen behandelt. Die visualisierte Assistenzinformation zu den durchzuführenden Arbeitsschritten soll intuitiv und verständlich präsentiert werden. Der Werker soll möglichst wenig Zeit benötigen, um die dargestellte Arbeitsanweisung interpretieren zu können. Um die VPs dazu zu verleiten, die präsentierte Arbeitsanweisung als Basis für ihr Handeln zu verwenden, muss das herzustellende Produkt abstrakt sein. Die Verwendung einer Struktur, die man aus dem alltäglichen Leben bereits kennt, könnte dazu führen, dass die VP nur zu Beginn die präsentierte Arbeitsanweisung benötigt und die anschließenden Arbeitsschritte mit dem Wissen aus der eigenen Erfahrung durchführt. Damit kann es mitunter schwierig werden, die Anzeige

¹<http://www.lego.com/de-de>

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

der Arbeitsanweisung evaluieren zu lassen. Um dem entgegen zu wirken, wurde ein abstraktes Konstrukt aus LEGO als Produkt gewählt. Somit sind die VPs größtenteils auf eine angezeigte Arbeitsanweisung angewiesen, um ihre Montageaufgabe erfolgreich durchführen zu können. Die zu fertigenden abstrakten Konstrukte werden auf einem Baugruppenträger angebracht. Dieser ist die große blaue Basisplatte in Abbildung 5.29 rechts unten auf der Arbeitsfläche.

In diesem Abschnitt wird die Implementierung der kontaktanalogen Anzeige beschrieben. Der Schwerpunkt liegt in dieser Arbeit auf der Technik der Bauteilerkennung, was z. B. mit 2D-SURF-Merkmalen [82] aus der Bildverarbeitung erreicht werden könnte. Da die bildbasierte Erkennung der sich auf der Arbeitsfläche befindenden Bauteile jedoch eine unsichere Komponente in der Verarbeitungskette ist, werden die Positionen der Bauteile vor Versuchsbeginn vom Versuchsleiter festgelegt und in das System eingegeben. Die Implementierung der folgenden Abschnitte bedient sich statischer Bauteilpositionen, um Auswirkungen einer fehlerhaften Positionserkennung auf die Bewertung der Visualisierung im Vorhinein auszuschließen. Zur Anzeige der Instruktionen des Demonstrators wurde Microsoft PowerPoint verwendet. Dadurch ist eine schnelle Gestaltung der zu projizierenden Bilder möglich. Die örtliche Anordnung der Elemente ist über das Bild der montierten Kamera sichtbar und per Maus skalierbar und verschiebbar. Das ermöglicht ein schnelles Entwerfen der Arbeitsanweisungen. Im Folgenden wird die technische Umsetzung der kontaktanalogen Visualisierungskonzepte beschrieben.

Realisierung Context-Bubble Im Konzept der Context-Bubble erfolgt die Darstellung aller möglichen Arbeitsschritte ausgehend vom aktuellen Zustand der Baugruppe. Der Ort der Anzeige der Context-Bubble ist der Baugruppenträger. Da der Werker sich auf die Anbringung der Bauteile konzentriert, ist eine nahe Anzeige der Arbeitsanweisung sinnvoll. Abbildung 5.30 zeigt die realisierte Context-Bubble. Wie zu sehen ist, erfolgt die Darstellung der Arbeitsanweisung oberhalb des Baugruppenträgers. Die gewählte Visualisierung zeigt den zu erreichenden Zielzustand des aktuellen Arbeitsschritts in ähnlicher Größe wie die echte Baugruppe (weiß unterlegter Kasten). Die benötigten Bauteile sind um das Zielbild herum angeordnet. Der Vorteil dieser Darstellung ist, dass der Werker die Bauteile vorkonfektionieren kann, analog zur Konturzeichnung einer Werkzeugwand. Der Werker kann hier die relevanten Bauteile vor Beginn der Montage zusammensuchen und auf die projizierten Felder legen, analog zur Belegung eines Schattenarbeitsplatzes (vgl. Abbildung 5.21). Die Durchführung der Montageaufgabe erfolgt anschließend. Dazu entnimmt der Werker die Bauteile aus den Feldern und montiert sie so, wie es das Zielbild oberhalb der Baugruppe anzeigt.

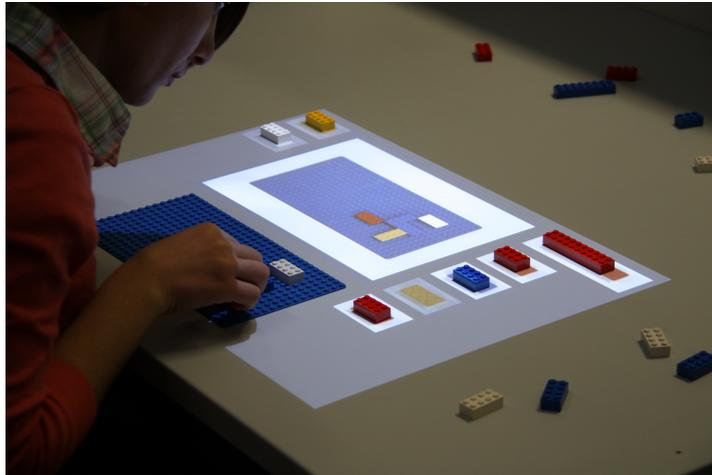


Abbildung 5.30: Realisierung der Context-Bubble - In dieser Abbildung ist die realisierte Context-Bubble dargestellt. Die Anzeige der Arbeitsanweisung erfolgt hier ortsnah oberhalb des Baugruppenträgers [93].

Der Vorteil dieser Visualisierung ist, dass der Werker seinen Blick nicht vom Arbeitsbereich abwenden muss, da die für ihn relevanten Informationen ortsnah in seinem Blickfeld erscheinen. Hat er die Bauteile vorkonfektioniert, so sind diese ebenfalls ortsnah am Baugruppenträger lokalisiert.

Realisierung kontaktanaloges Pick-by-Light Die nächste Stufe im Design der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen entspricht der Unterstützung des Werkers bei der Bauteilsuche. Beim Ansatz der Context-Bubble sollte der Werker die relevanten Bauteile selbst zusammenstellen und an den projizierten Schattenplätzen ablegen. Anschließend erfolgt die Montage der Baugruppe. Die erforderlichen Arbeitsschritte werden dann mittels Darstellung der zugehörigen Zielbilder durchgeführt.

Beim Ansatz des kontaktanalogen Pick-by-Light wird die Montageaufgabe in Einzelschritte aufgeteilt. Arbeitsschritt für Arbeitsschritt wird dazu am Demonstrator die notwendige Arbeitsanweisung projiziert. Die benötigten Bauteile werden hier kontaktanalog hervorgehoben. In Vorversuchen [93] wurde die Präferenz der VPs bei verschiedenen geometrischen Formen zur Hervorhebung ermittelt. Als Alternativen konnten die VPs aus geometrischen Formen, Farben und der Füllung der Form wählen. Die Auswertung des Vorversuchs hat als beliebteste Anzeigemethode hierfür die Umrahmung mittels weißer Ovale ohne Füllung ergeben, da die Runde Form aus verschiedenen Blickwinkeln keine Kanten zeigt. Als Farbe zum Hervorheben der Bauteile wurde Weiß gewählt, da sich diese gut vom Hintergrund abhebt. Das Endergebnis zeigt

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Abbildung 5.31 für das realisierte kontaktanaloge Pick-by-Light. Die Anzeige der Ar-

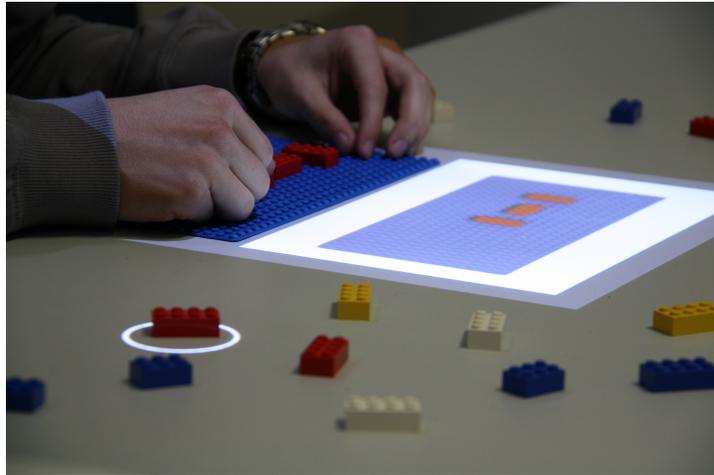


Abbildung 5.31: Realisierung des kontaktanalogen Pick-by-Light - In dieser Abbildung ist das Konzept kontaktanalogen Pick-by-Light zu sehen. Die Anzeige der Arbeitsanweisung erfolgt hier ortsnah oberhalb des Baugruppenträgers. Die benötigten Bauteile sind mit weißen Kreisen kontaktanalog hervorgehoben [93].

beitsanweisung erfolgt hier analog zur Context-Bubble ortsnah oberhalb des Baugruppenträgers. Je verwendeter Bauteilart werden als Zielbild nur solche Arbeitsanweisungen angezeigt, die mit den zu verbauenden Bauteilen möglich sind. Im abgebildeten Beispiel entsprechen diese den roten LEGO-Steinen. So ist auch in dieser Aufnahme ein solches Bauteil mit einem weißen Ring markiert. Befinden sich mehrere Bauteile gleicher Art im Arbeitsbereich des Werkers, so werden alle dieser Art kontaktanalog hervorgehoben. Der Werker kann selbst entscheiden, welches Bauteil er für den nächsten Arbeitsschritt verwenden möchte.

Das Zielbild ist reduziert auf die Darstellung des zu erreichenden Zustands der Baugruppe. Ausgehend vom zuvor beendeten Arbeitsschritt muss der Werker hier die mentale Aufgabe meistern, den Unterschied des Zustands seiner Baugruppe zum dargestellten Zielzustand zu finden. Die relevanten Bauteile sind dann an der noch nicht vervollständigten Position anzubringen.

Dieses Konzept greift den Vorteil auf, dass der Werker die Anordnung der Bauteile im Arbeitsbereich selbst vornehmen kann. Um eine kontaktanaloge Anzeige zu realisieren, würde das Bild der am Beamer montierten Kamera (vgl. Abbildung 5.27) herangezogen werden. Im Kamerabild müssten die Bauteile in der Bildebene erkannt werden. Da die verwendeten LEGO-Steine sich farblich gut von der Tischebene abheben,

kann für die Ortsbestimmung der Bauteile eine Farbsegmentierung verwendet werden. Hierzu wurden in dieser Arbeit das in Abschnitt 4.2.2.3 beschriebene Verfahren zur Flächensegmentierung verwendet. Mit dem extrahierten Schwerpunkt je Bauteil können dann mittels der in Abschnitt 5.3.2.2 bestimmten Umrechnungsvorschrift die Kamera-Koordinaten der Bauteile in Beamer-Koordinaten umgerechnet werden. An der Position der bestimmten Beamer-Koordinaten muss dann anschließend der weiße Kreis eingezeichnet werden.

In der praktischen Anwendung hat sich jedoch gezeigt, dass die Kamera zu weit von der Arbeitsfläche entfernt ist, um die LEGO-Steine voneinander unterscheiden zu können. Der hohe Abstand ist jedoch erforderlich, um den gesamten Arbeitsbereich erfassen zu können. Somit ist für den Anwendungsfall der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen eine automatische Erkennung theoretisch möglich, jedoch für die Bewertung der Anzeige nicht durchführbar. Deshalb wurden die folgenden Konzepte mittels vorgegebenen Bauteilpositionen implementiert. Die kontaktanaloge Anzeige erfolgt dann basierend auf der festgelegten Position in Beamer-Koordinaten.

Realisierung Visual Guidance Ausgehend von dem Konzept des kontaktanalogen Pick-by-Light ist die Anzeige des Montageortes die logische Erweiterung. Bei der Visual Guidance wird die Montageaufgabe in jeden Einzelschritt im Montageablaufplan aufgeteilt. Jedes Bauteil wird kontaktanalog hervorgehoben. Der zugehörige Montageort wird ebenfalls kontaktanalog visualisiert. Abbildung 5.32 zeigt eine Momentaufnahme der Visual Guidance. Der Werker hat zum Zeitpunkt der Aufnahme einen roten LEGO-Stein gegriffen. Der Montageort für dieses Bauteil ist kontaktanalog auf dem Baugruppenträger angezeigt. Dazu wird ein mit weißer Farbe gefülltes Rechteck auf die Baugruppe projiziert. Wie zu sehen ist, werden die bereits verbauten Bauteile mit weißen Linien umrahmt. Dies dient dazu, dem Werker eine weitere optische Orientierungsmöglichkeit auf dem Baugruppenträger zu geben.

Auch in dieser Realisierung wird auf statische Bauteilpositionen zurückgegriffen. Dadurch können Verfälschungen im Evaluationsergebnis bedingt durch die Genauigkeit der bildbasierten Lokalisation der Bauteile im Kamerabild ausgeschlossen werden. Ferner wurde der Baugruppenträger zusätzlich auf dem Arbeitstisch befestigt.

5.3.3 Evaluierung der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen

Die technische Realisierung der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen wurde am realisierten Demonstrator in Probandenversuchen evaluiert [93]. Abbil-

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

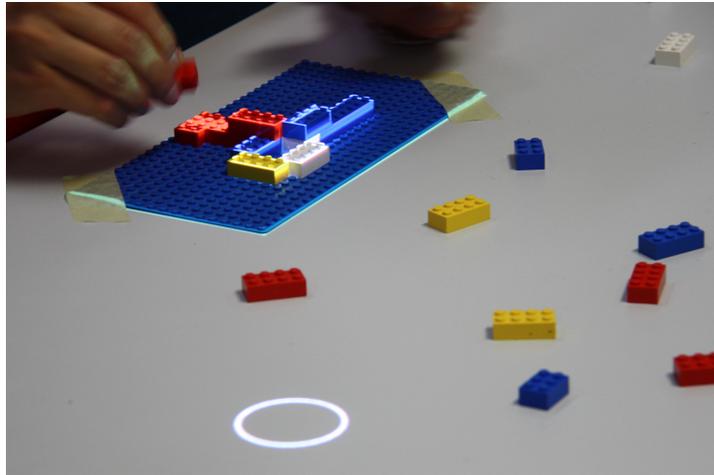


Abbildung 5.32: Realisierung der Visual Guidance - In dieser Abbildung ist eine Momentaufnahme der Visual Guidance zu sehen. In diesem Beispiel wird die Endposition für das gegriffene Bauteil kontaktanalog auf dem Baugruppenträger angezeigt [93].

Abbildung 5.33 zeigt eine Aufnahme zum Zeitpunkt einer laufenden Evaluierung. Die VP

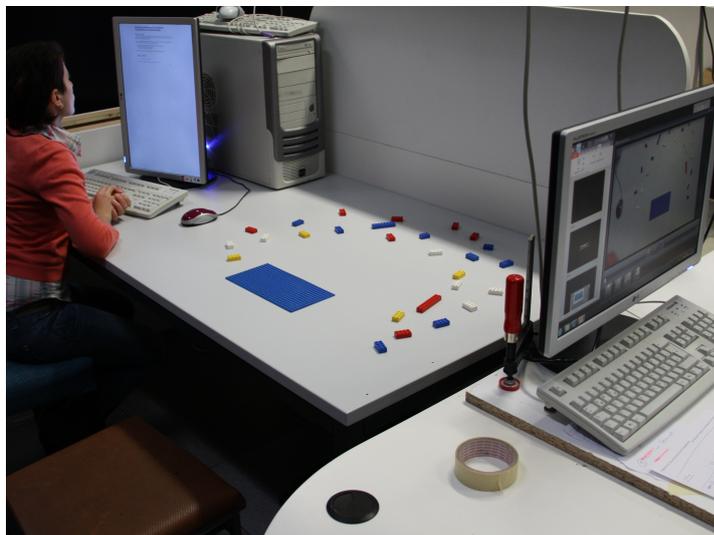


Abbildung 5.33: Evaluierung des Demonstrators zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen - In dieser Abbildung ist der Versuchsaufbau zum Zeitpunkt einer laufenden Evaluierung zu sehen [93].

sitzt am Arbeitsplatz. Links befindet sich ein PC, der zur Präsentation der Versuchsbeschreibung und zur Beantwortung der Fragen von den VPs verwendet wird. So müssen die VPs nicht vom Arbeitstisch aufstehen und können ihre Erfahrungen direkt am Ar-

beitsplatz eingeben. Rechts befindet sich der eigentliche Arbeitsbereich für den Worker. In der Abbildung ist der Baugruppenträger zu sehen. Ferner sind die benötigten Bauteile auf der Arbeitsfläche verteilt. Damit die VP mit dem Demonstrator interagieren kann, wurden zwei Fußtaster unter dem Arbeitstisch installiert. Hiermit ist es möglich, im Montageablaufplan vorwärts oder rückwärts zu navigieren. Die Ausgaben des Demonstrators passen sich entsprechend an.

Rechts außerhalb des Arbeitsbereichs der VPs befindet sich der Arbeitsplatz des Versuchsleiters. Dieser kann hier das Kamerabild aus der Perspektive von oberhalb des Arbeitstisches betrachten. Ferner können hier eigene Beobachtungen zu den Versuchen notiert werden.

5.3.3.1 Versuchsdurchführung

Der Probandenversuch wurde mit 17 VPs durchgeführt. Zunächst mussten die VPs einen Fragebogen zu ihrer Person und ihrem technischen Hintergrund ausfüllen. Der Altersbereich der VPs lag zwischen 20 und 25 Jahren. Alle VPs waren Studenten oder kamen aus dem akademischen Umfeld. 75% hatten einen technischen Hintergrund. 40% verwendeten eine Sehhilfe oder Linsen, jedoch keine der VPs gab an, unter einer Sehbehinderung zu leiden. Alle VPs gaben an, mit PCs o. ä. Geräten täglich zu arbeiten. Mit Systemen aus der AR hatten bisher 65% der VPs Erfahrungen gesammelt. Nur 40% der VPs haben bereits mit einem Beamer gearbeitet. Weniger als 18% kannten Geräte, wie HMDs oder Head-up Displays (HUDs). Die Montage von Produkten, wie z. B. aus LEGO, haben jedoch 50% der VPs innerhalb des letzten halben Jahres durchgeführt.

Die von den VPs zu montierenden Produkte sind in Abbildung 5.34 zu sehen. Je Versuch wurden abstrakte Aufbauten aus LEGO auf einem Baugruppenträger montiert, wofür die VPs jeweils die gleichen elf LEGO-Steine verwenden mussten. An manchen Stellen wurden die Steine so übereinander gestapelt, dass die VPs die vorgegebene Reihenfolge der Arbeitsschritte befolgen mussten, damit sie das finale Produkt bauen konnten. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Reihenfolge der drei Versuche unter den VPs variiert wurde, um Gewöhnungseffekte der Darstellungsform über die Dauer der Evaluierung zu bereinigen. Für jedes Konzept der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen mussten die VPs einen Fragebogen ausfüllen. Der Schwerpunkt der Bewertung liegt hier nicht ausschließlich auf der Usability des Demonstrators. Vor allem der Eindruck der VPs zu den entwickelten Visualisierungskonzepten ist in diesem Abschnitt von Interesse. So wurde eine Auswahl der Fragen

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

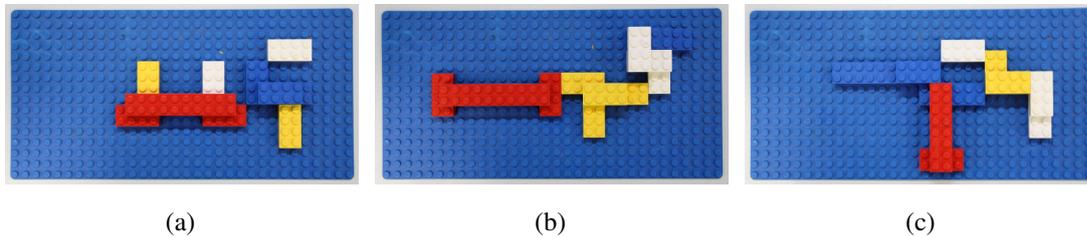


Abbildung 5.34: Produkte zur Evaluierung der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen - Abstrakte Aufbauten aus LEGO auf einem Baugruppenträger zu den Konzepten Context-Bubble, kontaktanalogen Pick-by-Light und Visual Guidance.

der SUS zur Evaluation verwendet. Zusätzlich wurden weitere Fragen zur Beurteilung der Visualisierung hinzugefügt. Der daraus resultierende Fragebogen lautet wie folgt [93]:

Frage 1: *Ich würde das System wieder verwenden.*

Frage 2: *Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.*

Frage 3: *Ich habe viel Zeit benötigt, um die Funktionsweise des Systems zu verstehen.*

Frage 4: *Ich denke, dass ich technische Unterstützung brauchen würde, um das System nutzen zu können.*

Frage 5: *Ich denke, dass das System konsistent ist.*

Frage 6: *Die graphische Gestaltung ist ansprechend.*

Frage 7: *Die Anordnung der auf der Arbeitsfläche projizierten Arbeitsanweisungen ist gut strukturiert.*

Frage 8: *Die Arbeitsanweisungen auf der Arbeitsfläche sind gut sichtbar.*

Frage 9: *Das graphische Design ist unnötiger Weise komplex.*

Frage 10: *Die Arbeitsanweisungen sind verständlich.*

Frage 11: *Die präsentierten Arbeitsanweisungen sind ausreichend, um die Montage erfolgreich abschließen zu können.*

Die Beurteilung je Frage erfolgt hier auf einer Skala von 1 bis 8. Der niedrigste Wert eins entspricht hierbei wieder der Aussage „Ich stimme gar nicht zu“, der höchste Wert der Aussage „Ich stimme voll zu“. Durch die Wahl eines geraden Wertebereichs der Skala mussten sich die VPs für eine Tendenz entscheiden, da es so keinen mittleren Wert auf der Skala gibt. Bei den Fragen 1 bis 5 handelt es sich um eine Abwandlung der SUS-Fragen aus Abschnitt 5.1.2. Folgende Korrespondenzen in ihren Bedeutungen können dazu aufgestellt werden: Frage 1 entspricht SUS 1, Frage 2 SUS 9 und Frage 5 dem invertierten SUS 6; Frage 3 entspricht dem invertierten SUS 3 und Frage 4 SUS 4. Damit lässt sich ein reduzierter Wert RSU_{Beamer} analog nach Gleichung (5.1) für die getätigten Bewertungen W_i nach der Formel

$$RSU_{\text{Beamer}} = \frac{100}{35} \cdot \left[\sum_{i \in \{1,2,5\}} (W_i - 1) + \sum_{j \in \{3,4\}} (8 - W_j) \right] \quad (5.11)$$

berechnen. Durch die Skalierung mit dem Faktor $\frac{100}{35}$ erreicht der RSU_{Beamer} einen Wertebereich von 0 bis 100 analog zum SUS-Wert SU . Entsprechend gilt hier für einen höheren Wert RSU_{Beamer} ebenfalls die Entsprechung einer besseren Benutzerfreundlichkeit der Anzeige, analog zum SU .

Die Fragen 6 bis 9 dienen der Beurteilung der Anzeige. Sie zielen sowohl auf die Gestaltungsform, als auch auf die Präsentation ab. Die verbleibenden Fragen 10 und 11 hinterfragen den Inhalt der dargestellten Arbeitsanweisungen. Damit soll überprüft werden, ob die Probanden die gezeigten Instruktionen verstanden haben. Als abschließende Frage konnten die VPs die Darstellungsformen der Arbeitsanweisungen mittels Freitext beurteilen. Zusätzlich wurde noch die Möglichkeit gegeben, weitere Ideen zu Eingabegeräten zu hinterlassen.

Die Darstellung der Evaluierungsergebnisse der Probandenversuche wurde analog zur Montageablaufplan-GUI mittels Box-Whisker-Plot [68] vorgenommen. Zusammenfassend seien an dieser Stelle noch einmal die wichtigsten Parameter dieser Darstellung wiederholt. Innerhalb der in blau gefärbten Boxen befinden sich 50% der Abstimmungsergebnisse. Der Rand der Boxen beschreibt jeweils das untere Quartil ($Q_{0,25}$) bzw. das obere Quartil ($Q_{0,75}$). Der Median je Frage ist mittels einer roten Linie in das Diagramm eingetragen. Die in schwarz eingetragenen Antennen visualisieren die Maximalwerte der Abstimmungsergebnisse. Mit grünen Kreisen sind Ausreißer eingetragen, insofern zur korrespondierenden Frage solche Extremwerte existieren. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Evaluierung werden in den folgenden Abschnitten diskutiert.

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Versuch Context-Bubble Der erste Versuch, den die VPs durchführen mussten, war die Montage des Produkts aus Abbildung 5.34(a). Abbildung 5.35 zeigt das Evaluierungsergebnis des Context-Bubble-Konzepts. Wie zu sehen ist, sind sich die VPs nicht

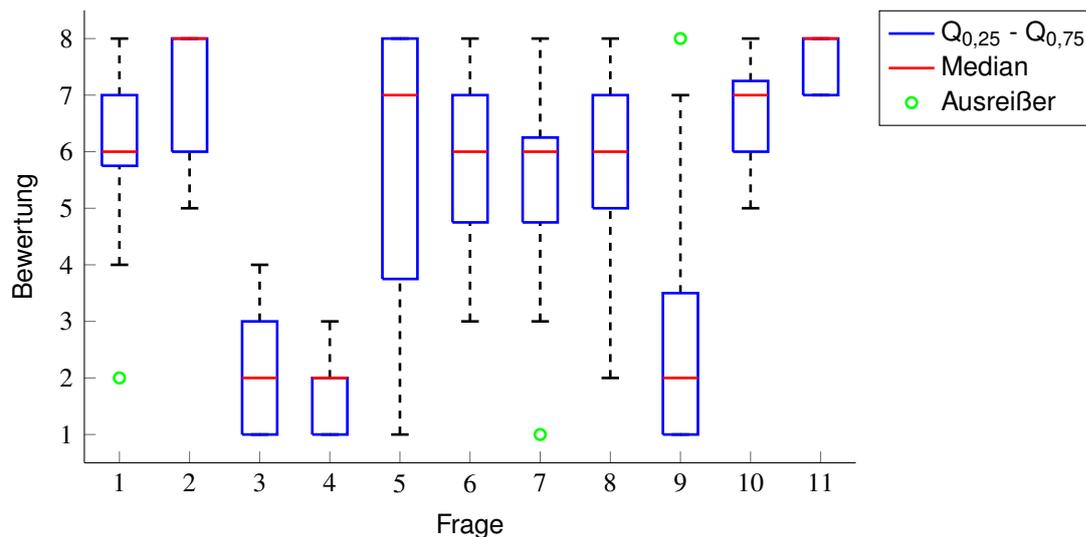


Abbildung 5.35: Ergebnisse des Context-Bubble-Konzepts - Diese Abbildung zeigt das Evaluierungsergebnis der 17 VPs des Context-Bubble-Konzepts [93].

sicher, ob sie das System wieder verwenden würden (Frage 1). Eine Tendenz in positiver Richtung ist jedoch zu erkennen. Die VPs haben sich größtenteils bei der Nutzung des Systems sicher gefühlt (Frage 2). Die Einarbeitungszeit wurde subjektiv als sehr gering empfunden (Frage 3) und die Verwendung konnte ohne technische Unterstützung erfolgen. Bei Frage 5 nach der Konsistenz des Systems waren sich die Befragten nicht einig.

Der nach Gleichung (5.11) berechnete RSU_{Beamer} für die Context-Bubble ergibt einen Wert von 79.83 über die 17 VPs. Die Einordnung dieses Werts in die Skala aus Abbildung 5.4 unter Berücksichtigung der Bemerkung aus Abschnitt 5.2.3.1 bedeutet eine akzeptable Usability. Ferner zeigt der RSU_{Beamer} bereits die Bewertung *gut*.

Die Fragen 6 bis 9 nach der Gestaltung der Anzeige wurden im Median positiv beantwortet. Eine eindeutige Aussage dazu lässt sich jedoch nicht treffen, da die Streuung der Ergebnisse fast die gesamte Skala einnimmt. Jedoch waren sich die VPs einig, dass die gezeigten Assistenzinformationen für die Erfüllung ihrer Montageaufgabe hilfreich waren (Fragen 10 und 11).

Ein möglicher Grund für die nicht eindeutige Bewertung der Anzeige könnte die Grundlage der Gestaltung sein. Die Context-Bubble ist der Übertrag einer herkömmli-

chen Papier-basierten Arbeitsanweisung in eine Darstellung mittels Beamer. So könnte der persönliche Geschmack von analogem vs. digitalen Präsentationsmedien Einfluss auf die Bewertung der VPs bei diesem Konzept genommen haben.

Versuch kontaktanaloges Pick-by-Light Der zweite Versuch, den die VPs durchführen mussten, war die Montage des Produkts aus Abbildung 5.34(b). Abbildung 5.36 zeigt das Evaluierungsergebnis des kontaktanalogen Pick-by-Light-Konzepts. Im Vergleich zur Context-Bubble, haben sich die VPs bei der Verwendung des Systems mit dem Konzept kontaktanaloges Pick-by-Light unsicherer gefühlt (Fragen 1 und 2). Die

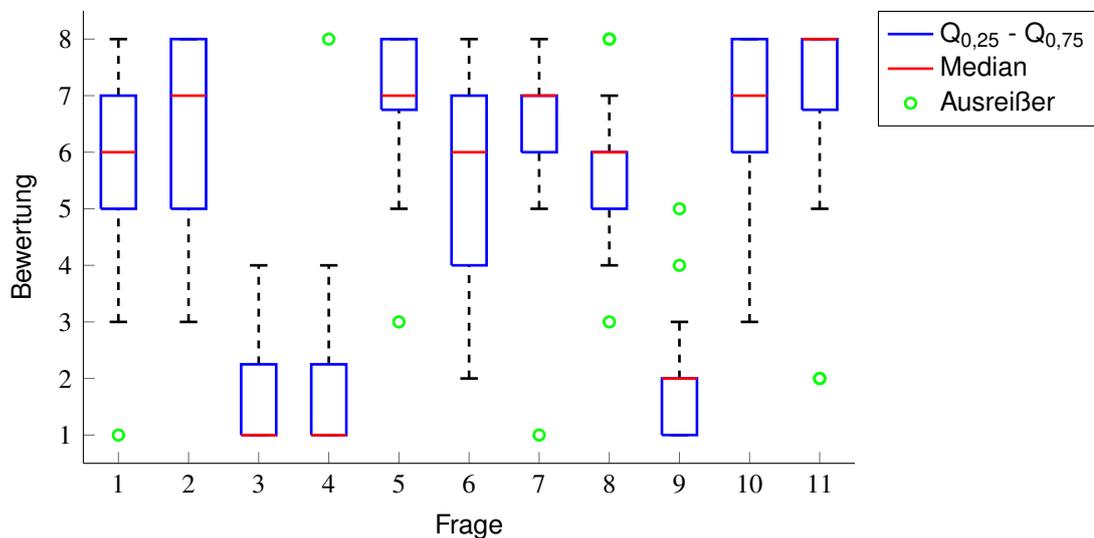


Abbildung 5.36: Ergebnisse des kontaktanalogen Pick-by-Light-Konzepts - Diese Abbildung zeigt das Evaluierungsergebnis der 17 VPs des kontaktanalogen Pick-by-Light-Konzepts [93].

Bewertung der Wiederverwendung und Sicherheit im Umgang mit diesem System ist im oberen Bereich der Likert Skala eingruppiert. Die Eingewöhnungszeit und erforderliche technische Unterstützung wurden niedrig bewertet. Frage 5 hinsichtlich der Konsistenz wurde hingegen sehr gut bewertet. Dies findet sich auch in den Ergebnissen zu den Fragen 7 bis 9 wieder.

Der nach Gleichung (5.11) berechnete RSU_{Beamer} für das kontaktanaloge Pick-by-Light ergibt einen Wert von 80.17 über die 17 VPs. Die Einordnung dieses Werts in die Skala aus Abbildung 5.4 unter Berücksichtigung der Bemerkung aus Abschnitt 5.2.3.1 befindet sich ähnlich zum Konzept Context-Bubble im akzeptablen Bereich mit leichter Tendenz nach oben. Ferner zeigt der RSU_{Beamer} hier eine *gute* Usability.

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Die Arbeitsanweisungen haben auch bei diesem Konzept ausgereicht, um die Montageaufgabe erfolgreich abzuschließen. Eine geringe Tendenz nach unten im Vergleich zur Context-Bubble ist erkennbar, was mit der Tatsache zusammenhängen könnte, dass die benötigten Bauteile auf der Arbeitsfläche aktiv hervorgehoben wurden. Das entwickelte Konzept im Demonstrator war zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung keine für die VPs alltägliche Anzeigemethode. Diese ungewohnte Art hat sich jedoch nicht negativ auf die durchzuführenden Arbeitsschritte ausgewirkt.

Versuch Visual Guidance Der dritte Versuch, den die VPs durchführen mussten, war die Montage des Produkts aus Abbildung 5.34(c). Abbildung 5.37 zeigt das Evaluierungsergebnis des Visual Guidance-Konzepts. Bis auf wenige Ausreißer wurde das

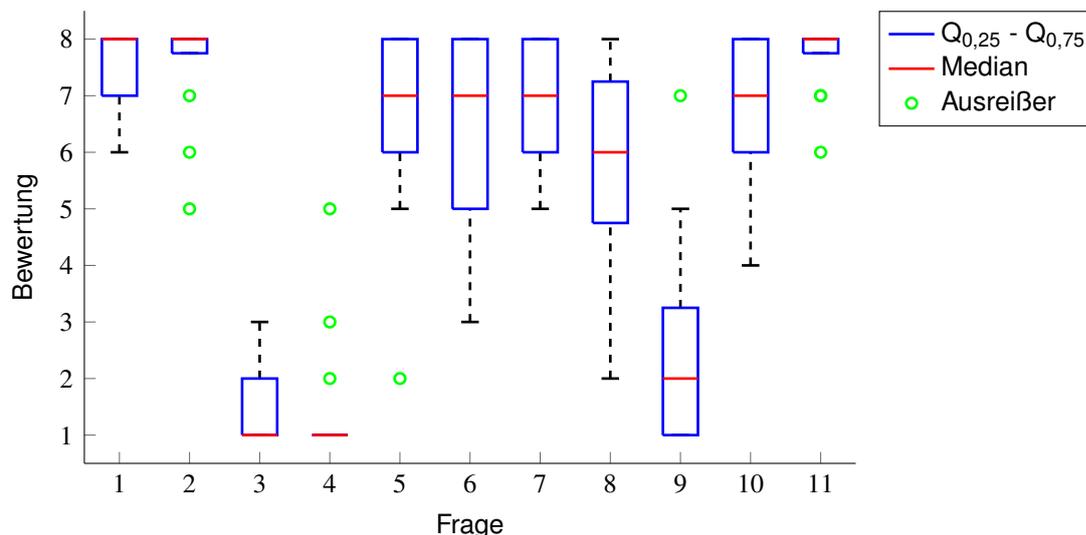


Abbildung 5.37: Ergebnisse des Visual Guidance-Konzepts - Diese Abbildung zeigt das Evaluierungsergebnis der 17 VPs des Visual Guidance-Konzepts [93].

Konzept Visual Guidance sehr gut in der Eigenschaft Usability bewertet (Fragen 1 bis 5). Es liegt eine hohe Bereitschaft seitens der VPs vor, das System wieder zu verwenden. Auch fühlten sich fast alle VPs sicher bei der Verwendung des Systems. Eine subjektiv empfundene kurze Eingewöhnungszeit und kein Wunsch nach technischer Unterstützung belegen diese Einschätzung. Dieser Eindruck spiegelt sich auch im Wert RSU_{Beamer} wider.

Der nach Gleichung (5.11) berechnete RSU_{Beamer} für die Visual Guidance ergibt einen Wert von 91.26 über die 17 VPs. Die Einordnung dieses Werts in die Skala aus Abbildung 5.4 unter Berücksichtigung der Bemerkung aus Abschnitt 5.2.3.1 befindet sich

im oberen akzeptablen Bereich. Ferner zeigt der RSU_{Beamer} bereits eine *sehr gute* Bewertung an. Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Konzepten wurde die Visual Guidance mit der größten Usability bewertet.

Die Gestaltung der Arbeitsanweisungen wurde meist positiv bewertet, nur waren sich die VPs nicht einig, ob alle gewünschten Informationen ausreichend sichtbar waren (Frage 8). Die Komplexität wurde breiter bewertet, jedoch mit positiver Tendenz.

Auch beim Konzept Visual Guidance wurden die Arbeitsanweisungen als für die Montageaufgabe ausreichend beurteilt. Bis auf wenige Ausreißer waren sich alle VPs einig, mit diesem Konzept ihre Aufgabe erfüllen zu können (Frage 11). Dies könnte daran liegen, dass die VPs bei diesem Konzept nicht über die richtige Auswahl und den Montageort der LEGO-Steine auf dem Baugruppenträger nachdenken müssen. Diese Information wird vom System ausgegeben und der Werker muss nur noch seinen Arbeitsschritt durchführen und die nächste Assistenzinformation abrufen.

5.3.4 Fazit

In diesem Abschnitt wurden die im Rahmen der Dissertation entwickelten Konzepte zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen vorgestellt. Dabei wurden drei Evolutionsstufen vollzogen. Die in Papier-basierten Arbeitsanweisungen enthaltenen und für die Montageaufgabe relevanten Informationen wurden extrahiert. In Form von Fotos erfolgte eine mittels Beamer direkt in den Arbeitsbereich des Werkers einblendete Unterstützung (Konzept Context-Bubble).

Als nächster Schritt wurde die Auswahl der für den aktuellen Arbeitsschritt relevanten Bauteile aus dem Montageablaufplan extrahiert. Mit dieser Information konnten diese Bauteile kontaktanalog hervorgehoben werden. Der Werker konnte sich bei diesem Konzept des kontaktanalogen Pick-by-Light selbst entscheiden, welches Bauteil er verwenden wollte.

Als nächste Erweiterung wurde die kontaktanaloge Darstellung von Arbeitsanweisungen um eine aktive Komponente ergänzt. Damit ist es möglich, die Auswahl des nächsten Bauteils vom System treffen zu lassen, und anschließend kontaktanalog hervorheben zu lassen. Die Zielposition auf dem Baugruppenträger wurde bei diesem Konzept der Visual Guidance ebenfalls kontaktanalog bereit gestellt.

Alle drei Konzepte wurden in Probandenversuchen auf ihre Usability untersucht. Bei der Gegenüberstellung des berechneten RSU_{Beamer} für die drei Konzepte zeigt sich, dass das kontaktanaloge Pick-by-Light einen kaum merklich höheren Wert erreichen konnte, als die Context-Bubble. Die Visual Guidance hat sich hier deutlich von den beiden anderen Konzepten abgehoben und wurde von den VPs bevorzugt. Damit liegt der

Rückschluss nahe, dass die VPs eine aktive visuelle Unterstützung bei ihrer Montage-tätigkeit wünschen. Dieses Ergebnis spiegelt den vermuteten Ausgang der Entwurfsphase der Konzepte wider. Bei jeder Entwicklungsstufe der Visualisierung konnten Eigenschaften hinzugefügt werden, die die VPs entlastet haben. Mit diesem Vorgehen konnte die Usability der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen gesteigert werden.

5.4 Diskussion der Konzepte zur Visualisierung von Montageablaufplänen

In diesem Kapitel wurden die entwickelten Ansätze zur Visualisierung von Montageablaufplänen vorgestellt. In den bisherigen Kapiteln wurde die Repräsentation von Montageablaufplänen im Allgemeinen beschrieben. Anschließend wurden zwei Konzepte vorgestellt, die es erlauben, die Aktionen eines Werkers während seiner Montageaufgabe zu erkennen. Im dritten Teil dieser Dissertation wurde behandelt, wie die in einem Montageablaufplan enthaltenen Informationen als Arbeitsanweisung dargestellt werden können.

Im ersten Abschnitt wurde eine abstrakte Definition von Montageablaufplänen beschrieben. Jedes Bauteil wird hier mit seinen Eigenschaften definiert. Eine Baugruppe verfügt formal über die gleichen Eigenschaften wie ein Bauteil. Über die Angabe der Abhängigkeiten zwischen Bauteilen und deren Ziel-Baugruppe wird so der Montageablaufplan rekursiv erstellt.

Ausgehend von der abstrakten Definition des Montageablaufplans erfolgt die digitale Visualisierung der Arbeitsanweisung im zweiten Abschnitt dieses Kapitels in Form einer Montageablaufplan-GUI. Hier wurden die im Montageablaufplan enthaltenen Eigenschaften je Arbeitsschritt extrahiert und je Datentyp angezeigt. Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte GUI-Konzept wurde in Form eines Demonstrators realisiert und dessen Funktionsweise mit der Verwendung einer rein Papier-basierten Arbeitsanweisung in Probandenversuchen verglichen. Die Auswertung der Ergebnisse haben gezeigt, dass die befragten VPs die digitale Version der Arbeitsanweisungen der analogen Version vorziehen.

Im dritten Abschnitt wurde die Visualisierung mittels eines Beamers vom Monitor in den Arbeitsbereich des Werkers verlegt. Mit der kontaktanalogen Darstellung der im Montageablaufplan enthaltenen Informationen muss der Nutzer des Assistenzsystems seinen Blick nicht mehr in Richtung eines Monitors abwenden. Zusätzlich konnte der Arbeiter entlastet werden, indem das für den aktuellen Arbeitsschritt benötigte Bauteil

ebenfalls kontaktanalog auf der Arbeitsfläche hervorgehoben wurde. Der Werker muss so nur die Bauteile greifen und montieren. Der Lagerort wird durch das abgewandelte Pick-by-Light-Konzept angezeigt. Die entwickelten Konzepte zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen wurden ebenfalls in Probandenversuchen evaluiert. Diese Assistenzinformation wurde sehr positiv von den VPs bewertet.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Konzepte zur Visualisierung von Montageablaufplänen beschreiben die Evolutionsstufen ausgehend von einer rein Papier-basierten über eine Monitor gestützte Anzeige hin zur kontaktanalogen Werker-Unterstützung. Durch Probandenversuche wurden anhand von Testgruppen die Konzepte auf Benutzerfreundlichkeit und Akzeptanz überprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nutzer über die Evolutionsstufen hinweg auch steigende positive Bewertungen abgegeben haben, und sich die vorgestellten Ideen als Alternative zu Papier-basierten Arbeitsanweisungen in der industriellen Produktion mit variantenreichen Produkten geringer Losgröße eignen. Ferner sei an dieser Stelle anzumerken, dass die beschriebenen Visualisierungssysteme unabhängig von der in Kapitel 3 beschriebenen Wissensverarbeitung für Montageablaufpläne und der in Kapitel 4 beschriebenen Erkennung von Werkeraktionen realisiert sind. Der Informationsaustausch zwischen den Modulen erfolgt in einer abstrakten Form und ist somit von der technischen Auslegung der Visualisierung unabhängig. Mit dieser Vorgehensweise sind alle am Assistenzsystem beteiligten Komponenten austauschbar. Lediglich das generische Datenformat der Kommunikationsschnittstelle zwischen den Modulen muss unterstützt werden. Die entwickelten Komponenten konnten als prototypische Realisierung umgesetzt werden.

5. VISUALISIERUNG VON MONTAGEABLAUFPLÄNEN

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Diese Dissertation befasst sich mit der Entwicklung eines Werkerassistenzsystems, das eine abstrakte Repräsentation für Montageablaufpläne, eine Komponente zur Erfassung der Werkeraktionen und eine Darstellungseinheit für Arbeitsanweisungen beinhaltet. Das entwickelte Assistenzsystem kann einen Werker bei seiner Tätigkeit unterstützen, damit er seine Montageaufgabe erfolgreich bearbeiten und erfüllen kann. Der Fokus der Arbeit liegt auf drei Aufgabenschwerpunkte: die Repräsentation des Montageablaufplans, die Erfassung der Werker-Tätigkeit und die Visualisierung der Assistenzinformation.

6.1 Zusammenfassung

Nach dem Überblick über relevante Aspekte der industriellen Produktion wurden verschiedene Strukturformen von Arbeitsstationen beschrieben und diese Arbeit dazu thematisch eingeordnet. Angesiedelt in der manuellen Montage, entspricht der dieser Arbeit zugrundeliegenden Struktur am besten die Baustellenmontage. Bei dieser Strukturform können an jeder Arbeitsstation unterschiedliche Produkte gefertigt werden. Die von den Werkern benötigten Montageablaufpläne sind somit abhängig von den herzustellenden Produkten.

Im ersten Teil dieser Dissertation wurde zur Präsentation von geeigneten Assistenzinformationen ein Modell zur Repräsentation von Montageablaufplänen vorgestellt. Das auf Basis von regelbasierten Programmiermethoden entwickelte Konzept wurde für ein Fischertechnik-Auto in einem Demonstrator realisiert und das Konzept hinsichtlich Anwendbarkeit diskutiert. Die verwendete Software-Lösung Jess ist nativ in der Programmiersprache Java realisiert, wodurch sich in Jess implementierte

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Funktionen auch aus anderen Java-basierten Anwendungen aufrufen lassen. Die Jess-Bibliothek wurde zur Implementierung des Demonstrators verwendet. Dazu wurde die vorgestellte Test-GUI ebenfalls in Java umgesetzt, was das Abfragen des Arbeitswissens über Jess Queries ermöglicht. Wie sich gezeigt hat, konnte das Testsystem, basierend auf Eingaben des Nutzers, den Fortschritt im Montageablaufplan ermitteln. Das vorgestellte Konzept konzentriert sich auf eine menschen-lesbare Repräsentation von Montageablaufplänen. Mit diesem Vorgehen ist es möglich, eine einfache Definition von Bauteilabhängigkeiten vorzunehmen. Die Inferenz über den Zustand des Produktes erfolgt anschließend anhand definierter Jess Rules. Sollen in Zukunft weitere Eigenschaften dem Montageablaufplan hinzugefügt werden, so ist das ohne Einschränkungen möglich. Die Auswertung der neu hinzugefügten Eigenschaften erfolgt anschließend analog zur bereits beschriebenen Methodik. Anhand neuer Wenn-Dann-Regeln, die der Programmierer in die Logik des Systems einzupflegen hat, kann das System die neuen Eigenschaften verwenden. Durch schrittweise Betrachtung des Montageablaufplans und den dazu gehörenden Regeln wird die Adaption des Systems vereinfacht. Die Komplexität der Betrachtung einzelner Arbeitsschritte ist somit reduziert und erlaubt eine simple Erweiterung der Montageablaufpläne. Schnittstellen wurden für den Zugriff auf das Wissen und die Bereitstellung von neuem Wissen über den beschriebenen Event-Mechanismus integriert. Damit wurde eine Ebene der Abstraktion zwischen Verarbeitung von Informationen und deren Bereitstellung geschaffen. So können Module, die das generierte Wissen benötigen und Informationen über den Bauteilzustand erlangen wollen, auf die Wissensbasis zugreifen.

Im zweiten Teil dieser Dissertation wurden zwei Ansätze zur Erkennung von Werkeraktionen verwendet und vorgestellt. Es handelt sich dabei um zwei unabhängig von einander realisierte Ansätze, die jeweils mittels Probandenversuchen auf ihre Anwendbarkeit evaluiert wurden. Greift der Werker z. B. ein Bauteil, so wird aus diesem Vorgang eine Beobachtung *Werker greift Bauteil* erzeugt und in Form eines Events als Eingabe für das vorgestellte Werkerassistenzsystem verwendet.

Im ersten Ansatz wurden 3D-Merkmale auf Basis von Kinect-Daten mittels eines Zustandsautomaten ausgewertet. Wie sich gezeigt hat, konnte mittels Kinect die Hand des Werkers während seiner Montagetätigkeit verfolgt werden. Aus dem Abgleich der Positionsdaten der Hand mit dem Aufbewahrungsort der Bauteile ist es gelungen, auf Greif- und Ablageaktionen des Werkers zu schließen und den aktuellen Arbeitsschritt zu inferieren.

Im zweiten Ansatz wurden 2D-Bewegungsvektoren einem HMM zugeführt, um den der Beobachtung zugrundeliegenden Arbeitsvorgang zu ermitteln. Die Erkennungsrate der statistischen Auswertung der Bilddaten liegt unterhalb vergleichbarer Ansätze in

der Literatur. In Referenzarbeiten wurden Fehlertoleranzen um einen Zustandswechsel eingeführt und somit ein besseres Ergebnis erzielt. Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse wurden ohne solche Optimierungen wiedergegeben. Als quantitative Aussage über die Anwendbarkeit ist der vorgestellte Ansatz ausreichend: das HMM wechselt früher in den nächsten Zustand, als es in der Ground Truth der Fall wäre. Im Kontext eines Werkerassistenzsystems bedeutet dies die vorzeitige Anzeige des nächsten Arbeitsschritts. Da der Werker sich zu diesem Zeitpunkt mit seiner aktuellen Montagetätigkeit befasst, würde er die neue Information wohl erst nach Abschluss der aktuellen wahrnehmen. Die Untersuchung, ob dies so ist, stand im vorgestellten Teil der Arbeit jedoch nicht im Vordergrund und müsste gesondert untersucht werden.

Die Übermittlung der erkannten Tätigkeit an das übergeordnete regelbasierte Wissenssystem wurde mittels des vorgestellten Event-Mechanismus realisiert. Die realisierten Systeme des Kinect-basierten, sowie des HMM-basierten Ansatzes, implementieren diesen Event-Mechanismus und sind somit gegeneinander austauschbar. Hier können alternative Erkennen in das Werkerassistenzsystem eingebunden werden, indem sie diese Schnittstelle verwenden. So ist eine Anpassung der gesamten Architektur des Systems nicht erforderlich, da die Interpretation der Beobachtung unabhängig von der Generierung dieser Beobachtung ist.

Im dritten Teil dieser Dissertation wurden als weiterer Teil eines Werkerassistenzsystems Konzepte für die Visualisierung von Arbeitsanweisungen entwickelt und vorgestellt. Im ersten Konzept werden die für die Montage wichtigsten Informationen aus einer Arbeitsanweisung in Papierform extrahiert und mit einer GUI visualisiert und anschließend mittels Probandenversuchen evaluiert. Die VPs mussten die Montage eines Produktes anhand eines Papier-basierten Montageablaufplanes vornehmen. Anschließend sollten sie ein weiteres Produkt mittels der Montageablaufplan-GUI herstellen. Ihre Erfahrungen wurden mit einem Fragebogen erfasst und ausgewertet. Die VPs gaben an, die GUI der Papier-basierten Version des Montageablaufplanes vorzuziehen.

Als Erweiterung der Montageablaufplan-GUI erfolgt im zweiten Konzept die mittels Beamerprojektion vorgenommene kontaktanaloge Anzeige der Arbeitsanweisung direkt im Sichtbereich des Werkers. Hierzu wurden in drei Ausbaustufen Assistenzinformationen auf die Tischebene der Arbeitsstation projiziert und die Darstellungsarten mittels Probandenversuchen evaluiert. Die VPs mussten je Ausbaustufe ein Objekt aus LEGO zusammen setzen und ihre Beurteilung der Darstellungsart in einem Fragebogen erfassen. Bei der Evaluierung dieser Konzepte konnte je Ausbaustufe eine Verbesserung der Usability festgestellt werden. Die Nutzer gaben an, gerne wieder mit der

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

entwickelten kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen arbeiten zu wollen.

In der letzten Ausbaustufe wurden nur die gerade benötigten Bauteile kontaktanalog hervorgehoben. Die Zielposition auf dem Baugruppenträger wurde ebenfalls kontaktanalog dargestellt. Für den Einsatz des vorgestellten Konzeptes der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen in einem Produktivsystem ist es erforderlich, sowohl die Positionen der Bauteile automatisch zu erkennen, als auch die Lage des Baugruppenträgers. Damit hängt die Leistungsfähigkeit der Darstellungseinheit von Arbeitsanweisungen auch von der Erkennungsleistung der Bauteillokalisierung ab. Je nach Größe der zu verarbeitenden Bauteile, stellt dies eine hohe Anforderung an solche Erkennertechnologien dar. Eine Möglichkeit, dies zu lösen, ist die Verwendung von Boxen zur Lagerung kleiner Bauteile. Ein Erkennungssystem muss anschließend diese Boxen im Arbeitsbereich des Werkers finden. Der Inhalt der Boxen könnte durch weitere Sensortechnologien erfassbar sein. Würde man solche Boxen z. B. mit RFID-Transpondern ausstatten und darauf den Inhalt der Boxen hinterlegen, könnte deren Inhalt mittels geeigneten Lesegeräten ermittelt werden. Die Visualisierung des Werkerassistenzsystems ist, analog zur Erkennung der Werkeraktionen, ebenfalls modular aufgebaut und interagiert mit den beteiligten Komponenten über Programmierschnittstellen. Somit können auch zur Realisierung der Visualisierungskonzepte alternative Ansätze implementiert und anschließend in die Gesamtstruktur des Assistenzsystems eingebunden werden. Zur Ansteuerung der Visualisierung erhält das zuständige Modul lediglich die Anweisung, welches Bauteil hervorzuheben ist. Das Auffinden des Bauteils erfolgt selbständig innerhalb des Moduls und ist somit getrennt von der Logik des Werkerassistenzsystems.

Die vorgestellte Systemarchitektur erfüllt die gestellte Anforderung der Modularität der Einzelkomponenten. Die in der Dissertation gezeigten Komponenten wurden verwendet, um einen Nachweis der Anwendbarkeit der diskutierten Konzepte zu erbringen. Dieser Nachweis wurde erfolgreich mittels Probandenversuchen erbracht und ausführlich in den zugehörigen Kapiteln diskutiert.

Die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems hängt von der Erkennungsleistung der beteiligten Einzelkomponenten ab. Jede Teilkomponente ist austauschbar, sofern sie die notwendigen Schnittstellen implementiert, um mit den restlichen Modulen des Gesamtsystems kommunizieren zu können. Tauscht man eine Komponente des Systems unter dieser Randbedingung aus, so ist dieser Vorgang aus Sicht des Gesamtsystems nicht zu erkennen. Die Funktionalität bleibt bestehen, und das Gesamtsystem arbeitet weiterhin in der erwarteten Weise. Für den Nachweis der technischen Realisierbarkeit der vorgestellten Ideen, sind die verwendeten Methoden ausreichend.

6.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit beschriebenen Konzepte wurden jeweils eigenständig realisiert. Dieses Vorgehen ist der besseren Handhabbarkeit bei Probandenversuchen geschuldet. Für die Integration des Gesamtsystems in ein Werkerassistenzsystem wäre die Verschaltung der einzelnen Module notwendig. Wie bereits erwähnt, muss dazu jedes Modul den Informationsaustausch in einer abstrakten Form implementieren und über die definierten Schnittstellen miteinander kommunizieren. Mit diesem Vorgehen sind die vorgestellten technischen Realisierungen der Einzelkomponenten miteinander kombinierbar.

Die Information über die durchzuführenden Arbeitsvorgänge des Werkers, sowie die zugehörigen Arbeitsanweisungen, sind bereits im Montageablaufplan enthalten. Somit könnte man das vorgestellte System als agentenbasierten Ansatz einer vernetzten Industriemaschine verstehen. Für die eingangs erwähnten Konzepte zur Industrie 4.0 bedeutet dies einen Vorteil, da noch nicht jedes Produktionsverfahren rein maschinell durchführbar ist. Gewisse Tätigkeiten müssen heutzutage noch in manueller Montage durchgeführt werden, wie z. B. bei der Einzelproduktion oder bei der Kleinserienfertigung. Mit dem digitalen Werkerassistenzsystem würden auch manuelle Arbeitsstationen zu einem Teil der vernetzten Fabrik der Zukunft werden.

Für den regelbasierten Montageablaufplan-Assistenten würde eine Anpassung z. B. an die Bedingungen der Industrie 4.0 relativ einfach durchführbar sein. Um den agentenbasierten Ansatz zu realisieren, würde der regelbasierte Montageablaufplan mit dem Werkstück mitgeführt werden. Der Montageablaufplan-Assistent kann dann diesen „vor Ort“ auslesen, interpretieren und die für die manuelle Montage notwendige Arbeitsanweisung extrahieren. Diese Arbeitsanweisung würde anschließend vom Anzeigemodul der Arbeitsstation interpretiert und dargestellt werden. Somit sind die untersuchten Konzepte zu Methoden der Industrie 4.0 kompatibel. Die manuelle Arbeit eines Werkers ließe sich somit in den Produktionsablauf ebenfalls integrieren.

Mit der Weiterentwicklung von autonomen Produktionsmaschinen kann der Fall eintreten, dass die manuelle Montage in der Fertigung nicht mehr benötigt wird. Es ist jedoch kaum vorstellbar, eine Fabrikumgebung ohne Menschen betreiben zu können. Bereits für den Fall der Wartung oder Fehlerbehebung ist die Arbeit eines Werkers wahrscheinlich notwendig. So könnte der in dieser Dissertation vorgestellte Ansatz eines Assistenzsystems auch für den Zweck der Fehlerbehebung eingesetzt werden. Da der Montageablaufplan eine generische Definition der Arbeitsanweisungen beinhaltet, könnte die enthaltene Information ebenso als Grundlage für Anleitungen dienen. In diesem Fall würde nicht die Montage eines Produkts beschrieben werden, sondern das

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Vorgehen im Fehlerfall. Vergleichbare Konzepte existieren bereits z. B. bei Kopiergeräten zum Entfernen eines Papierstaus. Die Anzeigekomponente des Assistenzsystems kann dann dem Werker Instruktionen präsentieren, die für die Behebung des Fehlers hilfreich sind.

Erste Schritte zur Verwirklichung eines solchen modularen Werkerassistenzsystems wurden im Rahmen dieser Arbeit gemacht. Prototypisch wurde das Konzept des kontaktanalogen Hervorhebens zur Instruktion eines Werkers beim Verpacken eines TV-Geräts im Projekt CustomPacker (vgl. Abschnitt 2.3.2) angewendet. Hier wird der Werker mittels Lichtfeldern Positions-basiert durch den Einpackvorgang des Produkts geleitet. Die Visualisierung der Felder erfolgt dabei auf dem Boden der Fabrik. Das Betreten oder Verlassen dieser Felder löst einen Event aus, der vom übergeordneten Werkerassistenzsystem ausgewertet wird und anschließend Assistenzinformationen zum Verpackvorgang in natürlicher Sprache ausgibt. Da es sich bei diesem Szenario jedoch nicht um die Montage eines Produkts handelt, wurde in dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen. Es unterstreicht jedoch den Anspruch der Generalisierbarkeit der dieser Arbeit zugrundeliegenden Konzepte, da sie erfolgreich in der beschriebenen Domäne angewendet werden konnten. Die Effizienz dieser prototypischen Implementierung des Systems konnte durch Messen der Dauer der Verpackvorgänge überprüft werden. Ungeübte Werker konnten mit dem System sofort ein für sie neues Produkt verpacken. Somit stellen die vorgestellten Konzepte eine gute Grundlage dar, ein industriell anwendbares Werkerassistenzsystem zu realisieren.

Glossar

Arbeitsanweisung

Beschreibung des durchzuführenden Arbeitsschritts einer Montagetätigkeit

Arbeitsvorgang

Zusammengefasster Teilprozess während der Montage eines Produkts

Arbeitsmittel

Werkzeuge, einschließlich Hardware und Software, Maschinen, Fahrzeuge, Geräte, Möbel etc. [2]

Arbeitsschritt

Durchzuführender Einzelschritt während eines Arbeitsvorgangs einer Montageaufgabe

Arbeitsstation

Ort in einer Fabrikumgebung, an welchem die Montageaufgabe durchgeführt wird

Baugruppe

„Bezeichnung für eine Gruppe von Einzelteilen, die als Einheit in das Endprodukt eingeht“ [3].

Bauteil

„Oberbegriff für alle Fertigungsobjekte: Endprodukte, Zwischenprodukte, Baugruppen, Einzelteile, Ersatzteile, Materialien, Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe“ [3].

Hier: kleinste granulare Einheit, die bei der Herstellung von Produkten verbaut wird.

Bildregion

Fläche in einer GUI, die eine Bilddatei enthält

Blob

Zusammenhängende Pixel-Menge (meist innerhalb von Filtermasken)

Bounding Box

Umgebende geometrische Struktur um einen Blob (in dieser Dissertation meist rechteckig)

Crash-Bobby

kleiner Roboter, bestehend aus Mechanik, Aktoren und Steuerungsplatine

Detailgrad

Grad der enthaltenen Information einer Arbeitsanweisung

Einzelproduktion

„Die Einzelproduktion ist die typische Form der Auftragsfertigung“ [3]. Bei der Einzelproduktion wird nur ein Produkt mit Losgröße 1 hergestellt (z. B. speziell angefertigte Produkte).

Event

Abstraktes Werker-Ereignis, das bei der Assistenz als Input verwendet wird (vgl. Trigger)

Fertigung

Ingenieurwissenschaftlicher Terminus für die montierende Produktion (nach [3]).

Fischertechnik-Auto

aus Fischertechnik zusammengesetztes Auto

Großserienfertigung

Bei der Großserienfertigung werden Produkte mit großen Losgrößen hergestellt (z. B. Autos). Diese Produkte weisen eine geringe Variantenvielfalt auf.

hybride Produktion

Bei der hybriden Produktion erfolgt die Produktion der Produkte teil-automatisch (mit menschlicher Beteiligung)

Jess Fact

Faktum in der Programmiersprache Jess [83]

Jess Query

Wissensabfrage in der Programmiersprache Jess [84]

Jess Rule

Regel in der Programmiersprache Jess [85]

Kalibrierung

Bestimmung des mathematischen Zusammenhangs zwischen verschiedenen Systemen

Kinect

Tiefenbildkamera Microsoft Kinect

Kleinserienfertigung

Bei der Kleinserienfertigung werden Produkte mit sehr kleinen bis geringen Losgrößen hergestellt.

Kognitive Fabrik

Bei der Kognitiven Fabrik handelt es sich um eine Fabrikumgebung im Versuchslabor, die mehrere Forschungsprojekte vereint.

kontaktanalog

Integration von anzuzeigenden Objekten direkt in die umgebene Szenerie, was ein Verschmelzen mit der Umwelt nach sich zieht (nach [65])

LEGO

Konstruktionsspielzeug aus Kunststoff-Steinen und anderen standardisierten Komponenten, die sich mit spezieller Nut und Feder zusammensetzen lassen

Los

„Geschlossener Posten einer Produktart oder einer Baugruppe, der ohne Unterbrechung durch die Produktion anderer Produktarten erzeugt wird.“ [3]

Losgröße

Anzahl an Produkten bzw. Baugruppen innerhalb eines Loses

MATLAB

„MATLAB® ist eine Programmiersprache und interaktive Umgebung für numerische Berechnungen, Visualisierung und Programmierung.“ [86]

manuelle Produktion

Bei der manuellen Produktion erfolgt die Produktion der Produkte vollständig manuell (ohne maschinelle Beteiligung)

Massenproduktion

„Elementartyp der Produktion (Produktionstypen). Bei sehr großem Produktionsvolumen kann der Betrieb von der Serienproduktion zur Massenproduktion übergehen, indem er nur noch ein Produkt in unbegrenzter Zahl herstellt“ [3].

Mittelserienfertigung

Die Mittelserienfertigung ist das Bindeglied zwischen Einzelproduktion und Kleinserienfertigung zu Großserienfertigung und Massenproduktion.

Montage

Vorgang der Zusammenführung von einzelnen Bauteilen hin zum fertigen Produkt

Montageablaufplan

Beschreibung der durchzuführenden Montageaufgabe

Montageaufgabe

Montage eines komplexen Produkts

Montagetätigkeit

Durchzuführender Einzelschritt während eines Arbeitsvorgangs einer Montageaufgabe

Nutzer

Benutzer einer GUI. In dieser Dissertation gilt – soweit nicht anders angegeben – der Begriff *Nutzer*¹ als Synonym für den Werker, der Teile oder den gesamten entwickelten Montageablaufplan-Assistenten verwendet.

OpenNI

Open source SDK zur Entwicklung von 3D-Middleware Bibliotheken und Applikationen

Optical Flow

optischer Fluss

Pick-by-Light

„Kommissionieren nach Licht“ [70]

Pixel

Bildpunkt

Produkt

„Ergebnis der Produktion und Sachziel einer Unternehmung oder auch Mittel der Bedürfnisbefriedigung“ [3]. Hier: Objekt, das bei der industriellen Produktion hergestellt wird.

Produktfamilie

„Eine Gruppe von Produkten oder Dienstleistungen, die ein ähnliches Marktbedürfnis erfüllen“ [87].

Produktion

„Prozess der zielgerichteten Kombination von Produktionsfaktoren (Input) und deren Transformation in Produkte“ [3]. Die Zusammenfassung der Fertigung und Montage.

Qt

Cross-platform application and UI framework

¹Anmerkung: In dieser Dissertation wird lediglich aus Gründen der Vereinfachung die männliche Form des Begriffs *Nutzer* verwendet, obwohl der Bezug auf beide Geschlechter gemeint ist.

Schaltfläche

Taster in einer GUI zur Interaktion mit einem Nutzer

Serienproduktion

Bei der Serienproduktion „werden größere, aber begrenzte Stückzahlen von unterschiedlichen Produkten“ erzeugt [3].

Sortenproduktion

Bei der Sortenproduktion „werden größere, aber begrenzte Stückzahlen von Varianten einer Produktart nacheinander auf den gleichen Produktionsanlagen“ erzeugt [3].

Textbox

Feld in einer GUI zur Ein- oder Ausgabe von Text

Tracking

Verfolgung

Trigger

Abstraktes Montage-Ereignis, das bei der Assistenz als Input verwendet wird (vgl. Event)

Usability

Gebrauchstauglichkeit [65]

Werkeraktion

Tätigkeit, die der Werker im Augenblick der Beobachtung durchführt

Werker

arbeitender Benutzer¹ [2]

¹Anmerkung: In dieser Dissertation wird lediglich aus Gründen der Vereinfachung die männliche Form des Begriffs *Werker* verwendet, obwohl der Bezug auf beide Geschlechter gemeint ist.

Abkürzungsverzeichnis

ACIPE	Adaptive Cognitive Interaction in Production Environments
AR	Augmented Reality
CCA	Connected Components Algorithmus
CoTeSys	Cognition for Technical Systems
CustomPacker	Highly Customizable and Flexible Packaging Station for mid- to upper sized Electronic Consumer Goods using Industrial Robots
GUI	Graphical User Interface
HMD	Head-mounted Display
HMM	Hidden-Markov-Modell
HUD	Head-up Display
JAHIR	Joint Action for Humans and Industrial Robots
Jess	Java Expert System Shell
MRK	Mensch-Roboter Kooperation
MSE	mittlerer quadratischer Fehler
OpenCV	Open Source Computer Vision Library
PPMMK	Praktikum Praxis der Mensch-Maschine-Kommunikation am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der Technische Universität München

Abkürzungsverzeichnis

PROLOG	Programmieren in Logik
RFID	Radio-Frequency Identification
ROI	Region Of Interest
SUS	System Usability Scale [88]
UI	User Interaction
VP	Versuchsperson
VTT	VTT Technical Research Centre of Finland
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition

Symbolverzeichnis

$\vec{0}$	Nullpunkt eines Koordinatensystems
a_{ij}	Eintrag in Matrix A
A	Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix
\mathbf{A}_{ij}	Beschreibung der Koordinatentransformation von Koordinatensystem i in j
B	Beobachtungsmatrix
b	Bildbreite
b_{jk}	Eintrag in Matrix B
D	Deformationsmatrix
\vec{d}	Translationsvektor
D	Differenzbild
D_{bw}	binarisiertes Differenzbild
δ	verschobener Bildbereich
$\delta_i(i)$	höchste Wahrscheinlichkeit entlang des i -ten Viterbi-Pfades
E	Einheitsmatrix
\vec{e}	Vektor
ε	mittlerer quadratischer Fehler
η	Bildänderung in y -Richtung
F	Kamerabild
$f(O)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
F^L	pyramidale Darstellung von F der Stufe L
F_t	Bild zum Zeitpunkt t
F_{t+T}	Bild zum Zeitpunkt $t + T$
G	Kamerabild F einen Zeitschritt später
h	Bildhöhe
K	Koeffizientenmatrix

Symbolverzeichnis

L	Stufe der Pyramide
λ	Parametersatz eines HMM
L_{\max}	maximale Stufe der Pyramide
\mathbf{M}	Mittelwertmatrix
M	Anzahl der Emissionen
μ	Mittelwert
N	Anzahl
n	Rauschfunktion
n_x^L	Größe der Pyramide in x -Richtung
n_y^L	Größe der Pyramide in y -Richtung
O	zeitdiskrete Beobachtung
\vec{p}	Pixel
P	Wahrscheinlichkeit
$P(E)$	Fehlerrate
$P(R)$	Erkennungsrate
π	Anfangswahrscheinlichkeit
$\psi_t(j)$	Array mit Pfadwahrscheinlichkeiten
q	zeitdiskreter Zustand
\hat{q}	geschätzter zeitdiskreter Zustand
\vec{q}	Pixel \vec{p} einen Zeitschritt später
\underline{Q}	Menge aller zeitdiskreten Zustände
\hat{Q}	geschätzter Viterbipfad
R	region of interest
RSU	reduzierte System Usability
\mathbf{R}	Rotationsmatrix
s	Zustand
\hat{s}	geschätzter Zustand s
s_B	Zustand Montagebeginn
s_E	Zustand Montageende
s_I	Zustand für Einsprung in Sub-HMM
s_O	Zustand für Aussprung aus Sub-HMM
S	Menge aller Zustände
SU	System Usability
σ	Kovarianz
Σ	Kovarianzmatrix
t	kontinuierliche Zeitveränderliche
T	Periodendauer
\mathbf{T}	Translationsmatrix
τ	ein Zeitschritt t
V	Menge aller Beobachtungen

v	Beobachtung
w	Gewichtsfunktion
w_x	Größe von W in x -Richtung
w_y	Größe von W in y -Richtung
W	Suchfenster
W_i	Bewertung auf SUS der Frage i
x	Koordinate x
x'	x -Koordinate der projizierten Welt-Koordinaten
x_K	Kamera-Koordinate x
\vec{x}	Vektor
\vec{x}_i	homogener Koordinaten-Vektor im Referenzsystem i
X_W	Welt-Koordinate X
ξ	Bildänderung in x -Richtung
y	Koordinate y
y'	y -Koordinate der projizierten Welt-Koordinaten
y_K	Kamera-Koordinate y
Y_W	Welt-Koordinate Y
Z_W	Welt-Koordinate Z

Abbildungsverzeichnis

1.1	Komponenten des Werkerassistenzsystems	3
2.1	Einzelplatzmontage	10
2.2	Linienmontage	11
2.3	Baustellenmontage	13
2.4	Montageinsel	15
2.5	Hybrides Montagesystem	17
2.6	ACIPE Versuchsaufbau	19
2.7	JAHIR Versuchsaufbau	21
2.8	CustomPacker Versuchsaufbau	22
3.1	Beispiel eines Stammbaums	28
3.2	Auto aus Fischertechnik	41
3.3	Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos in Jess-Notation	42
3.4	Montageablaufplan des Fischertechnik-Autos in Graphendarstellung	42
3.5	Jess Test-GUI	43
3.6	Arbeitsanweisung der Test-GUI	46
4.1	Arbeitsstation überwacht mit Microsoft Kinect	51
4.2	Kinect Sensor	53
4.3	IR-Lichtmuster und Tiefenbild	54
4.4	Kinect-Aufnahme überlagert mit Drahtmodell	56
4.5	Box-Erkennung	59
4.6	Überwachung der Werkeraktionen	63
4.7	Überwachung der Werkeraktionen: Greifprozess	64
4.8	Überwachung der Werkeraktionen: Flex-Box	65

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

4.9	Handwechsel	68
4.10	Einfluss des Glättungsfaktors auf die Handverfolgungskriterien	68
4.11	Daten Versuchsperson A	70
4.12	Daten Versuchsperson B	71
4.13	Vergleich erfahrener Werker mit Versuchsperson A und B	72
4.14	Beispielaufnahme des überwachten Arbeitsplatzes	75
4.15	Crash-Bobby – Ein kleiner Roboter	76
4.16	Crash-Bobby nach Arbeitsvorgang 3	77
4.17	Crash-Bobby nach Arbeitsvorgang 6	78
4.18	Crash-Bobby nach Arbeitsvorgang 8	79
4.19	Bildung eines Differenzbildes	82
4.20	Strukturierendes Element	83
4.21	Aufbereitetes Filtermaske	85
4.22	Beispiel einer Filtermaske	85
4.23	Gelabelte Beispielmaske	86
4.24	In Regionen aufgeteilte Filtermaske	87
4.25	Reduzierte Filtermaske	87
4.26	Werker-Aufnahme nach der Bewegungsanalyse	88
4.27	Schematische Darstellung des Optical Flow	90
4.28	Schematische Darstellung einer pyramidalen Abbildung	93
4.29	Markov-Modell	99
4.30	HMM	100
4.31	Trellis-Diagramm	102
4.32	Decodierung im Trellis-Diagramm	103
4.33	Verarbeitungskette Optical Flow	105
4.34	Links-Rechts-Modell des HMMs zur Arbeitsvorgangserkennung	107
4.35	Detailansicht des Arbeitsvorgangs zur Montage der Hauptplatine	108
4.36	Ergebnis Testvideo 7	113
5.1	Arbeitsanweisung in Papierform	120
5.2	XML-basierter Montageablaufplan	122
5.3	Beispiel einer XML Schema Definition	123
5.4	Umrechnung des SUS-Wertes	125
5.5	Konzeptentwurf der Montageablaufplan-GUI	126
5.6	Hauptmenü der Montageablaufplan-GUI	127
5.7	Menü-Leiste der Montageablaufplan-GUI	129
5.8	Navigationsmenü der Montageablaufplan-GUI	130

5.9	Hauptbereich der Montageablaufplan-GUI	131
5.10	GUI-Demonstrator in der Startansicht	133
5.11	GUI-Demonstrator in der Arbeitsschritt-Ansicht	135
5.12	GUI-Demonstrator in der Arbeitsanweisungs-Ansicht	136
5.13	Versuchsaufbau zur Montageablaufplan-GUI	138
5.14	Ergebnisse des Vorversuchs	140
5.15	Ergebnisse des ersten Frageblocks	143
5.16	Ergebnisse des zweiten Frageblocks	144
5.17	Ergebnisse des dritten Frageblocks	146
5.18	Ergebnisse des vierten Frageblocks	147
5.19	Schematisches Produkt	151
5.20	Google Image Swirl	152
5.21	Belegung einer Werkzeugwand	153
5.22	Anzeigekonzept Context-Bubble	154
5.23	Anzeigekonzept kontaktanaloges Pick-by-Light	155
5.24	Anzeigekonzept Visual Guidance	157
5.25	Versuchsaufbau zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen	159
5.26	Beispielbild zur Kamera-Kalibrierung	161
5.27	Koordinatensysteme im Versuchsaufbau	161
5.28	AR-Marker	162
5.29	Demonstrator zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen	165
5.30	Realisierung der Context-Bubble	167
5.31	Realisierung des kontaktanalogen Pick-by-Light	168
5.32	Realisierung der Visual Guidance	170
5.33	Evaluierung des Demonstrators zur kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen	170
5.34	Produkte zur Evaluierung der kontaktanalogen Darstellung von Arbeitsanweisungen	172
5.35	Ergebnisse des Context-Bubble-Konzepts	174
5.36	Ergebnisse des kontaktanalogen Pick-by-Light-Konzepts	175
5.37	Ergebnisse des Visual Guidance-Konzepts	176

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Tabellenverzeichnis

2.1	Vor- und Nachteile der Einzelplatzmontage	10
2.2	Vor- und Nachteile der Linienmontage	12
2.3	Vor- und Nachteile der Baustellenmontage	14
2.4	Vor- und Nachteile der Montageinsel	16
2.5	Vor- und Nachteile der hybriden Montagesysteme	18
3.1	Aufteilung von Montageprozessen	24
4.1	Erkennungsrate des Systems zur Erkennung eines Greifereignisses . .	73
4.2	Bauteile des Crash-Bobby	76
4.3	Erkennungsraten der Testsequenzen	111

TABELLENVERZEICHNIS

Literaturverzeichnis

- [1] P.-M. ZIEGLER. **Losgröße 1 – Wie IT die industrielle Produktion revolutionieren soll.** *c't 2013, Heft 26*, Seiten 82–87, 2013.
- [2] NORMENAUSSCHUSS ERGONOMIE (NAERG). **DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2004); Deutsche Fassung EN ISO 6385:2004.** DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2004.
- [3] GABLER VERLAG (HERAUSGEBER). **Gabler Wirtschaftslexikon.** <http://wirtschaftslexikon.gabler.de>, 2012.
- [4] A. SCHLEGEL. **Konzeption und Einsatzvorbereitung eines Werkzeuges für die Bestimmung der Prozessqualität mittels Kennzahlenüberwachung und wissensbasierter Simulation.** Dissertation, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz, Chemnitz, 2002.
- [5] B. LOTTER UND H. WIENDAHL. **Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis.** VDI-Buch. Springer, 2006.
- [6] M. F. ZAEH, M. BEETZ, K. SHEA, G. REINHART, K. BENDER, C. LAU, M. OSTGATHE, W. VOGL, M. WIESBECK, M. ENGELHARD, C. ERTELT, T. RÜHR, M. FRIEDRICH, UND S. HERLE. **The Cognitive Factory.** In *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, H. A. ELMARAGHY, Editor, Springer Series in Advanced Manufacturing, Seiten 355–371. Springer London, 2009.
- [7] A. BANNAT, J. GAST, G. RIGOLL, UND F. WALLHOFF. **Event Analysis and Interpretation of Human Activity for Augmented Reality-based Assistant Systems.** In *Proc. IEEE Intern. Conference on Intelligent Computer Communication and Processing ICCP 2008*, Cluj-Napoca, Romania, 2008. IEEE. 28-30.08.2008.
- [8] W. DANGELMAIER. **Theorie der Produktionsplanung und -steuerung: Im Sommer keine Kirschpralinen?** VDI-Buch. Springer, 2009.

LITERATURVERZEICHNIS

- [9] R. MÜLLER. **Planung hybrider Montagesysteme auf Basis mehrschichtiger Vorranggraphen.** Dissertation, Institut für Arbeitswissenschaften und Betriebsorganisation (ifab) der Universität Karlsruhe, Aachen, 2002.
- [10] G. SPUR UND T. STÖFERLE. **Handbuch der Fertigungstechnik: herausgegeben Günter Spur, Theodor Stöferle. Fügen, Handhaben und Montieren.** Handbuch der Fertigungstechnik V. Carl Hanser GmbH, 1986.
- [11] VDI-GESELLSCHAFT PRODUKTION UND LOGISTIK. **VDI Richtlinie 2860: Montage-und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.** Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, 1990.
- [12] P. ROSS. **Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung.** Technischer Bericht Band 170, Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, München, 2002.
- [13] WIKIPEDIA. **Expert system.** http://en.wikipedia.org/wiki/Expert_system, 2013.
- [14] M. HANUS. **Problemlösen mit PROLOG.** MikroComputer-Praxis. Teubner, 1987.
- [15] C. L. FORGY. **Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem.** *Artificial Intelligence*, **19**(1):17 – 37, 1982.
- [16] SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **Java Expert System Shell (JESS) – The Rete Algorithm.** <http://www.jessrules.com/docs/71/rete.html>, 2013.
- [17] D. KOSMOPOULOS, A. VOULODIMOS, UND A. DOULAMIS. **A System for Multicamera Task Recognition and Summarization for Structured Environments.** *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, **9**(1):161–171, Februar 2013.
- [18] A. VOULODIMOS, H. GRABNER, D. KOSMOPOULOS, L. VAN GOOL, UND T. VARVARIGOU. **Robust workflow recognition using holistic features and outlier-tolerant fused hidden Markov models.** *Artificial Neural Networks–ICANN 2010*, Seiten 551–560, 2010.
- [19] A. BOBICK UND J. DAVIS. **The recognition of human movement using temporal templates.** *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, **23**(3):257–267, 2001.
- [20] D. WEINLAND, R. RONFARD, UND E. BOYER. **Free viewpoint action recognition using motion history volumes.** *Computer Vision and Image Understanding*, **104**(2-3):249–257, 2006.
- [21] B. FREEDMAN, A. SHPUNT, M. MACHLINE, UND Y. ARIELI. **Depth mapping using projected patterns,** 2010. Patent-Nr.: US 2010/0118123 A1, PrimeSense LTD.
- [22] WIKIPEDIA. **Kinect.** <http://en.wikipedia.org/wiki/Kinect>, Juli 2012.
- [23] J. KORTELAINEN, A. BANNAT, J. BLUME, UND P. LEHTONEN. **Detection and recognition module of worker activity and motions within cell.** Deliverable D2.2, FP7 EU-Project Custom-Packer, 2012.

- [24] PRIMESENSE. **Prime Sensor™ NITE 1.3 – Algorithms notes**. <http://pr.cs.cornell.edu/humanactivities/data/NITE.pdf>, 2009.
- [25] M. SORIANO, S. HUOVINEN, B. MARTINKAUPPI, UND M. LAAKSONEN. **Skin Detection in Video under Changing Illumination Conditions**. In *Proc. 15th International Conference on Pattern Recognition*, Seiten 839–842, Barcelona, Spain, 2000.
- [26] OPENCV. **How to Use Background Subtraction Methods**. http://docs.opencv.org/trunk/doc/tutorials/video/background_subtraction/background_subtraction.html, 2013.
- [27] B. SCHULLER. **Automatische Emotionserkennung aus sprachlicher und manueller Interaktion**. Dissertation, Technische Universität München, München, 2006.
- [28] J. SCHENK. **Online-Erkennung handgeschriebener Whiteboard-Notizen**. Dissertation, Technische Universität München, München, 2009.
- [29] C. MAYER. **Facial Expression Recognition With A Three-Dimensional Face Mode**. Dissertation, Technische Universität München, München, 2012.
- [30] P. HABERÄCKER. **Digitale Bildverarbeitung: Grundlagen und Anwendungen - 4., durchgesehene Auflage**. Carl Hanser Verlag München Wien, 1991.
- [31] R. STEINBRECHER. **Bilderverarbeitung in der Praxis**. R. Oldenbourg Verlag, München, 1993.
- [32] M. JANKOWSKI UND J.-P. KUSKA. **Connected components labeling - algorithms in Mathematics, Java, C++ and C-sharp**. In *P. Mitic, Ch. Jacob, J. Crane (Eds.) New Ideas in Symbolic Computation: Proceedings of the 6th Mathematica Symposium, Positive Corporation Ltd. Hampshire, UK*, 2004.
- [33] N. PADOY, D. MATEUS, D. WEINLAND, M.-O. BERGER, UND N. NAVAB. **Workflow Monitoring based on 3D Motion Features**. In *Workshop on Video-Oriented Object and Event Classification, VOEC'09 in Conjunction with ICCV 2009*, Seiten 585–592, Kyoto, Japan, September 2009. IEEE. Best paper.
- [34] B. D. LUCAS UND T. KANADE. **An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision (IJCAI)**. In *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81)*, Seiten 674–679, April 1981.
- [35] J.-Y. BOUGUET. **Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the algorithm**, 2000.
- [36] F. SCHWEIGER, B. ZEISL, P. GEORGEL, G. SCHROTH, E. STEINBACH, UND N. NAVAB. **Maximum Detector Response Markers for SIFT and SURF**. In *Vision, Modeling and Visualization Workshop (VMV)*, Brunswick, Germany, November 2009.
- [37] J. SHI UND C. TOMASI. **Good Features to Track**. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94)*, Seiten 593 – 600, 1994.
- [38] J. GALLIER. **Geometric Methods and Applications: For Computer Science and Engineering**. Texts in Applied Mathematics Series. Springer, 2011.

LITERATURVERZEICHNIS

- [39] E. W. WEISSTEIN. **Affine Transformation**. <http://mathworld.wolfram.com/AffineTransformation.html>, 2011.
- [40] C. TOMASI UND T. KANADE. **Detection and Tracking of Point Features**. Technischer Bericht CMU-CS-91-132, CMU, 1991.
- [41] L. RÅDE, B. WESTERGREN, UND P. VACHENAUER. **Springers Mathematische Formeln: Taschenbuch Für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Informatiker, Wirtschaftswissenschaftler**. Springer, 2000.
- [42] G. MERZIGER UND T. WIRTH. **Repetitorium der höheren Mathematik**. Binomi, 1991.
- [43] N. PADOY, T. BLUM, H. FEUSSNER, M.-O. BERGER, UND N. NAVAB. **On-line recognition of surgical activity for monitoring in the operating room**. In *Proceedings of the 20th national conference on Innovative applications of artificial intelligence - Volume 3*, Seiten 1718–1724. AAAI Press, 2008.
- [44] T. BLUM, N. PADOY, H. FEUSSNER, UND N. NAVAB. **Modeling and Online Recognition of Surgical Phases Using Hidden Markov Models**. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2008*, D. METAXAS, L. AXEL, G. FICHTINGER, UND G. SZÉKELY, Editoren, **5242** von *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 627–635. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [45] A. STOLCKE UND S. OMOHUNDRO. **Hidden Markov model induction by Bayesian model merging**. In *Advances in Neural Information Processing Systems - Volume 5*, S. J. HANSON, J. D. COWAN, UND C. L. GILES, Editoren. Morgan Kaufmann, California, 1993.
- [46] A. STOLCKE UND S. OMOHUNDRO. **Inducing Probabilistic Grammars by Bayesian Model Merging**. In *Grammatical Inference and Applications (ICGI-94)*, R. C. CARRASCO UND J. ONCINA, Editoren, Seiten 106–118. Springer, Berlin, Heidelberg, 1994.
- [47] P. SMYTH, D. HECKERMAN, UND M. JORDAN. **Probabilistic Independence Networks for Hidden Markov Probability Models**. Technischer Bericht A.I. Memo No. 1565, C.B.C.L. Memo No. 132, Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, 1996.
- [48] L. R. RABINER. **A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition**. *Proceedings of the IEEE - Volume 77*, **77**(2):257–286, 1989.
- [49] M. BICEGO, D. GONZALEZ-JIMENEZ, E. GROSSO, UND J. A. CASTRO. **Generalized Gaussian Distributions for Sequential Data Classification**. In *Pattern Recognition. ICPR 2008. 19th International Conference on*, Seiten 1–4. IEEE, 2008.
- [50] A. P. DEMPSTER, N. M. LAIRD, UND D. B. RUBIN. **Maximum likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm**. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, Seiten 1–38, 1977.
- [51] J. A. BILMES ET AL. **A gentle tutorial of the EM algorithm and its application to parameter estimation for Gaussian mixture and hidden Markov models**. Technischer Bericht Band 510, International Computer Science Institute, Berkeley, 1998.

- [52] J. G. DAVID FORNEY. **The Viterbi Algorithm: A Personal History**. *arXiv preprint cs/0504020*, April 2005.
- [53] J. G. DAVID FORNEY. **The Viterbi Algorithm**. *Proceedings of the IEEE*, **61**(3):268–278, 1973.
- [54] D. STAVENS. **CS 223-B: Introduction to Computer Vision - Lecture Materials - Introduction to OpenCV**. http://robots.stanford.edu/cs223b05/notes/CS%20223-B%20T1%20stavens_opencv_optical_flow.pdf, 2005.
- [55] G. BRADSKI UND A. KAEHLER. **Learning OpenCV**. O'Reilly Media, 1. Edition, 2008.
- [56] M. DUNHAM, K. MURPHY, ET AL. **PMTK3 – Probabilistic Modeling Toolkit for Matlab/Octave**. <https://github.com/probml/pmtk3>, 2013.
- [57] T. F. REHRL. **Multimodale Mensch-Roboter-Interaktion für Ambient Assisted Living**. Dissertation, Technische Universität München, München, 2013.
- [58] S. FEINER, B. MACINTYRE, UND D. SELIGMANN. **KARMA – Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance**. <http://monet.cs.columbia.edu/projects/karma/karma.html>, 1993.
- [59] D. WILLERS. **Augmented Reality at Airbus**. In *Interantional Symposium on Mixed & Augmented Reality*, 2006.
- [60] W. FRIEDRICH. **ARVIKA Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service**. Technischer Bericht, Siemens AG, A&D GT4, 2009.
- [61] J. SÄÄSKI, A. LANGLEY, UND T. SALONEN. **Augmented Reality in Factory Environments - System Usability and Human Factors Studies**. In *3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE2010)*, P. VINK UND J. KANTOLA, Editoren, Seiten 17–20, Miami, Florida, USA, Juli 2010. CRC Press. Advances in Occupational, Social, and Organizational Ergonomics.
- [62] W3C. **Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition)**. <http://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126/>, November 2008.
- [63] W3SCHOOLS. **XML Validator**. http://www.w3schools.com/xml/xml_validator.asp, Februar 2014.
- [64] NORMENAUSSCHUSS ERGONOMIE (NAERG). **DIN EN ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010); Deutsche Fassung EN ISO 9241-210:2010**. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2011.
- [65] M. ABLASSMEIER. **Multimodales, kontextadaptives Informationsmanagement im Automobil**. Dissertation, Technische Universität München, München, 2009.
- [66] J. BROOKE. **SUS: A quick and dirty usability scale**. In *Usability evaluation in industry*, P. W. JORDAN, B. WEERDMEESTER, A. THOMAS, UND I. L. MCLELLAND, Editoren. Taylor and Francis, London, 1996.

LITERATURVERZEICHNIS

- [67] MATTHIAS RAUER. **Quantitative Usability-Analysen mit der System Usability Scale (SUS) - //SEIBERT/MEDIA Weblog.** <http://blog.seibert-media.net/2011/04/11/usability-analysen-system-usability-scale-sus/>, April 2011.
- [68] WIKIPEDIA. **Boxplot.** <http://de.wikipedia.org/wiki/Boxplot>, August 2013.
- [69] C. STOESEL, M. WIESBECK, S. STORK, M. ZAEH, UND A. SCHUBOE. **Towards Optimal Worker Assistance: Investigating Cognitive Processes in Manual Assembly.** In *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, M. MITSUISHI, K. UEDA, UND F. KIMURA, Editoren, Seiten 245–250. Springer London, 2008.
- [70] WIKIPEDIA. **Pick-by-Light.** <http://de.wikipedia.org/wiki/Pick-by-Light>, 2013.
- [71] WIKIPEDIA. **Google Image Swirl.** http://en.wikipedia.org/wiki/Google_Image_Swirl, 2013.
- [72] Y. JING, H. ROWLEY, C. ROSENBERG, J. WANG, M. ZHAO, UND M. COVELL. **Google image swirl, a large-scale content-based image browsing system.** In *Multimedia and Expo (ICME), 2010 IEEE International Conference on*, Seiten 267–267, 2010.
- [73] INTERNET’S BEST SECRETS. **Image Search with Google Image Swirl.** <http://www.internetbestsecrets.com/2009/11/google-news.html>, 2009.
- [74] T. M. POITSCHKE. **Blickbasierte Mensch-Maschine Interaktion im Automobil.** Dissertation, Technische Universität München, München, 2011.
- [75] T. POITSCHKE, F. LAQUAI, UND G. RIGOLL. **Guiding a Driver’s Visual Attention Using Graphical and Auditory Animations.** In *Proc. Int. Conf. on Human-Computer Interaction HCI 2009, San Diego, CA, USA*, D. HARRIS, Editor, **LNAI 5639**, Seiten 424–433. Springer, 2009. 19.-24.07.2009, Engin. Psychol. amd Cog. Ergonomics.
- [76] Z. ZHANG. **A flexible new technique for camera calibration.** *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, **22(11)**:1330–1334, 2000.
- [77] WIKIPEDIA. **Homogeneous coordinates.** http://en.wikipedia.org/wiki/Homogeneous_coordinates, 2013.
- [78] OPENCV. **Camera calibration With OpenCV.** http://docs.opencv.org/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html, 2013.
- [79] H. KATO UND M. BILLINGHURST. **Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system.** In *Augmented Reality, 1999. (IWAR '99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop on*, Seiten 85–94, 1999.
- [80] G. FALCAO, N. HURTOS, UND J. MASSICH. **Plane-based calibration of a projector-camera system.** Technischer Bericht Band 9, Institute of Informatics and Applications, University of Girona, 2008.
- [81] A. BANNAT, J. GAST, T. REHRL, W. RÖSEL, G. RIGOLL, UND F. WALLHOFF. **A Multimodal Human-Robot-Interaction Scenario: Working Together with an Industrial Robot.** In *Proc.*

Int. Conf. on Human-Computer Interaction HCI 2009, San Diego, CA, USA, J. JACKO, Editor, **LNCS 5611**, Seiten 303–311. Springer, 2009. 19.-24.07.2009, Human-Computer Interaction. Novel Interaction Methods and Techniques , ISBN 978-3-642-02576-1.

- [82] OPENCV. **Feature Detection**. http://docs.opencv.org/doc/tutorials/features2d/feature_detection/feature_detection.html, 2014.
- [83] SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **Java Expert System Shell (JESS) – Working Memory**. <http://www.jessrules.com/docs/71/memory.html>, 2013.
- [84] SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **Java Expert System Shell (JESS) – Querying Working Memory**. <http://www.jessrules.com/docs/71/queries.html>, 2013.
- [85] SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **Java Expert System Shell (JESS) – Making Your Own Rules**. <http://www.jessrules.com/docs/71/rules.html>, 2013.
- [86] MATHWORKS DEUTSCHLAND. **MATLAB – The Language of Technical Computing**. <http://www.mathworks.de/products/matlab/>, 2013.
- [87] ONPULSON.DE GBR. **Wirtschaftslexikon, Stichwort: Produktfamilie**. <http://www.onpulson.de/lexikon/3889/produktfamilie/>, 2012.
- [88] WIKIPEDIA. **System usability scale**. http://en.wikipedia.org/wiki/System_usability_scale, April 2013.

LITERATURVERZEICHNIS

Verweise auf nicht öffentlich zugängliche Quellen

- [89] M. GERSTMAYR. **Erkennung von Arbeitsschritten basierend auf aus Tiefenbildern gewonnenen Informationen zur Assistenz in der manuellen Montage.** Akademische Arbeit, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, 2011. Bachelorarbeit.
- [90] A. BANNAT. **Entwicklung eines videobasierten Verkehrszeichenerkennungssystems.** Akademische Arbeit, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, 2006. Diplomarbeit.
- [91] M. HEINZINGER. **Bildbasierte Erkennung von Arbeitsschritten (Work Flow Recognition).** Akademische Arbeit, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, 2011. Diplomarbeit.
- [92] B. E. SCHMID. **Entwurf einer datentypbezogenen Visualisierung von Bauanleitungen.** Akademische Arbeit, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, 2011. Studienarbeit.
- [93] D. SEEBAUER. **Contact Analog Visualization of Assembly Instructions.** Akademische Arbeit, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, 2011. Diplomarbeit.