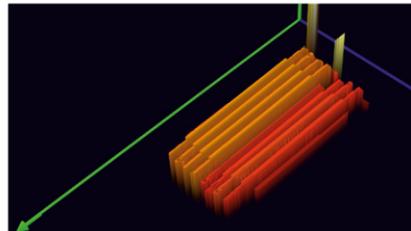
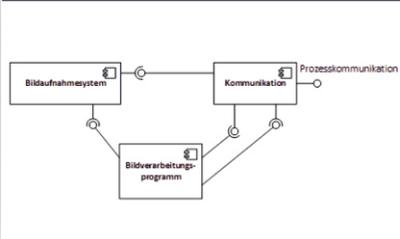
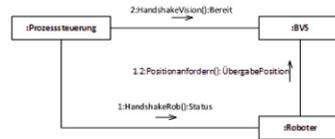
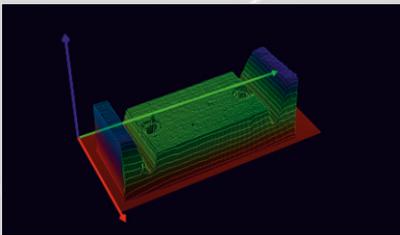


Integrale Betrachtung zur systematischen Definition von 3D Bildgebungssystemen in der Produktionstechnik

Alexander Grote



**Integrale Betrachtung zur systematischen Definition
von 3D Bildgebungssystemen in der Produktionstechnik**

Von der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der
Universität Siegen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

genehmigte
DISSERTATION
vorgelegt von

Alexander Grote M.Sc.
aus Nachrodt-Wiblingwerde

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar
 2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb
- Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Marcin Grzegorzek

Tag der mündlichen Prüfung: 04. Oktober 2016

Band 6 aus der Schriftenreihe
Höchstfrequenztechnik und Quantenelektronik
Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar
Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät
Universität Siegen
57068 Siegen

urn:nbn:de:hbz:467-10612

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier.

Veröffentlichungen

Teile dieser Arbeit wurden bereits in begutachteten (Peer-Review) wissenschaftlichen Zeitschriften und Konferenzen veröffentlicht bzw. präsentiert:

- GROTE, A. and SCHWAB, E., *Berührungslose optische Vermessung von Spannbetonfertigteilen / Contact-Free Optical Measurement of Precast Prestressed Concrete Parts*, tm - Technisches Messen, 80 (2013).
- GROTE, A. and SCHWAB, E., *Realisierung einer Robot-Vision-Applikation mit Lichtschnittverfahren für einen bestehenden Prozess*, tm - Technisches Messen, 81 (2014).
- GROTE, A. and SCHWAB, E., *Struktur zur Auswahl und Implementierung von bildverarbeitenden Systemen in der Fertigungsautomation*, in Forum Bildverarbeitung 2014, edited by F. Puente Leon, 15–26 (KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2014).
- GROTE, A. and SCHWAB, E., *Entwurfsmethode für 3D-Bildverarbeitungssysteme in der Anlagenautomatisierung*, tm - Technisches Messen, 82 (2015).

Zusammenfassung

In der industriellen Produktion sind Bildverarbeitungssysteme bereits in vielen Bereichen etabliert. Auch 3D-Bildverarbeitungssysteme werden in der Produktionstechnik für die unterschiedlichsten Problemlösungen eingesetzt. Der Einsatzbereich reicht von einfacher Qualitätskontrolle über Handlingsaufgaben bis hin zu komplexen Sicherheitsfunktionen in einer Produktionsanlage.

Aufgrund der stetigen Entwicklung und der Vielfältigkeit der anwendbaren Verfahren in der industriellen Bildverarbeitung stellt die Projektierung von 3D-Bildverarbeitungssystemen oft eine Herausforderung dar. Die Problematik bei der Integration von 3D-Bildverarbeitungssystemen in der Produktionstechnik besteht oft in der Vielzahl möglicher Ansätze, den Aufgabenstellungen der Produktionsautomation mittels Bildverarbeitung gerecht zu werden.

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung einer Methodik zur effizienten Projektierung und Entwicklung von 3D-Bildverarbeitungssystemen im praxisnahen Umfeld des Sondermaschinenbaus.

Es werden zunächst die auf das System wirkenden Einflussgrößen bestimmt, die sich aus der Aufgabenstellung, dem Produktionsprozess und dessen Peripherie ergeben. Hiervon ausgehend wird ein methodisches Vorgehen definiert, das es einem Entwickler von Produktionsanlagen ermöglicht, die notwendigen Maßnahmen zur Realisierung eines effizienten und effektiven 3D-Bildverarbeitungssystems im Verbund mit dem Produktionssystem zu definieren.

In den entworfenen Ansätzen im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst analytisch betrachtet, welche Formalien zur Auswahl bzw. Eingrenzung von bildgebenden Verfahren genutzt werden und wie damit die weitere Evaluierung der Projektierung des Bildverarbeitungssystems abläuft.

Im Zuge von Beispielapplikationen wird die Anwendung des vorgestellten Verfahrens explizit verdeutlicht.

Des Weiteren werden in dieser Arbeit objektorientierte Methoden zur Erfassung aller relevanter Merkmale eines 3D-Bildverarbeitungssystems im Bereich der Anlagenautomation und des Sondermaschinenbaus untersucht und angewendet. Dabei werden sowohl produktionstechnische Aspekte als auch spezielle Problematiken der Bildverarbeitung möglichst allgemeingültig dargestellt. Abschließend wird das Potential dieser Methodik diskutiert und eine Einschätzung zu Anwendungsmöglichkeiten und zukünftigen Entwicklungen gegeben.

Abstract

Machine vision systems are suitable in many areas of production in the industrial manufacturing. As well 3D-machine-vision-systems are used as solution for diverse problems in manufacturing engineering. The area of possible application ranges from simple tasks for quality control or manipulation and handling to complex security relevant issues.

On account of its continued development and the diversity of applicable methods in the field of machine vision, the project planning of 3D machine-vision-application is a challenging task.

The problem with the integration of 3D-vision-systems is the big variety of possibilities to solve problems in plant automation by means of machine-vision methods.

This thesis describes the development of a method for the efficient project planning and design of 3D-machine-vision-systems in the field of special machine construction. First the influence variables effecting the vision-system are determined, which are arising from the task, the production process and the periphery of the process. Based on these characteristics a methodical approach is defined. This approach enables developers of production facilities to define the specific measures for implementing an effective and efficient machine-vision-setup, which is well integrated in the production process.

The approach of this thesis is an analytical observation to describe the formalities of the selection of imaging sensors and how this decision is influencing the further project planning and evaluation procedure. In the context of example application, the application of the approach is presented explicit.

Furthermore, object-oriented methods are investigated regarding their ability to gather all relevant features of a 3D-machine-vision system in the field of plant automation and special machine construction. Both aspects concerning the production and problems of machine vision are described universally. In conclusion, the potential of this approach is discussed and an evaluation of possibilities and further development is given.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fachhochschule Südwestfalen im Fachbereich Maschinenbau in Iserlohn. An erster Stelle gilt mein Danke meinem Betreuer, Herrn Professor Dr.-Ing. Erwin Schwab. Er ermöglichte mir durch die Mitarbeit im PlastCIM-Labor, Forschungsprojekten sowie tiefe Einblicke in Lehre, Forschung und Industrie. Jede Phase dieser Arbeit wurde von ihm intensiv, professionell und warmherzig begleitet. Die Unterstützung bei der Umsetzung sowie die gewährten Freiräume haben das Gelingen dieser Arbeit erst ermöglicht. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar für das Vertrauen dieses Vorhaben als externer Doktorand durchzuführen, sowie seine engagierte wissenschaftliche Betreuung. In zahlreichen Diskussionen brachte er wertvolle Anregungen und Denkanstöße ein, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zudem bedanke ich mich bei der Prüfungskommission und bei Herrn Professor Dr.-Ing. Andreas Kolb für die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin danke ich dem Unternehmen KehraTec GmbH und Herrn Carsten Kehr für die Zusammenarbeit in den Kooperationsprojekten sowie den Mitarbeitern des Unternehmens für den Erfahrungs- und Wissensaustausch.

Für die freundliche Unterstützung möchte ich mich ebenso bei allen an der Arbeit beteiligten Kolleginnen und Kollegen bedanken. Besonderer Dank gilt auch meiner Korrekturleserin Claudia Schäfer-Teuber!

Meinen Freunden und meiner Familie gilt mein herzlicher Dank. Sie haben mich immer wieder motiviert am Ball zu bleiben und mir ausreichend Raum und Zeit gegeben meine Arbeit abzuschließen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemanalyse	2
1.3	Zielsetzung	3
2	Grundlagen	5
2.1	Abgrenzung	5
2.2	Begriffliche Einordnung	6
2.2.1	Bildverarbeitung	6
2.2.2	Produktionstechnik	7
2.3	Einordnung der Bildverarbeitung in der Produktionstechnik	8
2.3.1	Aufgabenbereiche der 3D-Bildverarbeitung	9
2.3.2	Aufbau eines 3D-BVS in der Produktionstechnik	10
2.3.3	BVS in der Systemarchitektur der Automatisierungstechnik	12
2.4	Übersicht 3D-Bildgebung	15
2.4.1	Lasertriangulation	16
2.4.2	Stereoaufnahme	22
2.4.3	Streifenlichtprojektion	30
2.4.4	Time-of-Flight Laufzeitverfahren	32
2.4.5	Lichtfeldkamera	36
2.4.6	Einfluss Tiefengenauigkeit	37
2.4.7	Auswahl	40
2.5	Bildverarbeitungssoftware	41
2.6	Modellbildung	43
2.6.1	Geeignete Modellierungstechniken	44
2.7	Objektorientierte Modellierung	45
2.8	Bewertung	49
3	Potential und Anforderungsanalyse	51
3.1	Potential bei der Planung von Bildverarbeitungssystemen	51
3.1.1	Aktueller Bedarf und Potential	51
3.1.2	Anforderungen bei der Entwicklung von Bildverarbeitungssystemen	53
3.2	Anforderungen in der Produktionsautomation	55
3.2.1	Restriktionen	55
3.2.2	Abläufe der effizienten Entwicklung	56
3.2.3	Inbetriebnahme und Umsetzungsdauer	59

3.2.4	Simulation	60
3.2.5	Modellierung von BVS	62
3.3	Bewertung Potential und Anforderungen	67
4	Methodik bei Entwicklung von 3D-BVS	69
4.1	Grundkonzept	69
4.2	Vorgehen bei Projektierung	71
4.2.1	Anforderungsanalyse	71
4.2.2	Statische Analyse	74
4.2.3	Dynamische Analyse	94
4.2.4	Entwurf des Systems	99
5	Bildverarbeitungsszenarien	103
5.1	Bahnschwellenvermessung	103
5.1.1	Phase 1: Anforderungsanalyse	104
5.1.2	Phase 2: Statische Analyse	108
5.1.3	Phase 3: Dynamische Analyse	116
5.1.4	Phase 4: Entwurf des Systems	119
5.2	Messergebnisse	121
5.3	Bahnschwellenvermessung robotergeführt	123
5.3.1	Phase 1: Anforderungsanalyse	123
5.3.2	Phase 2: Statische Analyse	124
5.3.3	Phase 3: Dynamische Analyse	125
5.3.4	Phase 4: Entwurf des Systems	128
5.4	Messergebnisse	133
5.5	Robot-Vision-Handling	133
5.5.1	Phase 1: Anforderungsanalyse	133
5.5.2	Phase 2: Statische Analyse	137
5.5.3	Phase 3: dynamische Analyse	147
5.5.4	Phase 4: Entwurf des Systems	150
5.6	Messergebnisse	154
6	Bewertung der Methodik	157
6.1	Besondere Merkmale des vorgestellten Ansatzes	159
6.1.1	Zusammenfassung statische Analyse	160
6.1.2	Betrachtung der dynamischen Analyse und des Entwurfs	161
6.2	Möglichkeiten zur Aufwandsabschätzung	163
7	Ausblick	165
	Literaturverzeichnis	167

Kapitel 1

Einleitung

Die 3D-Bildverarbeitung und die dazu gehörigen Verfahren, eine Szene dreidimensional zu erfassen, hat in den letzten Jahren rasant an Bedeutung gewonnen. Gerade im industriellen Bereich der Produktions- und Fertigungstechnik sowie deren Automation nimmt die Bedeutung der 3D-Bildverarbeitung zu. Das zur Anwendung und Umsetzung dieser Technik nötige Expertenwissen stellt oft noch eine Hürde für den Einsatz dieser Disziplin im Produktionsprozess dar.

1.1 Motivation

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Teilgebiet der industriellen Bildverarbeitung für die Automatisierung von produktionstechnischen Anlagen. Betrachtet man die zunehmend komplexeren Funktionsabläufe in der Produktionstechnik und im Maschinenbau, so wird ersichtlich, dass moderne Produktionssysteme ein koordiniertes Ineinandergreifen der einzelnen Techniken verlangen. Diese Synergie aus Mechanik, Hydraulik, Pneumatik, Informatik und Elektronik bezeichnet die sogenannten mechatronischen Systeme vgl. [1].

In diesen mechatronischen Produktionssystemen kommt es vermehrt zu einem Einsatz an bildgebender Sensorik, mit entsprechender Bildverarbeitungssoftware, den sogenannten Bildverarbeitungssystemen (BVS). Dabei gewinnt zunehmend auch die Integration von 3D-Bildverarbeitungssystemen in die Produktionstechnik an Bedeutung, da diese es ermöglichen, auch komplexe Automatisierungsaufgaben zu lösen. Es werden zunehmend 3D-BVS eingesetzt, die die unterschiedlichsten Zielsetzungen zur effizienten Automatisierung des Produktionsprozesses verfolgen, wie z.B. Greifpunktbestimmung, Positionsüberwachung oder Erfassung qualitätsrelevanter Maße.

Die Integration derartiger Systeme und damit ein steigender Grad an Automation der Produktion ermöglicht es den produzierenden Unternehmen, dem zunehmenden Preis- und Qualitätsdruck standzuhalten. Gerade im Bereich der Qualitätskontrolle, die eine genaue Prüfung bestimmter Merkmale verlangt, erreicht man mit der Bildverarbeitung einen wesentlichen Punkt der Zielsetzung des Qualitätsmanagements (QM), nämlich die Kontrolle und Dokumentation der benannten Qualitätsmerkmale. Daraus ergibt sich, dass BVS zu einem unverzichtbaren Baustein des automatisierten Gesamtsystems geworden ist. Die Entwicklung der Bildverarbeitungstechnologien ist geprägt durch ein stets wachsendes Potential und wird ständig durch neue Verfahren

zur Datengewinnung und Analyse erweitert. Diese Vielfalt erschwert Anwendern wie Systemintegratoren und Sondermaschinenbauern, die über ein personell begrenztes Expertenwissen verfügen, sowie durch enge Zeitpläne für die Entwicklung und Inbetriebnahme von Produktionsanlagen limitiert sind, zielführend BVS zur Lösung von Problemen in der Produktionstechnik zu entwickeln.

In vielen Fällen wird davon ausgegangen, dass ein BVS ein System aus einer oder mehreren Kameras ist, ähnlich einem Standardsensor eine Szene erfasst und in Form digitaler Signale weitergibt bzw. auswertet, vgl. [2]. Dies trifft jedoch nicht bei den modernen Systemen zu; gerade 3D-BVS sind hoch komplexe Systeme, die einen gewissen Projektierungsaufwand benötigen. Man sollte sie also nicht nur als alleiniges Mittel zur Lösung eines Problems in der Produktionstechnik betrachten, sondern als Technologie, die in Wechselwirkung mit den anderen Disziplinen der Produktionstechnik Probleme lösen kann. Bei der Entwicklung und der Integration eines 3D-Bildverarbeitungssystems ist Expertenwissen notwendig, um ein BVS gezielt auf die gegebene Problematik abzustimmen sowie harmonisch in den Gesamtprozess einzubeziehen. Letztendlich resultieren aus den technischen Möglichkeiten der 3D-Bildverarbeitung striktere Anforderungen an die Maschinen- und Anlagenbauer im Bereich der Automatisierungstechnik. Auf der einen Seite steigt der gewünschte Grad an Automatisierung. Damit einher geht ein Zuwachs an zu implantierenden Systemen, womit der Grad der Komplexität steigt und damit der Aufwand, der zur Entwicklung nötig ist. Auf der anderen Seite sollen die Zeiten und Kosten der Entwicklung und Inbetriebnahme einer Anlage möglichst gering gehalten werden. Daraus ergibt sich die Motivation, eine Möglichkeit zur systematischen Verkürzung und Strukturierung der Entwicklung von 3D-Bildverarbeitungssystemen in der Produktionstechnik zu suchen. Insbesondere die Phase der Entwicklung und Auswahl der geeigneten Komponenten soll hier Beachtung finden.

1.2 Problemanalyse

Die Problematik der Bildverarbeitungssysteme ergibt sich aus dem breiten Feld der möglichen Anwendung und der möglichen Ansätze, Probleme mittels Methoden der Bildverarbeitung zu lösen. Dabei ist nicht nur die Vielfalt der Möglichkeiten der Bildverarbeitung ein Problem, sondern auch die Bandbreite der Objekte, die im Rahmen des Produktionsprozesses mittels Bildverarbeitung erfasst werden sollen. Ein wesentlicher Punkt ist oft die fehlende und eindeutige Abgrenzung der Bildverarbeitung. Die genaue Definition des Bildverarbeitungssystems muss genauso erfolgen wie bei den anderen Technologien der Produktionstechnik. Bei dieser Definition muss zunächst erfasst werden, welche Komponenten das System umfasst und wie diese sich im Wechselspiel mit dem Gesamtprozess verhalten. Eine weitere bedeutende Problemquelle ist die unzureichende Beschreibung von Funktionen, die mittels des BVS erfüllt werden müssen, wobei eine unzureichende Beschreibung der Funktionalität auch aus Kommunikationsschwierigkeiten der Mitarbeiter eines Automatisierungsprojektes, die unterschiedlichen Disziplinen angehören, entstehen kann. Dabei kann die unterschiedliche Ausbildung, Denkweise und Begrifflichkeit ein Problem darstellen. Die genannten

Punkte können dazu führen, dass schon bei der Planung des Systems falsche Annahmen getroffen werden, die dazu führen, dass es zu einem erheblichen Mehraufwand während der Inbetriebnahme- und Hochlaufphase kommt und damit die Kosten eines Produktionssystems steigen. Dies beruht auf der unzureichenden Einbindung des Expertenwissens in die Konzeptphase, was im weiteren Entwicklungsverlauf zu einer suboptimalen Lösungsfindung mittels komplexer Steuerungs- und Bildverarbeitungsprogramme führt. Ein weiterer nicht zu unterschätzender Punkt ist, dass die Funktionalität des Gesamtsystems, also das korrekt arbeitende BVS, oft erst am Ende der Inbetriebnahme getestet werden kann, weil dann die nötige Peripherie wie Handlingsysteme, Roboter, korrekte Materialzuführung, etc. zur Verfügung stehen. Dies führt bei Änderungsbedarf innerhalb des BVS zu einem zeitlichen Verzögerung oder erheblichen mechanischen Aufwand, da eventuell andere Systemkomponenten erforderlich sind. Es muss sichergestellt werden, dass schon während der Projektierungsphase eine genaue Betrachtung der Bildverarbeitung stattfindet, um die oben beschriebene Problematik zu umgehen.

1.3 Zielsetzung

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Konzeption von Methoden zur systematischen Projektierung und Inbetriebnahme von 3D-Bildverarbeitungssystemen in der Produktionstechnik sowie deren Definition, Verifikation und Umsetzung im Sondermaschinenbau anhand von Beispielapplikationen. Dabei soll die Bildverarbeitung nicht auf einen speziellen Bereich, wie z.B. Robot Vision oder messende Systeme eingeschränkt werden, sondern eine Übersicht über die Fähigkeiten der 3D-Bildverarbeitung geben, da in der Produktionstechnik die Verfahren der 3D-Bildverarbeitung vielseitig eingesetzt werden können. Die Entwicklung geht von den bisher bekannten 3D-Bildaufnahmesystemen aus und beschreibt deren Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau sowie Besonderheiten, die sich daraus für die Produktionsautomation ergeben. Bei der Entwicklung der genannten Methodik soll auch darauf geachtet werden, dass der deutsche Maschinen- und Anlagenbau zu mehr als 90 % aus kleinen und mittelständischen Unternehmen mit weniger als 500 Mitarbeitern, sogenannten KMU, besteht [3]. Daraus lässt sich folgern, dass nicht jedem Unternehmen die nötigen Ressourcen in allen Abteilungen zur Verfügung stehen. Des Weiteren ist die Form der Sensor-, Steuerungs- und Automatisierungstechnik in der Produktionstechnik sehr heterogen, bezogen auf die Menge der Systemhersteller und die Art der Systeme. Daraus ergeben sich die folgenden Zielaussagen, die das allgemeine Ziel dieser Arbeit in Teilziele aufgliedern. Durch die Definition eines strukturierten Vorgehens bei der Entwicklung eines Systems lassen sich der Aufwand bzw. die Entwicklungsrisiken besser abschätzen. So ergibt sich das erste Teilziel wie folgt:

Es soll ein methodisches Vorgehen entwickelt werden, das es einem Entwickler von Produktionssystemen ermöglicht, die notwendigen Maßnahmen zur Realisierung eines effizienten und effektiven 3D-Bildverarbeitungssystems im Verbund des Produktionssystems zu definieren, wobei stets die individuellen Eigenschaften eines Systems berücksichtigt werden sollen. Dies führt zu der zweiten Zieldefinition:

Es soll eine Methodik für die Entwicklungsphase des Produktionssystems mit Bildverarbeitungssystem festgelegt werden, mit deren Hilfe ein Maschinen- oder Anlagenbauer das Bildverarbeitungssystem, skaliert auf die wesentlichen Bestandteile, auf die gewünschte Funktionalität prüfen und übersichtlich darstellen kann. Dabei muss die bildgebende Sensorik genauso abgedeckt werden wie die Prozessperipherie. Darüber hinaus kommt es zwangsläufig zu einem Gewinn neuer Erkenntnisse. Daher soll es hier auch Ziel sein, dieses anfallende Wissen bewusst zu erfassen und aufzuarbeiten.

Kapitel 2

Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel werden die Grundlagen der 3D-Bildverarbeitung in der Produktionstechnik vorgestellt. Dabei werden nur die für diese Arbeit wichtigen Zusammenhänge und Aspekte betrachtet. Es erfolgt zu Beginn eine kurze Abgrenzung zu anderen Bereichen der Bildverarbeitung. Einen ausführlichen Einblick in die speziellen Bereiche der Bildverarbeitung bzw. deren technisch detaillierte Beschreibung kann den im Literaturverzeichnis aufgeführten Arbeiten entnommen werden. Dabei dient dieses Kapitel zur Erarbeitung des Standes der Technik in Bezug auf den Einsatz von 3D-BVS in der Produktionstechnik sowie deren Implementierung. Darüber hinaus soll eine allgemeine Beschreibung der Produktionstechnik und deren für diese Arbeit relevanten Aspekte erarbeitet werden. In Abschnitt 2.2.1 und 2.2.2 wird die begriffliche Einordnung der Bildverarbeitung und der Produktionstechnik im Rahmen des Kontextes dieser Arbeit vorgenommen. In den folgenden Abschnitten erfolgt die Einordnung der Bildverarbeitung in die Produktionstechnik sowie die Darstellung der möglichen Systemarchitekturen. Die Einordnung der Komponenten der Bildverarbeitung und der Aufgabenbereiche der 3D-Bildverarbeitung in der Produktionstechnik sowie die Beschreibung gängiger bildgebender Verfahren zur 3D-Datengewinnung wird in den einzelnen Unterkapiteln vorgenommen. Schließlich folgt eine kurze Zusammenfassung und die Ableitung des Forschungsbedarfs, der dieser Arbeit zugrunde liegt.

2.1 Abgrenzung

Die Bildverarbeitung ist ein sehr vielschichtiger Bereich und findet sich mittlerweile in fast allen Technologie- und Lebensbereichen der heutigen Zeit wieder. Dabei wird bei dem Gebrauch des Begriffs „Bildverarbeitung“ eine Zusammenfassung mehrerer Verfahrensschritte impliziert. Der Begriff „Bildverarbeitung“ umfasst die Verarbeitungskette ausgehend vom Digitalisieren einer Szene, also dem bildhaften Erfassen, über die Verarbeitung des Bildes, hin zur Entscheidungsfällung anhand der extrahierten Merkmale. Eine genauere Erläuterung der Verarbeitungskette erfolgt in Abschnitt 2.3; es soll nur gezeigt werden, dass hinter dem Begriff „Bildverarbeitung“ ein komplexer Verarbeitungsprozess steht, der betrachtet werden muss.

Die Bildverarbeitung hat sich als Querschnittstechnologie erwiesen, die universell einsetzbar und dementsprechend weit verbreitet ist und ständig neue Möglichkeiten

schaft, vgl. [4].

Diese Arbeit beschäftigt sich primär mit dem Begriff der industriellen Bildverarbeitung sowie der 3D-Bildgebung und deren Anwendung in der Produktionstechnik. Dabei soll in dieser Arbeit die Betrachtung des gesamten Systems im Vordergrund stehen, d.h., es wird nicht allein das bildgebende System oder die Bildverarbeitungssoftware oder deren Algorithmen für sich betrachtet, sondern das 3D-BVS und dessen Einbindung in die Produktionstechnik. Im Speziellen soll die Entwicklung geeigneter Produktionsanlagen mit 3D-Bildverarbeitungssystemen oder die nachträgliche Implementierung eines solchen Systems in bestehende Produktionsanlagen betrachtet werden. Die angewandten Methoden der Bildverarbeitung sind oft fachübergreifend, so kann es sein, dass auch Erkenntnisse der medizinischen oder wissenschaftlichen Bildverarbeitung oder besondere bildgebende Verfahren mit in den Erkenntnisstand dieser Arbeit aufgenommen werden. Genauso sollen Verfahren und Vorgehensweisen für die Entwicklung von Produktionstechnik oder Softwareentwicklung Beachtung finden und gegebenenfalls auf die Bildverarbeitung übertragen werden.

2.2 Begriffliche Einordnung

Um die in der Arbeit genutzten Begriffe besser in den Kontext dieser Arbeit einordnen zu können, folgt eine Erläuterung der teilweise doch recht umfangreichen Begrifflichkeiten „Bildverarbeitung“ und „Produktionstechnik“.

2.2.1 Bildverarbeitung

Der Begriff „Bildverarbeitung“ ist relativ weitgreifend und unscharf definiert. Im Folgenden soll eine kurze Einordnung der Bildverarbeitung erfolgen, wie er in dieser Arbeit verstanden wird. Die industrielle Bildverarbeitung (englisch machine vision) befasst sich mit der automatischen Auswertung von Bildern zur Durchführung von messtechnischen Aufgaben oder Steuerungsaufgaben im industriellen Umfeld. Dabei wird der Begriff Bildverarbeitung für diese Arbeit vom Begriff „Rechnersehen“ (Englisch: computer vision) abgegrenzt. Das Ziel der computer vision ist es, aus Bildern abstrakte Beschreibungen oder Handlungsanleitungen zu generieren, vgl. [5]. Erhard erklärt es wie folgt:

„Unter der industriellen Bildverarbeitung ist die berührungslose Erfassung, visuelle Darstellung und automatische Auswertung einer realen Szene aus einer industriellen Umgebung zu verstehen.“ [5, S. 4]

Der Begriff „Bildverarbeitung“ wird durch die unterschiedlichen Disziplinen, Autoren, Entwickler und Einsatzbereiche mit unterschiedlichem Fokus betrachtet. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Bildverarbeitung als gesamtes System, welches der Produktionstechnik zur Erfüllung ihrer Aufgaben dient, betrachtet werden. Das bedeutet, die hier betrachtete Bildverarbeitung besteht immer aus allen nötigen Einzelkomponenten bzw. Prozessschritten zur Realisierung einer Automatisierungsaufgabe. Die

Bildverarbeitung wird als System betrachtet; es handelt sich um sogenannte Bildverarbeitungssysteme, die in der Produktionstechnik eingesetzt werden.

Ein Bildverarbeitungssystem umfasst das technische System (Anlage, Bildgebung, Manipulator, etc.), den Rechner und das Kommunikationssystem, in dem der Bildverarbeitungsprozess abläuft. Die Begriffe „Technisches System“ und „technischer Prozess“ werden in dieser Arbeit wie in [6] durch DIN 66201 beschrieben verwendet. Demnach ist ein Prozess eine Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch den Materie, Energie oder Information umgeformt oder gespeichert werden.

Die Grundlagen und Begriffe, die für die Beschreibung von BVS in dieser Arbeit benötigt werden, richten sich nach der einheitlichen Regelung der Ausdrucksweise in [7].

2.2.2 Produktionstechnik

Die Produktionstechnik ist ingenieurwissenschaftlich betrachtet nicht klar funktional getrennt, da sich die Produktionstechnik aller Technologiebereiche bedient, um ihr Ziel zu erfüllen. Aus diesem Zusammenhang rührt auch der stark interdisziplinäre Charakter. Die nachfolgende Definition verdeutlicht dies:

„Unter Produktionstechnik versteht man die Transformation wissenschaftlicher Erkenntnisse in Verfahren und Prozesse, die einerseits vom Menschen (technologisch) beherrscht werden und sich andererseits in wirtschaftlich nutzbare Produktionssysteme integrieren lassen.“ [8]

Die Produktionstechnik lässt sich nach der Art des stofflichen Prozesses der Gütererzeugung weiter aufgliedern, siehe hierzu [9]. Nach [10] ist die Produktionstechnik ein Bestandteil des Produktionsprozesses, der ein Verbund aus Produktionstechnik, Produktionsorganisation und Produktionsinformatik ist, wie in der nachfolgenden Abbildung 2.1 dargestellt:

Nach dieser Einteilung sind die BVS, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden, der Produktionstechnik zuzuordnen. Sie werden meist im Rahmen der sogenannten Produktionsautomatisierung eingesetzt. In [11] wird die Automatisierung der Produktionsprozesse als eine interdisziplinäre Aufgabe beschrieben, und das Fachgebiet der Produktionsautomatisierung vereinigt die dazu erforderlichen Bereiche. Die Produktionsautomatisierung ist also ein Querschnittsgebiet, welche die Anwendung der Automatisierungstechnik in der Produktion beschreibt.

In diesem Zusammenhang wird auch oft der Begriff „Anlagenautomation“ gebraucht. Die Anlagenautomatisierung befasst sich mit einem technischen Prozess, der auf einer Anlage abläuft. Die Produktionsautomatisierung ist ein Beispiel der Anlagenautomatisierung, wobei das Zielsystem die Produktionsanlagen sind. Die Produktionsanlage umfasst dabei die Fertigung, Montage sowie logistischen Funktionen und den Informationsfluss, vgl. [12], wobei ein Prozess oder eine Einrichtung als automatisch zu bezeichnen ist, wenn er oder sie unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches

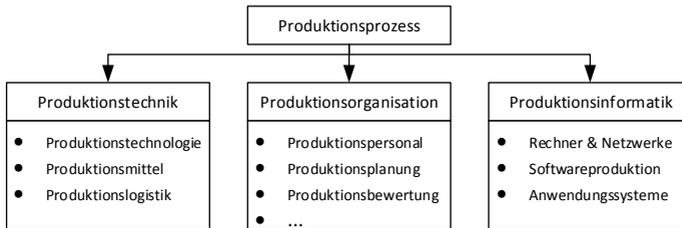


Abb. 2.1: Produktionsprozess als Verbund aus Technik, Organisation und Informatik nach [10]

Eingreifen arbeitet, vgl. [13].

Grundsätzlich ist anzumerken, dass der Begriff „Produktionsautomatisierung“ nicht einheitlich definiert ist; bei der Literaturrecherche fiel auf, dass in der Fachwelt die Begriffe „Produktionsautomatisierung“ und „Fertigungsautomatisierung“ synonym verwendet werden. Die Verwendung des jeweiligen Begriffs beruht dann auf dem Standpunkt des Autors. Im produzierenden Gewerbe wird meistens von Produktionstechnik und Produktionsautomatisierung gesprochen, während Fachautoren aus dem Bereich der verarbeitenden Industrie den Begriff Fertigungstechnik bzw. Fertigungsautomation verwenden. Eine klare Abgrenzung dieser Begrifflichkeiten ist für diese Arbeit irrelevant, da die Bildverarbeitung als Disziplin zur Zielerfüllung und Automatisierung der Produktions-/Fertigungstechnik genutzt wird und somit in jedem Bereich zur Anwendung kommen kann. Dieser Sachverhalt musste jedoch erwähnt werden, um eventuelle begriffliche Abweichungen, die im Verlauf der Arbeit entstehen, zu erklären. Die Erwähnung der Produktionstechnik/-automation schließt den Bereich der Fertigungstechnik/-automation mit ein und umgekehrt.

Die Produktionstechnik ist also ein Bestandteil des Produktionsprozesses, die Bildverarbeitungssysteme sind Bestandteil der Produktionstechnik und werden zur Lösung von Automatisierungsaufgaben herangezogen. Damit kann davon ausgegangen werden, dass in dieser Arbeit die Produktionstechnik und Bildverarbeitung im Rahmen der Produktionsautomation interdisziplinär betrachtet werden.

2.3 Einordnung der Bildverarbeitung in der Produktionstechnik

Die vorangegangenen Erläuterungen der Begrifflichkeiten zeigen, dass diese Arbeit sich überwiegend mit Bildverarbeitung in der Produktionsautomation, also der industriellen Anlagenautomation, auseinandersetzt.

Bei [12] werden als Anforderungen der Industrie an die Automatisierungstechnik unter anderem die flexible Automation, Standardisierung, automatische Konfiguration und Kostensenkung aufgeführt. Es werden auch die sich daraus ableitenden Ziele für die Forschung und Entwicklung genannt, unter anderem das Schaffen von Standards, die es den Entwicklern von Automatisierungslösungen ermöglichen, systemkompatible Komponenten zu generieren, sowie die Forschung in Richtung kognitiver, verteilter Systeme, mit intelligenter Software (z.B. Bildverarbeitung, fortgeschrittener Robotik, etc.). Diese Bestandteile sollen laut [12] in ein kommunikativ vernetztes Automatisierungssystem integriert werden. Die hier beschriebenen Anforderungen und Ziele zeigen, dass die in dieser Arbeit definierten Ziele ein Bestandteil zur Realisierung der Anforderungen sind. Die in [12] erwähnten Bedingungen verlangen eine gewisse Standardisierung aller Bestandteile der Produktionsautomatisierung, demzufolge auch die Standardisierung von 3D-BVS und ihrer Komponenten.

Eine Standardisierung der Bildverarbeitung umfasst einen sehr weiten Bereich und ist ohne weiteres nicht möglich. Deshalb soll hier die Abgrenzung dieser Arbeit ergänzt werden. Die Standardisierung wird in dieser Arbeit in erster Linie als standardisiertes Vorgehensmodell umgesetzt. Dabei bezieht sich die hier entwickelte Methodik nicht auf den gesamten Bereich der 3D-Bildverarbeitung, sondern nur auf den Bereich der industriellen Bildverarbeitung.

Begründet auf den definierten Zielen und den in der Literatur genannten Zielen wird im Folgenden eine Einordnung der BVS in die Produktionsautomatisierung erfolgen. Dabei wird zunächst der Aufgabenbereich der BV in der Produktionstechnik betrachtet, um dann das BVS mit allen Komponenten eindeutig zu identifizieren und zu definieren. Es soll auch die Position des BVS in der Architektur der Automatisierungstechnik betrachtet werden.

2.3.1 Aufgabenbereiche der 3D-Bildverarbeitung

Die industrielle Bildverarbeitung kann nach den Prüfzielen eingeteilt werden, dabei wird in der Literatur von [14] und [15] nach folgenden Aufgabenstellungen unterschieden:

- Oberflächenkontrolle
- Vollständigkeitskontrolle
- Position- oder Lageerkennung
- Messtechnik bzw. Maßprüfung
- Identifikation (Objektidentifikation)

Diese Einteilung kann im Wesentlichen für die Zielsetzung von 3D-BVS übernommen werden. Diese Einteilung in Aufgabenklassen lässt sich aber nicht exklusiv betrachten. Wie z.B. [14] erläutert, ist die Objekterkennung, in der hier gemachten Einteilung Objektidentifikation, ein wesentlicher Bestandteil der meisten Bildverarbeitungsprozesse und wird genutzt, um das eigentliche Ziel, beispielsweise eine Vermessung, zu erreichen. So muss das Objekt bzw. Merkmal, welches gemessen werden soll, zuvor

identifiziert und aus den anderen Bildinformationen extrahiert werden.

Da diese Aufgabenklassen aufgrund der Komplexität moderner Bildverarbeitungssysteme aufweichen, wird in dieser Arbeit vor allem Wert auf die Betrachtung des Gesamtsystems gelegt. Das bedeutet, es wird untersucht, welche Merkmale eines Objektes mittels BV extrahiert werden sollen und warum ein bestimmtes bildgebendes Verfahren oder besondere Methoden der Bildverarbeitung zur Lösung dieses Problems bevorzugt genutzt werden können. Die Aufgabenklassen dienen dann der Erläuterung der softwaretechnischen Herangehensweise, um eine Problemstellung in der Produktionstechnik zu lösen. Der Aufgabenbereich der 3D-BVS umfasst die genannten Aufgabenklassen. Daher folgt diese Arbeit auch eher der technologischen Einordnung der behandelten BVS, d.h., es wird betrachtet, wie und warum welche Informationen gewonnen werden. Der operative Umgang mit den Informationen wird dann in der Beschreibung der BV-Software, falls nötig, genauer erläutert.

Diese Arbeit soll keine Beschreibung oder Entwicklung von Bildverarbeitungsoperatoren oder Software darstellen, sondern den Zusammenhang zwischen Anlagenautomatisierung und Bildverarbeitungssystem beleuchten.

2.3.2 Aufbau eines 3D-BVS in der Produktionstechnik

Ausgehend davon, dass ein 3D-BVS und auch ein 2D-BVS im Wesentlichen ein Mess- oder Prüfsystem darstellt, kann man BVS nach [16] in zwei grundlegende Funktionsbausteine unterteilen: die Messdatengewinnung und die Messdatenauswertung.

Wird das Bildaufnahmesystem als Prozess der Datengewinnung betrachtet, geschieht die Datengewinnung, wie in [13] beschrieben, durch das Erfassen von Daten mittels Messen oder Zählen. Die Art der Datengewinnung macht gegebenenfalls eine Signalumformung nötig, wobei bei der Bildverarbeitung davon ausgegangen werden kann, dass immer eine Signalumformung stattfindet.

Somit kann bei der Betrachtung der Komponenten von BVS die Art des bildgebenden Systems zunächst vernachlässigt und das Bildaufnahmesystem als Datenquelle betrachtet werden. Das bedeutet, die Komponenten eines BVS sind immer dieselben: Bildaufnahmesystem, Bildverarbeitungsprogramm und Kommunikation. Außerdem wird nicht auf die genaue Funktion der Digitalisierung eingegangen. Der Prozess der Digitalisierung wird in der Literatur [17] Kapitel 5 genauer diskutiert.

Die gewonnenen Sensordaten, um bei der Analogie eines Messsystems zu bleiben, werden ausgewertet, um ein Ergebnis in der für den Prozess geeigneten Form zu erzeugen. Diese Messdatenauswertung stellt die eigentliche digitale Bildverarbeitung dar, also die Bildauswertung mittels der nötigen Algorithmen. Der Bereich der Bildauswertung/Bildverarbeitung lässt sich also auch als Komponente verstehen, die mit den Daten aus der Bildaufnahme umgeht. So wird vorerst die Bildverarbeitung differenziert als Softwarekomponente des gesamten Bildverarbeitungsprozesses verstanden. Betrachtet man nun das BVS in dieser Komponentenform, ergeben sich die Komponenten des Bildaufnahmesystems und die der softwareseitigen Bildverarbeitung. Eine weitere Komponente ist die Kommunikation. Diese muss zum einen die Datenübertragung zwischen den Komponenten der Bildverarbeitung sicherstellen und

zum anderen die Kommunikation mit dem übergeordneten Prozess und der übrigen Peripherie gewährleisten. Diese Komponenten werden nachfolgend in Abbildung 2.2 als Diagramm dargestellt, um ein erstes Modell des BVS zu beschreiben. Durch die

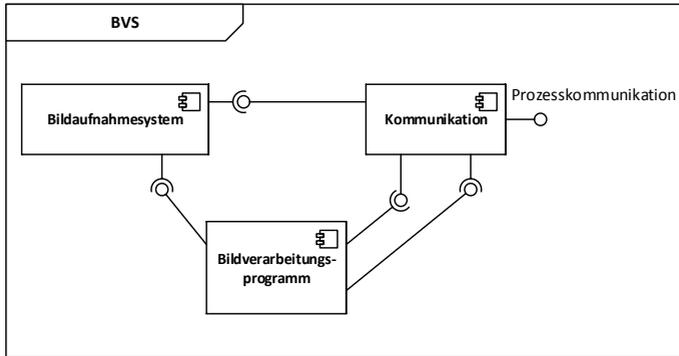


Abb. 2.2: Komponenten eines BVS

Zusammenarbeit der einzelnen Komponenten ergibt sich nach [18] die im Folgenden (Abbildung 2.3) dargestellte Verarbeitungskette für ein BVS.

In der Abbildung wird der Prozess in einem Bildverarbeitungssystem beschrieben. Dabei ist der Hauptbestandteil der Entwicklungsarbeit für ein solches BVS die Softwareentwicklung. Die Software lässt sich wie in der Darstellung (Abbildung 2.3) aufgliedern und beinhaltet wiederum spezielle Komponenten, die sich aus unterschiedlichen Methoden der Informatik und Signalverarbeitung zusammensetzen. Die Bestandteile und Algorithmen der Bildverarbeitungskette sind teilweise hoch komplex oder orientieren sich an sehr speziellen Methoden. Um die Übersicht dieser Arbeit zu gewährleisten, erfolgt eine Beschreibung der Komponenten dann bei Bedarf im Verlauf der Funktionsanalyse bzw. Anwendungsbeschreibung. Die Bildverarbeitungskette verdeutlicht die Komplexität eines BVS. Es soll daher zunächst nur das Bildverarbeitungssystem mit den Komponenten Bildeinzug, Bildverarbeitung und Kommunikation betrachtet werden. Dabei wird speziell auf die Wechselwirkung bestimmter Komponenten innerhalb des BVS und ihre Wirkung nach außen in die Fertigungsautomation geachtet. Es wird deutlich, dass ein BVS eine komplexe Verkettung von Komponenten darstellt, die genauer betrachtet werden müssen. Dieses System muss eindeutig abgegrenzt und eingeordnet werden, um dem Zielgedanken einer schnellen und flexiblen Automation gerecht zu werden und das BVS in ein Automatisierungssystem zu integrieren. Ein 3D-BVS ist nicht mehr nur ein einfacher sensorischer Bestandteil eines Produktionssystems. Es bildet vielmehr aufgrund seiner komplexen

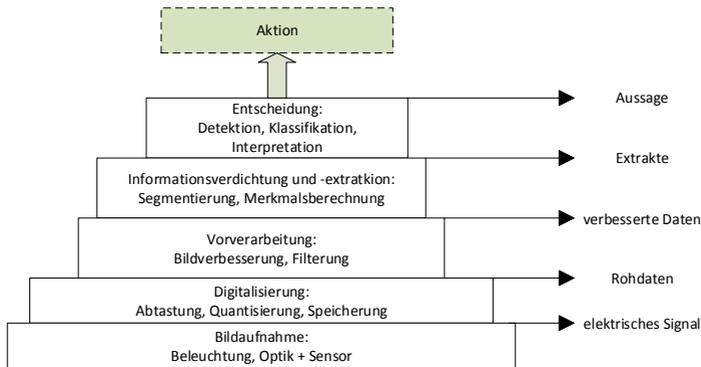


Abb. 2.3: Die Abfolge einzelner Bildverarbeitungsstufen als Verarbeitungskette für BVS, vgl.[18]

Struktur eine eigene Komponente bzw. ein in sich bestehendes System. Man kann es schon beinahe als einen kognitiven Informationsverarbeiter im Apparat des Produktionssystems betrachten. Um die Modellierung und Einordnung der Bildverarbeitung in die Produktionsautomatisierung zu beschreiben, wird zunächst die automatische Produktion erläutert.

2.3.3 BVS in der Systemarchitektur der Automatisierungstechnik

Die Grundlagen der Automatisierungstechnik werden an dieser Stelle nicht dargestellt, da dies zu weit reichend wäre; vielmehr wird hier ein kurzer Überblick zum Stand der Technik und zur Architektur der Automatisierungstechnik gegeben. Ausgehend von der klassischen Systemarchitektur wird die Systemarchitektur der verteilten Systeme beschrieben. Die Integration von BVS erfolgt momentan hauptsächlich in die klassische Architektur der Automatisierungstechnik. Es muss jedoch bei dem in dieser Arbeit zu entwickelnden Konzept darauf geachtet werden, dass moderne BVS von ihrer Charakteristik her sehr gut als Komponente der verteilten Systeme geeignet sind. Die Lösung von Automatisierungsaufgaben beruht stets auf derselben Grundstruktur. Es wird zunächst die Beziehung zwischen der Automatisierungseinrichtung und dem zu automatisierenden Prozess betrachtet, um anhand dessen die Systemarchitektur der Automatisierung zu beschreiben. In [19] wird beschrieben, dass ein automatisiertes System aus zwei Komponenten besteht: dem zu automatisierenden Prozess und der Automatisierungseinrichtung.

Die Automatisierung von Systemen bedeutet, dass der Zustandsverlauf des in dem

System ablaufenden Prozess so beeinflusst wird, dass sich ein Systemverhalten entsprechend dem Anforderungsprofil und der gegebenen Zielbestimmung ergibt. Die Beeinflussung erfolgt dabei auf drei Ebenen, vgl. [12]:

- Strategische Ebene (Prozessführungsfunktion)
- Taktische Ebene (Steuerung und Regelung)
- Operative Ebene (Sensorik und Aktorik)

Aus diesen Ebenen ergeben sich die möglichen Systemarchitekturen der automatisierten Systeme. Dabei kann grundsätzlich nach zentralen (örtlich zentral) und dezentralen (örtlich dezentral) Strukturen unterschieden werden. Die aktuellen Systeme arbeiten mit der Kombination beider Strukturen. In [6] werden die Hierarchieebenen den Prozessführungsebenen zugeordnet. Dabei kommt man hier zu folgender Aufteilung:

- Die Leiteinheit übernimmt Aufgaben der strategischen Ebene.
- Die Koordinierungseinheiten erfüllen den Aufgabenbereich der Koordinierung der Teilprozesse, also die Automatisierungsfunktionen der taktischen Ebene.
- Die dezentralen Automatisierungseinheiten der prozessnahen Ebene erfüllen die Aufgaben der operativen Ebene, also die Anbindung der Sensorik und Aktorik. Hier ist die Anforderung nach Verfügbarkeit am höchsten.

Der Aufbau eines solchen Automatisierungssystems, also z.B. einer automatischen Produktionsanlage, erfordert den Einsatz unterschiedlicher Bussysteme¹, um die Informationsübertragung zwischen den verschiedenen Strukturen und Ebenen zu gewährleisten. Daraus ergibt sich eine eher busorientierte Hierarchie, die es ermöglicht, die operative Ebene (prozessnahe Ebene) einfach durch Sensorik und Aktorik durch Anschluss an einen Bus zu erweitern. Dabei ergibt sich die Steuerungsarchitektur wie in Abbildung 2.4 dargestellt.

Die dargestellte Struktur kann nach Umfang und Komplexität des technischen Prozesses und der Automatisierungsproblematik beliebig durch Zwischenebenen erweitert werden. Gerade für den Bereich der Wartung ist dies positiv zu bewerten, da die Software bei Bedarf so zentral gewartet und verwaltet werden kann. Daraus resultiert in direkter Folge z.B. ein günstiges Fernwartungskonzept. Dabei steht dann über die zentrale Steuerung ein Zugang zu allen Feldgeräten zur Verfügung. Alle Parameter und Daten der Steuerung und Peripheriegeräte können in einer zentralen Datenbank gespeichert werden. Bei Ausfall von Komponenten des Systems oder im Servicefall können die Daten relativ einfach wiederhergestellt werden. Dies impliziert eine erhöhte Verfügbarkeit der automatisierten Anlage und führt insgesamt zu Kostenreduzierung über den Lebenszyklus.

Bei der Realisierung größerer Anlagen bietet sich eine Mischform aus dezentraler und zentraler Architektur an. Die Automatisierungskomponenten werden hierbei über

¹Ein Bussystem ist eine Funktionseinheit zur Datenübertragung zwischen mehreren Teilnehmern über einen gemeinsamen Übertragungsweg [20]

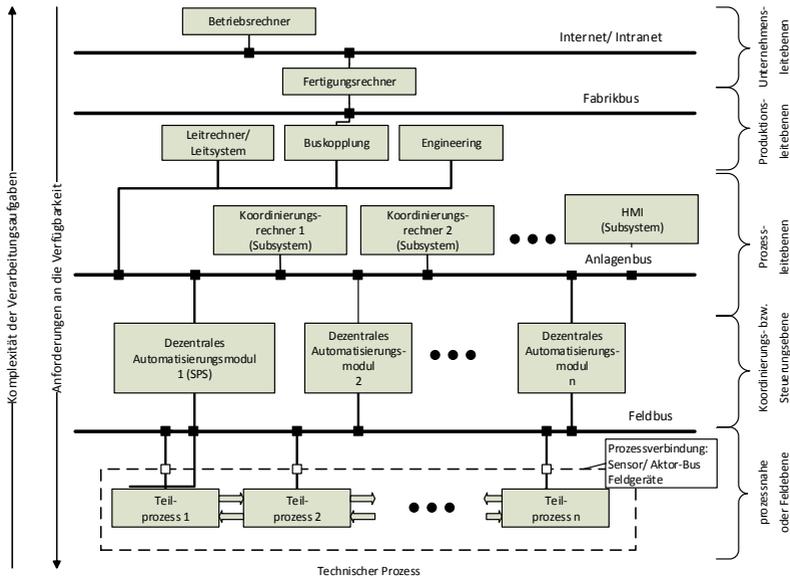


Abb. 2.4: Automatisierungshierarchie, zentrale Steuerung mit dezentraler Ein-/Ausgabe mit Hilfe von Bus-Systemen

Bussysteme miteinander verbunden, ähnlich wie in Abbildung 2.4 dargestellt. Dabei werden die anfallenden Steuerungsaufgaben auf die verschiedenen Komponenten des Automatisierungssystems aufgeteilt, sodass jede Komponente über eine bedingte Selbststeuerung verfügt. Diese hybride dezentrale Struktur verfolgt nach [6] folgende Ziele:

- Hohe Zuverlässigkeit
- Erhöhte Verfügbarkeit
- Einfache Erweiterungsfähigkeit

Bei einer solchen hybriden Architektur wird mittels einer übergeordneten Steuerung die Arbeit der Module koordiniert und der Datenaustausch zwischen den Modulen realisiert. Daraus resultiert eine Modularität und Unabhängigkeit der einzelnen Module voneinander. Dies kann so weit gehen, dass eine separate Inbetriebnahme der Module möglich ist, ohne dass Änderungen an der Gesamtsteuerung nötig werden.

Die Standardisierung der Kommunikation ermöglicht eine sehr gute Vernetzung der einzelnen Komponenten. Der Unterschied zwischen PC-basierter Steuerung und SPS-Funktionalitäten² verschwindet. Die prozessnahen Komponenten werden durch die Kommunikationsmöglichkeiten der modernen Sensoren in den Hintergrund verlagert, vgl. [12]. Hinzu kommt die eigene Steuerungszintelligenz der Peripheriegeräte, was laut [12] zu folgender Definition von verteilten Systemen führt:

„Verteilte Steuerungssysteme bestehen aus autonomen intelligenten Einheiten, die über ein gemeinsames Kommunikationssystem miteinander verbunden sind. Um eine globale Aufgabe im Gesamtsystem zu verrichten, koordinieren diese Einheiten ihre Aktivitäten durch Informationsaustausch über das Kommunikationssystem.“ [12, S. 89–90]

An dieser Stelle wird die Beschreibung der Architekturen abgeschlossen, da nicht jedes Detail der einzelnen Architekturen mit abgebildet werden kann.

Für das vernetzte Zusammenwirken von Sensorik und Aktorik und eingebetteter Software mit mechanischen Komponenten, das es auch schon in der Mechatronik gibt, wurde der neue Begriff „Industrie 4.0“ eingeführt. Dieser Forschungsbereich erweitert in bestimmten Bereichen die traditionellen Architekturen um bestimmte Ansätze, die hier jedoch nicht weiter erläutert werden. Einen genauen Überblick hierzu kann der Literatur [22] entnommen werden. Die Einordnung der Bildverarbeitung in die Architektur der Automatisierungssysteme ist nicht ohne weiteres möglich, da ein Bildverarbeitungssystem abhängig von seiner Aufgabenstellung unterschiedlich in das Gesamtsystem eingebunden werden kann oder muss. Ein BVS kann in allen Hierarchieebenen des Systems vorkommen, wobei eine Verschränkung der Hierarchieebenen durch die vertikale Integration geschieht. So kann zum Beispiel eine Qualitätskontrolle mittels 3D-Bildverarbeitung Ergebnisse für die Leitebene zur statistischen Auswertung der Güte des gesamten Produktionsprozesses liefern oder nur in der Koordinierungsebene dafür sorgen, dass Schlechteile den Produktionsprozess verlassen. Dem entgegen kann es sein, dass eine Robot-Vision-Applikation zur Bestimmung eines Greifpunktes nur die prozessnahe Ebene beeinflusst, obwohl dem ein hochkomplexes 3D-BVS zugrunde liegt. Die 3D-BVS kommt also in allen Hierarchieebenen zum Einsatz bzw. ist mit diesen vernetzt und kann in zentralen, verteilten und hybriden Architekturen eingesetzt werden, wobei hybride Architekturen sich am ehesten anbieten, da BVS meist PC-basierte Systeme sind, die sehr gut in hybride Systeme eingebunden werden können.

2.4 Übersicht 3D-Bildgebung

In diesem Abschnitt sollen die im industriellen Umfeld angewandten Verfahren zur Gewinnung von 3D-Informationen einer Szene kurz vorgestellt werden. Dabei werden kurz deren Vor- und Nachteile in der industriellen Anwendung charakterisiert. In der

²Eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ist eine elektronische Baugruppe, die auf digitaler Basis programmiert und zur Steuerung einer Maschine oder Anlage eingesetzt wird vgl. [21].

Literatur wird unterschiedlich bei der Einteilung dieser Verfahren vorgegangen, in [18] werden die Verfahren nach dem Messprinzip, auf dem sie beruhen, eingeteilt:

- Triangulation
- Laufzeit

[17] unterscheidet diese nochmals in aktive und passive Gruppen. Im Folgenden werden Verfahren vorgestellt, die sich durch Anwendungen und Integration im industriellen Umfeld der Produktionstechnik bewiesen haben und im Rahmen der Automatisierungstechnik als Sensorsystem eingesetzt werden. Das bedeutet, es wird nicht nach Verfahren oder Prinzip unterschieden, sondern nach Sensorik, die im industriellen Umfeld etabliert ist. Die nachfolgend vorgestellten Verfahren haben gemeinsam, dass sie alle den Bereich großer Dimension abdecken und auf einfache Art und Weise im industriellen Umfeld implementierbar sind. D.h., diese Verfahren sind so verbreitet, dass bereits 3D-Sensoren bzw. Bildaufnahmesysteme, die nach diesem Prinzip arbeiten, vertrieben werden oder aber der Stand der Technik eine einfache Realisierung mit Bildverarbeitungsbibliotheken und Standardkomponenten ermöglicht.

2.4.1 Lasertriangulation

Triangulation ist eine geometrische Methode der Entfernungsmessung. Ein Dreieck ist eindeutig bestimmt, wenn zwei Winkel und eine Seitenlänge bekannt sind. Bei der Lasertriangulation sind eine Seitenlänge und ein Winkel aus der Konstruktion des Messaufbaus bzw. den Konstruktionsdaten des Sensors bekannt und der zweite Winkel wird gemessen. Bei der hier dargestellten punktwisen Lasertriangulation wird das Objekt mit einem Laser beleuchtet, der auf das Objekt projizierte Punkt wird an der Oberfläche gestreut und kann mit einem geeigneten Detektor beobachtet werden (vgl. Abbildung 2.5). Ausgehend davon, dass die Geometrien des Aufbaus, Positionen von Detektor und Laser, bekannt sind, ist es möglich, die Position des Objektes eindeutig zu bestimmen, da eine bijektive Abbildung zwischen der Tiefe z des Objektpunktes und der Position des gestreuten Laserpunktes auf dem Detektor besteht, diese wird durch die Auslenkung s repräsentiert.

Zur scharfen Abbildung zweier Ebenen aufeinander im Raum muss die Scheimpflug-Bedingung erfüllt sein. Diese besagt, dass sich Bild-, Objektiv- und Fokusebene in einer Geraden schneiden müssen. Die Scheimpflug-Bedingung ist in dem Aufbau, der in Abbildung 2.5 dargestellt wird, erfüllt. Wird als positionsempfindlicher Detektor eine Zeilenkamera eingesetzt, ist eine subpixelgenaue Detektion des abgebildeten Laserpunktes sowie die Verminderung von Messfehlern durch Signalverarbeitung möglich. Im folgenden wird die typische Triangulationsanordnung dargestellt und die geometrische Entfernungsbestimmung erläutert.

Die Abbildung von $s \mapsto z$ soll beispielsweise an der Geometrie in Abbildung 2.6 bestimmt werden, vgl. [24], [18] und [23]. Die Basislänge l , der Winkel β und die Brennweite f sind aus der Konstruktion des Sensors bekannt. Der Nullpunkt der s - und z -Achse befindet sich am Schnittpunkt O der beiden Achsen und der Linsenebene. Im Dreieck ORB , siehe Abbildung 2.6, ergibt sich nun für die Bildweite b :

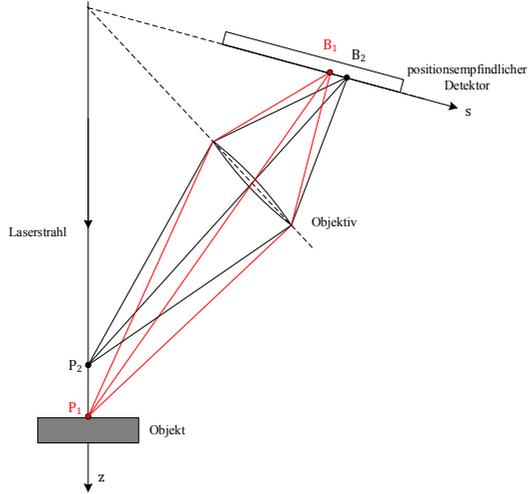


Abb. 2.5: Abbildungsgeometrie Lasertriangulation nach [23].

$$b = s \cos(\varphi) \quad (2.1)$$

Die Gegenstandsweite g der scharfen Abbildung errechnet sich unter Anwendung der Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \Leftrightarrow \frac{gbf}{f} = \frac{bgf}{g} + \frac{bgf}{b} \Leftrightarrow bg = gf + bf \Leftrightarrow g = \frac{bf}{b-f} \quad (2.2)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 2.1 erhalt man

$$g = \frac{bf}{b-f} = \frac{sf \cos(\varphi)}{s \cos(\varphi) - f} \quad (2.3)$$

Aus der Betrachtung des Dreiecks OPQ ergibt sich die Objektentfernung:

$$z = \frac{g}{\sin(\beta)} = \frac{sf \cos(\varphi)}{(s \cos(\varphi) - f) \sin(\beta)} = \frac{sf}{(s - \frac{f}{\cos(\varphi)}) \sin(\beta)} \quad (2.4)$$

Berücksichtigt man den Sachverhalt, dass die Kosinusfunktion durch die Tangensfunktion dargestellt werden kann, mit $\cos(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2(\varphi)}}$ ergibt sich

$$\cos(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{l}{f} - \frac{1}{\tan(\beta)}\right)^2}} \quad (2.9)$$

z in Abhängigkeit von den bekannten Größen bestimmen:

$$z = \frac{sf}{\left(s - f \sqrt{1 + \left(\frac{l}{f} - \frac{1}{\tan(\beta)}\right)^2}\right) \sin(\beta)} \quad (2.10)$$

Diese Ausführungen verdeutlichen, dass der Zusammenhang zwischen s und z , aufgrund der verkippten Abbildungsebenen, nicht linear ist (vgl. [24]). Betrachtet man den Zusammenhang, dass bei gleicher Höhendifferenz bei größerem Winkel θ einer größeren Ortsdifferenz auf dem Sensor erreicht wird, wird deutlich, dass die Empfindlichkeit dieses Messprinzips durch Anpassung des Triangulationswinkels θ verbessert werden kann. Wird eine Anpassung des Winkels vorgenommen, muss jedoch darauf geachtet werden, dass keine Verdeckungen im Beobachtungs- oder Beleuchtungsstrahlengang auftreten.

Bei den Verfahren, die mit der Lasertriangulation arbeiten, wird die Messunsicherheit durch unterschiedliche Aspekte bestimmt, vgl. [18]:

- Abbildungsqualität der Laserprojektion
- Abbildungsqualität der Aufnahmeoptik
- Sensorauflösung
- Speckle aufgrund der Kohärenz des Lichtes

Die einzelnen Unsicherheitsfaktoren werden in [18] genauer erläutert. Das beschriebene Verfahren ist unter Beachtung der genannten Punkte vielfältig anpassbar und sehr robust. Dieses Verfahren ermöglicht es mit relativ einfachen Mitteln, 3D-Daten einer Szene zu erfassen.

Ein Nachteil ist jedoch, dass nur ein Punkt der Objektoberfläche geliefert wird. Für die Erfassung einer Szene ist dann ein Scanverfahren notwendig, das zum einen zeitaufwändig und zum zweiten mechanisch relativ komplex ist. Dieser Zusammenhang erschwert den Einsatz in Bereichen mit produktionstechnischem Hintergrund.

Die beschriebene punktweise Triangulation kann unter zur Hilfenahme relativ einfacher Mittel zum sogenannten Lichtschnittverfahren erweitert werden. Bei diesem wird ein eindimensionaler Schnitt der Szene abgetastet, dabei wird Licht nicht in Form eines Punktes auf die Oberfläche gestrahlt, sondern zu einem Fächer aufgeweitet. Es wird beispielsweise eine Laserlinie auf das Objekt projiziert, diese wird an der Oberfläche gestreut und von einem 2D-Sensor, z.B. Flächenkamera, beobachtet.

Hierbei erfüllen Lichtfächer, Objektiv und Sensor im besten Fall die Scheimpflug-Bedingung, damit alle Punkte scharf abgebildet werden können. Dies ist bei der Verwendung von Standardkomponenten oft nicht der Fall; bei diesen Sensoren ist dann auf den Schärfenbereich zu achten, der den Messbereich einschränkt.

Durch die Abbildung der Laserlinie auf dem Sensor entsteht ein Intensitätsprofil des Lasers im Kamerabild, welches ausgewertet wird. Dieses Profil stellt prinzipiell eine Konturlinie der Szene dar, wie ein Schnitt durch diese. Jeder einzelne Punkt dieses Profils kann durch Methoden der Signalverarbeitung subpixelgenau erfasst werden. Wird eine geeignete Trajektorie für den Sensor oder das Objekt definiert, können die Konturlinien, die über den Weg aufgenommen werden, in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden. Aus dieser „Aneinanderreihung“ von Profilen ergibt sich dann die digitalisierte Gesamtkontur der abgefahrenen Szene, schematisch in Abbildung 2.7 dargestellt. Ausgehend von der beschriebenen Anordnung ergibt sich

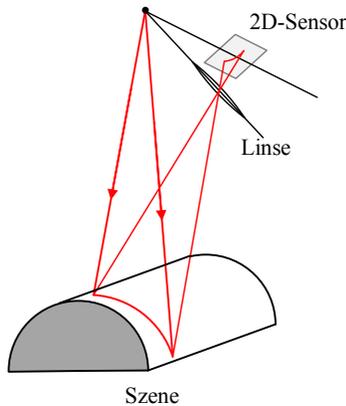


Abb. 2.7: Erweiterung der punktwisen Triangulation auf Linienabtastung, vgl. [23].

bei dem Erfassen einer Szene eine Anzahl von Bildaufnahmen mit dem erfassten Profil der Laserlinie. Die eigentliche Messinformation ist also das Bestimmen des Intensitätsmaximums der abgebildeten Laserlinie. Damit ist die Genauigkeit des Gesamtsystems abhängig von der Genauigkeit der Positionsbestimmung der Laserlinie. Betrachtet man das Intensitätsprofil des Lasers quer zu seiner Längsausdehnung, ergibt sich idealisiert eine Gauß-Verteilung. Dieser Intensitätsverlauf findet sich, mehr oder minder störungsbehaftet, in den aufgenommenen Bildern der Laserlinie wieder. Die Positionsbestimmung erfolgt anhand dieser Intensitätsverteilung der Laserlinie. Bezieht man das Modell der Glockenkurve ein, so kann man die Positionsbestimmung

subpixelgenau vornehmen. In Abbildung 2.8 werden Verfahren zur Positionsbestimmung der Laserlinie dargestellt. Die in Abbildung 2.8 a.) dargestellte Methode errechnet das Intensitätsmaximum der Laserlinie. Das Ergebnis liefert die Position P_{MAX} und den maximalen Intensitätswert I_{MAX} . Dabei erfolgt die Positionsbestimmung pixelgenau. Diese Positionsbestimmung ist die einfachste Art und zugleich sehr anfällig gegenüber Störeinflüssen. So muss eine Ausnahmebehandlung integriert werden, sollten mehrere Maxima detektiert werden.

Die zweite dargestellte Methode, Abbildung 2.8 b.), berechnet die Position der Laserlinie über einen Schwellwert. Dabei wird zunächst über einen vordefinierten Schwellwert der Intensität die linke P_L und rechte Kante P_R des Linienprofils bestimmt und die Position P_{TRSH} mittels $P_{TRSH} = (P_L - P_R)/2$ approximiert. Die Positionsbestimmung erfolgt also subpixelgenau. Diese Methode eignet sich, um Hintergrundsignale zu unterdrücken. In Abbildung 2.8 c.) wird eine Methode dargestellt, die mittels Schwerpunktbestimmung arbeitet. Dazu wird mittels Schwellwertverfahren der Bereich des Intensitätsprofils eingegrenzt. Dieser Bereich wird dann zur Schwerpunktberechnung herangezogen. Dabei wird über die Summe der Intensitätswerte im definierten Bereich der Schwerpunkt bestimmt. Auch diese Methode liefert die Position subpixelgenau. Diese Methode bietet darüber hinaus den Vorteil, dass Streulicht als Störeinfluss bei der Positionsbestimmung minimiert wird. Das Lichtschnittver-

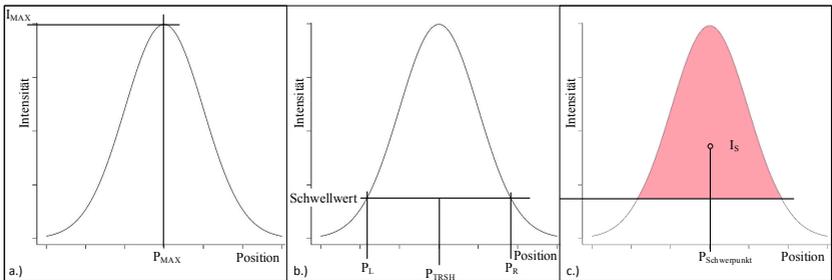


Abb. 2.8: Methoden zur Positionsbestimmung der Laserlinie a.) Intensitätsmaximum der Laserlinie b.) Schwellwert-Methode c.) Positionsbestimmung über den Schwerpunkt

fahren findet in der Produktionstechnik viel Anwendung. Als Beispiel sei hier auf Applikationen aus [25] und [26] verwiesen, die auch im Rahmen dieser Arbeit erläutert werden.

Für die Anwendungsbereiche „Industrielle Bildverarbeitung“ und „Automation in der Produktionstechnik“ wird eine Großzahl an kommerziellen Bildaufnahmesystemen vertrieben, die mit dem beschriebenen Verfahren 3D-Daten für das BVS erzeugen. Es gibt in sich geschlossene Systeme, die intern die Berechnung des Profils bzw. der Punktwolke übernehmen und der Bildverarbeitungssoftware übergeben.

Es ist jedoch ebenso möglich, dies mittels BV-Bibliothek und den entsprechenden

Komponenten zu implementieren. Das Vorgehen bei der Entwicklung und die verwendete Sensorik hängt von der Erfahrung und den Ressourcen des jeweiligen Integrators ab. In der nachfolgenden Tabelle 2.1 werden die Vor- und Nachteile der Lasertriangulation kurz zusammengefasst.

Vorteile	Nachteile
Korrespondenzproblem entfällt geringe Kosten hohe laterale Auflösung	Tiefenauflösung entfernungsabhängig Reflexionsgrad beeinflusst Bild mechanischer Aufwand bspw. Kinematik
breites Angebot an Sensorik	hoher Softwareaufwand zur 3D-Datengewinnung
Genauigkeit relativ zur Entfernung sehr gut	

Tab. 2.1: Vor- und Nachteile von Lasertriangulation

2.4.2 Stereoaufnahme

Das Prinzip der Triangulation lässt sich auch auf sogenannte Stereokamerasysteme übertragen. Im Falle der Stereokamera spannen die Projektionszentren die Basis auf, mittels der trianguliert werden kann. Nach einer Richtungsmessung von beiden Standpunkten aus erlaubt der ebene Vorwärtsschnitt eine trigonometrische Bestimmung des angepeilten Neupunktes.

Bei der Standard-Stereo-Geometrie, der einfachste Aufbau eines Stereokamerasystems, werden zwei Kameras nebeneinander mit parallelen optischen Achsen so angeordnet, dass sie eine gemeinsame Szene betrachten. Bei dieser Anordnung der Kameras wird der Abstand zwischen den beiden optischen Achsen als stereoskopische Basis b benannt. Die Szene wird dann auf unterschiedliche Positionen in der Bildebene der beiden Kameras abgebildet. Mit Hilfe der schematischen Darstellung in Abbildung 2.9 lässt sich die Differenzstrecke d zwischen den Positionen auf der Bildebene, die als Parallaxe oder Disparität bezeichnet wird, berechnen, vgl. [17].

$$d = r_{x_1} - l_{x_1} \quad (2.11)$$

laut Strahlensatz ist

$$r_{x_1} = f \frac{X_1 + b/2}{z} \quad (2.12)$$

und

$$l_{x_1} = f \frac{X_1 - b/2}{z} \quad (2.13)$$

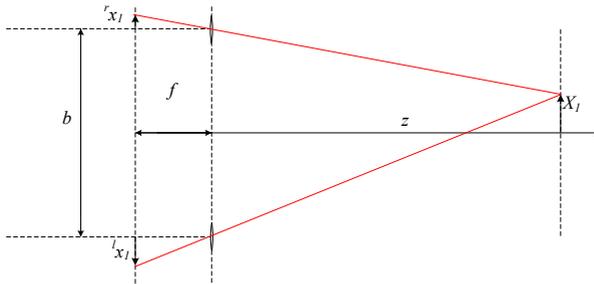


Abb. 2.9: Schematische Darstellung einer Stereokameraanordnung

ergibt sich in 2.11 eingesetzt

$$d = f \frac{X_1 + b/2}{z} - f \frac{X_1 - b/2}{z} = b \frac{f}{z} \quad (2.14)$$

Daraus wird ersichtlich, dass die Parallaxe umgekehrt proportional zur Entfernung z des Objektes und direkt proportional zur Basis b ist.

Der hier beschriebene Aufbau wird auch als Stereonormalfall bezeichnet und dient als Einführung eines idealisierten Sensormodells. Dieses idealisierte Sensormodell hat den Vorteil, dass sich für grobe Abschätzungen einfache mathematische Zusammenhänge ergeben. Das Modell kann sukzessive zur Beschreibung realer Stereokamerasysteme erweitert werden. Es dient im Rahmen dieser Arbeit zur Einführung der umfassenden Thematik der Stereokamerasysteme. Zur Veranschaulichung der räumlichen Erfassung eines Objektes wird in Abbildung 2.10 die Standard-Stereo-Geometrie gezeigt, bei dieser Anordnung sind die beiden Kameras parallel zueinander ausgerichtet. Mittels der beiden Projektionsstrahlen wird dargestellt, wie der Punkt (p_c) des Objektes über die Projektionszentren (c_l, c_r) auf der jeweiligen Bildebenen (q_l und q_r) abgebildet wird.

Die in Abbildung 2.10 gewählte Darstellung, bei der der Projektionsstrahl des Punktes p_c und der Bildpunkt q_r zusätzlich in die Bildebene der linken Kamera dargestellt werden, verdeutlichen den geometrischen Zusammenhang zur Disparitätsberechnung. Bei der dargestellten Standard-Stereo-Geometrie, mit dem Bildhauptpunkt H , befinden sich die Punkte q_l und q_r auf der gleichen Bildzeile, einzig der horizontale Abstand d (Disparität oder Parallaxe) unterscheidet sie. Sind die Brennweite f , der Basisabstand b und die Disparität d gegeben, kann mittels Strahlensatz der Tiefenwert ermittelt werden.

Bezogen auf das linke Kamera Koordinatensystem gilt dann:

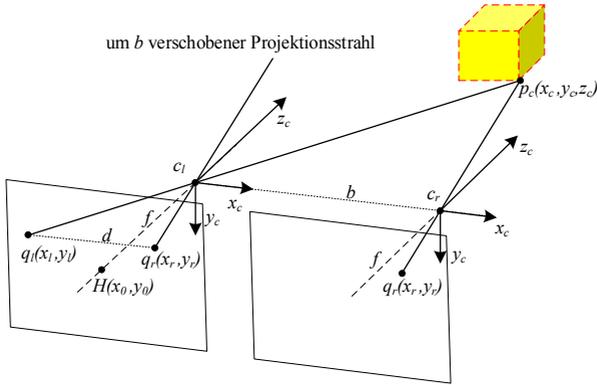


Abb. 2.10: Achsparalleler standard-stereoskopischer Aufbau

$$x_c = z_c \cdot \frac{x_l - x_0}{f} \quad (2.15)$$

$$y_c = z_c \cdot \frac{y_l - y_0}{f} \quad (2.16)$$

$$z_c = \frac{bf}{d} \quad (2.17)$$

Ausgehend davon, dass man einen Pixel im Sinne der Signalverarbeitung als diskreten Abtastwert betrachtet kann, ergibt sich immer eine gewisse Ungenauigkeit. Diese Ungenauigkeit ist die Ursache dafür, dass auch die Zuordnung korrespondierender Merkmale in dem Stereobildpaar fehlerbehaftet ist, die sich dann auf die Berechnung der Disparität überträgt. Der sich dabei ergebende Fehler liegt bei Algorithmen, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, dank Interpolation bei der Merkmalsextraktion im Subpixelbereich. Als realistischer Wert gilt laut [27] $\Delta d = 0,5\text{px}$. Damit ergibt sich nach [28] eine Ungenauigkeit der Tiefe wie folgt:

$$\Delta z_c = \Delta d \frac{z_c^2}{bf} \quad (2.18)$$

Das bedeutet, die absolute Sensitivität für eine Tiefenbestimmung nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab.

Der hier gezeigte Stereonormalfall stellt in vielerlei Hinsicht einen idealisierten Sonderfall dar. Zwar lassen sich anhand der dargestellten Standard-Stereo-Geometrie mit dem Lochkameramodell die wesentlichen geometrischen Betrachtungen durchführen, reale Kameras weisen allerdings nicht das hier modellierte optimale Verhalten auf. Es werden Objektive benutzt, die aufgrund der verwendeten Linsen zu einer Verzeichnung der Abbildung führen. Abgeleitet aus den realen Systemen müssen zusätzlich Kameraeigenschaften wie die unterschiedliche horizontale und vertikale Brennweite betrachtet werden. Darüber hinaus ist bei realen Kameras das optische Zentrum oft leicht verschoben, was wiederum mit in die Parameterbetrachtung einzubeziehen ist. Die im Folgenden dargestellten Einflüsse sind zur Beschreibung eines realen Systems als Erweiterungen in das Modell zu integrieren.

Innere Orientierung der Kameras: Die exakte Kenntnis der geometrischen Verhältnisse innerhalb der Kameras sind für reale Messungen notwendig. Es ist zu berücksichtigen, dass jede reale Optik Fehler aufweist, welche zu Verzeichnungen führen. Das bedeutet, dass in das Modell die Beschreibung der geometrischen Verhältnisse innerhalb der Kamera durch geeignete Parameter aufgenommen werden. Diese Parameter werden als die Parameter der inneren Orientierung bezeichnet. Dabei wird die Lage des Projektionszentrums in einem kamerafesten Koordinatensystem und die Abweichung vom Modell der Zentralperspektive beschrieben. Die Parameter werden im Rahmen der Systemkalibrierung bestimmt. Üblicherweise sind die Parameter der inneren Orientierung die Kammerkonstante c , die Lage des Bildhauptpunkts x_0 , y_0 , sowie weitere Parameter, die der Korrektur von Abbildungsfehlern dienen. Durch Verwendung einer Optik ergeben sich radiale und tangentiale Verzerrungen des Bildes, wobei die tangentiale Verzerrung gegenüber der radialen Verzerrung eine weniger bedeutende Rolle einnimmt. Die radiale Verzerrung skaliert den Abstand der Bildpunkte zum Fokus. Die Bildpunkte werden vom Fokus weg oder in Richtung des Fokus radial verzerrt. Man unterscheidet zwei Arten von radialer Verzerrung: Tonnen- und Kissenverzerrung. Wenn das Bild zur Bildmitte verzerrt ist, wird dies als Kissenverzerrung bezeichnet. Der Abstand des Bildpunktes zum Fokus ist kleiner als bei einer idealen Projektion. Erscheint das Bild von der Bildmitte weg verzerrt, ist dies eine Tonnenverzerrung. Bei der Tonnenverzerrung ist der Abstand der Bildpunkte zum Fokus größer als bei einer idealen Projektion. Es ist möglich, einen verzerrten Bildpunkt in einen unverzerrten Bildpunkt zu überführen, indem man den Abstand des unverzerrten Punktes zum Fokus ermittelt. Die Verzerrung wird durch Verzerrungskoeffizienten k beschrieben. k wird im Rahmen der Systemkalibrierung bestimmt.

In der Praxis sind unterschiedliche Kalibrierungsverfahren gebräuchlich, die zu unterschiedlichen Parametersätzen führen. Aufgrund der freien Verfügbarkeit des Quellcodes ist im Bereich der Bildverarbeitung der Ansatz von Tsai in [29] sehr weit verbreitet. Bei bekannter innerer Orientierung können gemessene Bildkoordinaten um die Fehlereinflüsse korrigiert werden, was die Auswertung im Modell der Zentralperspektive möglich macht.

Äußere Orientierung der Kameras: Die Parameter der äußeren Orientierung beschrei-

ben die Lage des Projektionszentrums der Kamera in einem übergeordneten Koordinatensystem und die Ausrichtung des Kamerakoordinatensystems in diesem übergeordneten System. Die Koordinaten eines Punktes werden auf das Projektionszentrum reduziert. Dieser Punkt wird anschließend einer räumlichen Rotation unterzogen, welche die Achsen des übergeordneten Koordinatensystems parallel zu den Koordinatenachsen des Bildkoordinatensystems ausrichtet. Mit dieser Korrektur erfolgt die Projektion in den zweidimensionalen Bildraum ideal. Das bedeutet, es entstehen ideale Bildkoordinaten frei von Abbildungsfehlern. Den Zusammenhang zwischen den 3D-Objektkoordinaten und 2D-Bildkoordinaten stellen die sogenannten Kollinearitätsgleichungen her. Insgesamt ergeben sich sechs unabhängige Parameter der äußeren Orientierung, bestehend aus der translatorischen Komponente und der rotatorischen Komponente.

Abbildungsschärfe: In dem zentralperspektivischen Modell wird angenommen, dass eine punktförmige Vereinigung aller Abbildungsstrahlen im Projektionszentrum erfolgt, dies ist in der Realität nicht der Fall. Aufgrund der Dimension der Blendenöffnung werden die Abbildungsstrahlen eines Objektpunktes unscharf auf einen Bereich in der Bildebene abgebildet. Das Maß der Unschärfe hängt von verschiedenen Faktoren ab. Es begrenzt zum einen die erzielbare Messgenauigkeit und zum anderen den Messbereich eines Stereokamerasystems.

Rektifizierung von Stereoaufnahmen: Ein erheblicher Nachteil dieses achsparallelen Stereosystems ist die ungünstige Orientierung der Kameras. Zum einen ist die genau parallele Ausrichtung der optischen Achsen nur relativ kompliziert zu realisieren und damit im späteren Anwendungsbereich anfällig für Störungen, z.B. durch äußere Einflüsse wie Vibration. Ein wesentlicher Nachteil dieses Systems ist, dass sich eigentlich die Tiefenauflösung mit wachsender Basislänge b verbessert, aber damit auch der Überlappungsbereich schrumpft, das heißt, der gemeinsam projizierte Szenenbereich wird zu klein. Um eine gute Tiefenauflösung zu realisieren, muss also einerseits eine große Basislänge und andererseits ein großer Überlappungsbereich erzeugt werden. Dies erfordert eine Entkopplung der Blickrichtungen der beiden Kameras.

Abhilfe schafft eine Bildtransformation, die durch eine sogenannte Rektifizierung die Bilder in den Normalfall überführt, dies wird in Abbildung 2.11 dargestellt. Der Prozess der Rektifizierung überführt die Geometrie eines allgemeinen Stereokamerasystems rechnerisch in die achsparallele Standardanordnung. Das originale Bildpaar wird dazu so auf eine gemeinsame imaginäre Bildebene abgebildet. Die optischen Zentren C werden beibehalten und die Punkte I werden über den Schnitt von PC mit B' auf I' abgebildet.

Durch die Einbeziehung der beschriebenen Eigenschaften eines realen Systems und deren Korrektur im Rahmen der Kamerakalibrierung bzw. Systemkalibrierung kann das reale System in den Stereonormalfall transformiert werden. Die geometrischen Zusammenhänge eines solchen Stereosystems erscheinen damit weitestgehend erklärt. Es gibt jedoch hier noch ein unmittelbares Problem, welches nicht auf Anhieb ersichtlich

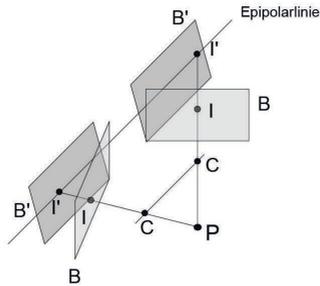


Abb. 2.11: Rektifizierung bei Stereobildern, beide realen Stereobilder werden auf eine gemeinsame imaginäre Bildebene abgebildet, die den Bedingungen der Standard-Stereometrie genügt

wird: die Ermittlung der korrespondierenden Punkte.

Korrespondenz

Mit der sogenannten Korrespondenz wird beschrieben, wie die korrespondierenden Objektpunkte in den jeweiligen Bildern ausfindig gemacht werden, um deren Position zu bestimmen. Für den Menschen erscheint dies recht leicht realisierbar, doch muss bedacht werden, dass das Bildverarbeitungssystem eine solche Korrespondenzanalyse durchführen muss und über keinerlei „Intelligenz“ verfügt. Dem Bildverarbeitungssystem müssen also Algorithmen hinzugefügt werden, die es ermöglichen, einen Objektpunkt und dessen korrespondierende Projektion in beiden Bildern zu finden. Methodisch lässt sich eine Untergliederung in intensitäts- und merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren vornehmen. Der Zuordnungsprozess ist mit einer erheblichen Komplexität verbunden, sodass die Menge der Kandidaten für eine Korrespondenz zunächst massiv eingeschränkt werden muss. Um Mehrdeutigkeiten aufzulösen, werden geometrische Abhängigkeiten sowie lokale Merkmalseigenschaften des Punktes herangezogen. Eine besondere Schwierigkeit der Korrespondenzanalyse in konvergenten Anordnungen mit großer Parallaxe ist die Abhängigkeit der lokalen Punktmerkmale von der Betrachtungsrichtung. Eine robuste Korrespondenzanalyse wird vor allem durch eine geringe räumliche Verschiebung der beiden Kamerazentren begünstigt. Dies steht im Konflikt mit der Forderung nach einer großen Basis im Sinne der Messgenauigkeit. In der Praxis stellt die Ausrichtung der Kameras daher meist einen Kompromiss zwischen Robustheit der Stereoanalyse und Präzision der Triangulationsmessung dar.

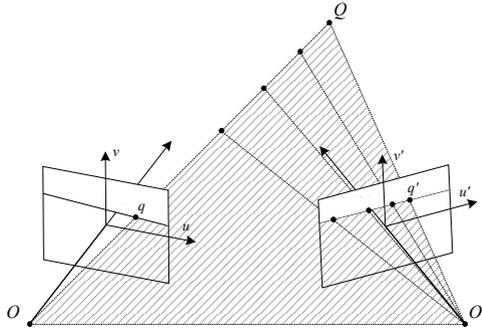


Abb. 2.12: Die Skizze zeigt die wesentlichen Elemente der Epipolargeometrie (Epipolarebene und Epipolarlinien). Die Epipole liegen hier nicht im sichtbaren Bereich der Bildebenen.

Eine äußerst verbreitete intensitätsbasierte Technik ist das Korrelationsverfahren, bei dem traditionell die epipolaren Linien, siehe Abbildung 2.12, über eine Korrelationsfunktion nach möglichen Paarungen abgesucht werden.

In der Bildverarbeitung werden mit Hilfe der Epipolargeometrie³ die geometrischen Beziehungen zwischen den korrespondierenden Bildpunkten zweier Kamerabilder mathematisch modelliert. Da die Epipolargeometrie unabhängig von der globalen Orientierung der Kameras ist, spricht man auch von einer intrinsischen projektiven Geometrie zweier optischer Systeme. Lediglich die relative Position der Kameras sowie deren innere Parameter bestimmen das Modell. Eine besondere Rolle spielt die Epipolargeometrie bei der Korrespondenzanalyse in nichtparallelen Stereokamerasystemen, um dort durch Einschränkung des Suchraumes eine erhöhte Performanz zu erzielen. Sie wird insbesondere zur Ermittlung der Lage eines Bildpunktes eingesetzt, dessen Lage im anderen Bild bereits bekannt ist. Eine genauere Darstellung in die Thematik findet sich beispielsweise in [30, S. 239 ff.]. In der Praxis ist die Anwendung der Epipolargeometrie oft durch die Suche nach korrespondierenden Punkten $\mathbf{q} \leftrightarrow \mathbf{q}'$ in Stereobildpaaren motiviert. Da diese Punkte einen gemeinsamen Objektpunkt \mathbf{Q} auf die beiden Bildebenen abbilden, erzeugt ihre Rückprojektion in den Objektraum zwei komplanare Geraden, die sich in \mathbf{Q} schneiden. Die durch die Geraden aufgespannte Ebene ist die Epipolarebene, siehe Abbildung 2.12. Angenommen, es ist lediglich der Bildpunkt \mathbf{q} auf der ersten Bildebene bekannt und man sucht seinen Korrespondenzpunkt \mathbf{q}' auf der zweiten Bildebene, so kann man darauf schließen, dass die

³auch Kern(strahl)geometrie oder Stereogeometrie

durch Rückprojektion von \mathbf{q} erzeugte Gerade den Objektpunkt \mathbf{Q} enthält und auf der Epipolarebene liegt. Der gesuchte Bildpunkt \mathbf{q}' muss daher gleichzeitig auf der zweiten Bildebene und der Epipolarebene liegen. Die Suche beschränkt sich also auf die Schnittgerade beider Ebenen. Dies ist die Epipolarlinie. Dies führt zu einer erheblichen Reduktion des Suchraumes und bedingt eine enorme Ersparnis an Rechenzeit sowie eine Verbesserung der Robustheit des Systems. Eine falsche Zuordnung korrespondierender Punkte wird weitgehend vermieden.

Eine Klassifikation der Stereoalgorithmen kann nach der Tiefeninformationsdichte der resultierenden Tiefen- oder Disparitätskarte erfolgen. Methoden, die Disparitäten nur für wenige Bildpunkte berechnen und damit eine geringe Dichte an Tiefeninformationen liefern, werden als sogenannte *sparse* Methoden bezeichnet. Bei diesen Stereoalgorithmen findet die Korrespondenzanalyse und Disparitätsberechnung anhand von Bildmerkmalen wie beispielsweise Kanten oder Ecken statt. Weitere Punkte werden aus den vorhandenen Korrespondenzen interpoliert. Dem entgegen stehen die sogenannten *dense* Methoden, bei diesen wird eine hohe Dichte an Tiefeninformationen errechnet. Zielsetzung ist es, möglichst für alle Bildpunkte die Disparität, also Tiefeninformation, zu gewinnen. Zur Berechnung dieser dichten Disparitätskarten kommen intensitätsbasierte Stereoalgorithmen, wie beispielsweise das Vergleichen der Intensität mittels Block-Matching zum Einsatz. Darüber hinaus existieren noch Hybridverfahren, die eine Verbesserung der Disparitätskarte aus einer Kombination der beiden Ansätze ermöglichen oder zur Minimierung des Rechenaufwandes genutzt werden.

Eine genauere Betrachtung der theoretischen Grundlagen erfolgt hier nicht, da die oben gegebenen Grundlagen die Vorgehensweise in dieser Arbeit und der dazu gehörenden verwendeten Sensorik sowie Software ausreichend beschreiben. In Tabelle 2.2 sind die Vor- und Nachteile von Stereokamerasystemen aufgeführt. Ein wesentlicher Vorteil liegt im geringen Hardwareaufwand in Verbindung mit geringen Kosten zur Erstellung eines solchen Systems. Wobei jedoch zu beachten ist, dass hier Bildverarbeitungswissen vorhanden sein muss, um ein System entsprechend bestimmter Anforderungen erstellen zu können. Durch die Fusion der Bilder oder Verwendung der Einzelbilder kann eine Vielzahl an Informationen gesammelt werden. Dies bietet die Möglichkeit, robuste und einfache Methoden zur 3D-Datengewinnung zu nutzen.

Vorteile	Nachteile
Geringer Hardwareaufwand	Korrespondenzproblem
Geringe Kosten	Geringer Messbereich
Hohe laterale Auflösung	hoher Softwareaufwand zur 3D-Datengewinnung
ggf. Farbinformationen	Framerate abhängig von Kameraauflösung und Szene
	Tiefenauflösung entfernungsabhängig

Tab. 2.2: Vor- und Nachteile von Stereovisionssystemen

2.4.3 Streifenlichtprojektion

Die Streifenlichtprojektion greift auf das Triangulationsprinzip zurück und gehört zu den aktiven Triangulationssystemen, welches mit dem codiertem Lichtansatz arbeitet. Der codierte Lichtansatz bietet ein sehr effizientes Verfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems. Dazu wird in einer traditionellen Stereokameraanordnung eine Kamera durch eine Projektionseinheit ersetzt. Mittels des Projektors wird z.B. eine Folge von flächenhafter binärer Streifenmuster erzeugt, die auf das Objekt projiziert werden. Die Kamera des Systems erfasst synchron die projizierten Muster. Die Frequenz der Muster verdoppelt sich bei jeder folgenden Aufnahme. Daraus ergibt sich eine Abfolge heller und dunkler Grauwerte, woraus sich für jedes Kamerapixel die Nummer der korrespondierenden Lichtebene eindeutig bestimmen lässt. Das bedeutet, es findet eine räumliche und zeitliche Codierung der Korrespondenzinformation statt. Bei den projizierten Strukturen handelt es sich um Streifen. Die Auflösung des Projektors und die Entfernung des Projektors vom Objekt bestimmen die Breite der Streifen.

Um eine hohe Genauigkeit zu erzielen, sollte die Zuordnung zwischen Punkten auf der Bildebene der Kamera und des Projektors subpixelgenau erfolgen. Dieses Verfahren bedient sich derselben theoretischen und geometrischen Prinzipien wie ein Stereokamerasystem, die im vorangegangenen Abschnitt erläutert worden sind. Zur Umgehung der möglichen mehrdeutigen Zuordnung zwischen den beobachteten Bildpunkten und den Punkten des Beleuchtungsmusters wird mit codierten Beleuchtungssequenzen gearbeitet, d.h., es wird jedem Beleuchtungsstrahl ein eindeutiges Codewort zugewiesen, vgl. Abbildung 2.13.

Die Codierung der Linien des Beleuchtungsmusters kann prinzipiell auf unterschiedliche Arten erfolgen. Die einfachste Methode ist die Verwendung eines n -stelligen Binärcodes. Die Problematik des Binärcodes liegt in der Decodierung, da relativ leicht Decodierungsfehler dazu führen können, dass die Linien nicht mehr zugeordnet werden können. Eine bekannte Alternative zum Binärcode ist der stetige Gray-Code, bei dem sich benachbarte Codewörter nur in einem Bit unterscheiden. Das bedeutet, dass bei einem Decodierungsfehler lediglich eine Abweichung von einer Linie verursacht würde. Bei Bildaufnahmesystemen erfolgt die Codierung durch eine Serie binärer Streifenmuster, wobei sich die Frequenz des Musters von einer Projektion zur nächsten verdoppelt. Synchron zur Projektion erfasst eine Kamera die vom Objekt reflektierten Muster. Diese Bilder werden anschließend binarisiert. Das bedeutet, es wird für jeden Bildpunkt ein binäres Codewort $b_0b_1 \dots b_{n-1}$ bestimmt, die einzelnen Bits b_i des Codeworts entsprechen der beobachteten Folge heller (Wert 1) und dunkler (Wert 0) Streifen an der Stelle. Mittels diesem Codewort kann eindeutig die Lichtebene identifiziert werden, welche den abgebildeten Objektpunkt enthält.

Dieses Vorgehen ergibt eine Streifennummer im Projektor, die mit der Bildkoordinate in der Kamera korrespondiert. Mittels dieser Korrespondenz kann, wie vorangegangen beschrieben, mit bekannter Kamera- und Projektorposition die Koordinate berechnet werden. Die Berechnung folgt mittels Vorwärtsschnitt wie im Abschnitt Stereoskopie beschrieben.

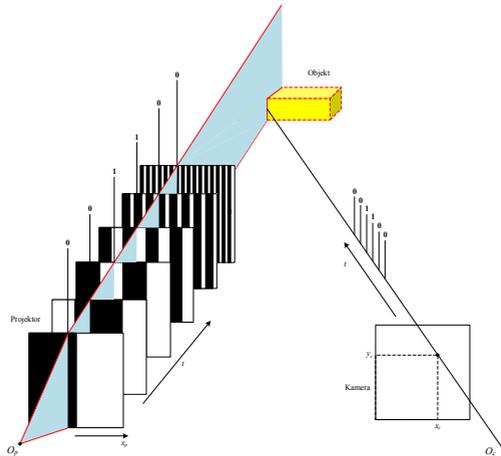


Abb. 2.13: Räumlich-zeitliche Codierung der Korrespondenzinformation mit aufeinanderfolgenden Gray-Code-Bildern

Bei der Binarisierung wird für jedes Pixel bestimmt, ob das dem Bild zugeordnete Bit gesetzt wird. Durch Fremdlicht oder unterschiedliche Reflektionseigenschaften der Objektoberfläche kommt es zu einer unterschiedlichen Intensitätsverteilung im Bild, daher ist die Verwendung eines globalen Schwellwertes bei der Binarisierung für das gesamte Messbild unzureichend. Für robuste Binarisierung und Decodierung wird ein pixelweise Schwellwert verwendet. Bei diesem Vorgehen wird die projizierte Sequenz um ein vollständig abgedunkeltes und ein vollständig beleuchtetes Bild erweitert. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist es, dass die zusätzlichen Bilder eine Klassifizierung der Pixel erlauben.

Es kann verifiziert werden, ob ein Pixel einer gültigen Messung entspricht oder einem ungültigen Bereich zuzuordnen ist. Eine ungültige Messung ergibt sich z.B. bei einer Abschattung des Strahlengangs, d.h., ein Teil der Oberfläche kann zwar in der Kamera abgebildet werden, ist aber aufgrund von Abschattungen vom Projektor nicht beleuchtet.

Dieses Vorgehen ermöglicht eine schnelle und einfache Binarisierung unter Verwendung eines positionsabhängigen Schwellwertes. Unzureichend erfasste Bildbereiche werden durch das Setzen eines Fehlerbits im Maskenbild von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen.

Mittels der Projektion der Gray-Code Sequenz wird die Korrespondenz zwischen Projektor-Koordinaten und Kamera-Koordinaten jedoch nur auf Pixelebene gelöst, da zu feine binäre codierte Sequenzen nicht aufgelöst werden können. Für sehr genaue

3D-Datenbestimmung bieten sich phasenverschobene Muster mit derselben Wellenlänge an. Dabei wird ein sinusförmig moduliertes Signal, Bilder, die einen sinusförmigen Intensitätsverlauf darstellen, auf das zu digitalisierende Objekt projiziert. Man spricht vom Phase-Shift-Verfahren. Es wird anhand der erfassten Bildern für jeden Bildpunkt die Phasenlage bestimmt, daraus lassen sich dann die korrespondierenden Punkte bestimmen. Aufgrund der kurzen Periodenlänge von nur wenigen Linien wird eine hohe Messgenauigkeit erzielt. Allerdings ist die Zuordnung nicht eindeutig möglich, da die Sinus-Funktion nicht eindeutig ist. Durch die Kombination der Phasenmessung mit der zuvor beschriebenen Gray-Code-Messung ist jedoch eine eindeutige Zuordnung mit hoher Genauigkeit möglich. Diese erlauben eine subpixelgenaue Positionsbestimmung auf der Bildebene des Projektors. Aufgrund dessen, dass die Phasenverschiebung aber nur im Bereich einer Wellenlänge des Streifenmusters eindeutig ist, werden bei den gängigen Systemen oft hybride Verfahren benutzt. Das bedeutet, zuerst wird die grobe Position mittels binärer Codierung bestimmt und anschließend erfolgt die subpixelgenaue Positionsbestimmung mittels Phasenverschiebung.

Eine Genauigkeitsvorhersage ist hier nur schwer möglich, da dies von den Einzelkomponenten wie Kamera, Projektor, etc. abhängig ist. Die Zusammenhänge sind ähnlich denen der Stereokameras und dem Lichtschnittverfahren. Es muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass dieses Verfahren bei dem Digitalisieren einer Szene zeitlich immer an die Projektionsdauer der Muster gebunden ist. Einen Überblick zu den aktuellen Erkenntnissen und den Möglichkeiten mit aktuell verfügbaren Projektoren wird in [31] gegeben. Die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens unterliegt einer starken Abhängigkeit von den Reflektionseigenschaften der Objektoberfläche. Spiegelungen oder Glanzeffekte müssen durch eine geeignete und eindeutig definierte Beleuchtung vermieden werden. In manchen Fällen bedarf es sogar der Präparation der Oberfläche, diese wird bestäubt oder ähnliches. Dieser Sachverhalt muss bei der industriellen Anwendung derartiger Verfahren beachtet werden, da sie den Prozess einschränken. Es sind jedoch momentan in diesem Bereich Entwicklungen zu beobachten, diese Verfahren deutlich zu beschleunigen. Die Fortschritte im Bereich der schnellen hochgenauen dreidimensionalen Erfassung von Szenen mittels der Musterprojektion werden anhand eines Sensors in [32] vorgestellt. Das Durchsetzungsvermögen und die Wirtschaftlichkeit derartiger Systeme bleibt abzuwarten.

Bei den vorgestellten Streifenlichtprojektionsverfahren gibt es eine relativ breite Auswahl an industrietauglicher Sensorik. Ein Nachteil ist jedoch, dass die Sensorik relativ komplex ist und für den produktionstechnischen Bereich im Wesentlichen nur als System angeboten wird. Dies schränkt dann oft bei der Nutzbarkeit der eigenen Softwarekomponenten oder die Individualisierung des Messfeldes ein, da man an die Vorgaben der Sensorhersteller gebunden ist. Zudem sind die genannten Systeme relativ hochpreisig.

2.4.4 Time-of-Flight Laufzeitverfahren

Die Entfernungsmessung mittels der Laufzeit eines Signals ist ein indirektes Verfahren zur Distanzmessung. Bei diesen Verfahren wird die Zeit, die ein ausgesendetes Signal

Vorteile	Nachteile
Hohe Genauigkeit	Ruhende Objekte
Hohe Tiefenauflösung	Geringer Messbereich
Hohe laterale Auflösung	Projektionstechnik bestimmt das System
	diffuse Reflexion vorausgesetzt

Tab. 2.3: Vor- und Nachteile von Streifenlichtprojektionsverfahren

für das Durchlaufen der gesuchten Entfernung benötigt, gemessen. Time-of-Flight Kameras sind 3D-Bildaufnahmesysteme, die mittels Lichtlaufzeitmessung die Distanzen zur Objektoberfläche bestimmen. Das Prinzip der Digitalisierung kann vereinfacht so dargestellt werden, dass das Bildaufnahmesystem ein Lichtsignal aussendet und für jeden Bildpunkt die Zeit bestimmt, die das Signal bis zur Objektoberfläche und wieder zurück benötigt. Es wird also für jeden Punkt im zu erzeugenden Bild die Entfernung des darauf abgebildeten Objektes bestimmt. Das bietet den Vorteil, dass die gesamte Szene unmittelbar mit entsprechenden Tiefeninformationen und nur mit einer Kamera digitalisiert wird.

Es wird die Zeit bestimmt, die das vom Sender ausgesandte Signal für die Strecke vom Sender bis zum Objekt zurück zum Empfänger benötigt. Wird dieses Verfahren genutzt, wird bei der Anordnung von Sender und Empfänger davon ausgegangen, dass diese dicht beieinander liegen. Bei bekannter Lichtgeschwindigkeit c ist es dann möglich, den zurückgelegten Weg des Lichts s zu bestimmen und damit die Entfernung d des Objekts zu berechnen.

$$d = \frac{s}{2} = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.19)$$

Zwischen Lichtlaufzeit t und der Entfernung s besteht eine lineare Abhängigkeit. Soll mit der beschriebenen Anordnung eine Auflösung im Millimeterbereich erzielt werden, ergeben sich sehr hohe Anforderungen an das Empfängermodul, da die empfangenen Pulse im Pikosekundenbereich ausgewertet werden müssen. Um ein solches Bildaufnahmesystem zu realisieren, muss jedes Element dieses Systems über eine extrem hohe Bandbreite verfügen. Die Amplitudenmodulation des Lichts ermöglicht unterschiedliche Herangehensweisen zur Aussendung der Signale. Es wird unterschieden in Pulsmodulation und Continuous-Wave (CW) Modulation.

Bei der Pulsmodulation wird an der Lichtquelle ein kurzer Lichtimpuls als optisches Signal emittiert, gleichzeitig wird ein Startsignal an die Elektronik abgegeben, um die Laufzeitmessung zu starten. Die Zeitmessung erfolgt über die zeitliche Integration der Lichtintensität innerhalb eines definierten Zeitfensters. Die Distanz kann mit Gleichung (2.19) berechnet werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass Mehrfachziele unterschieden werden können. Nachteile sind die durch die hohe Lichtgeschwindigkeit aufwendige Zeitmessung und dadurch bedingt benötigte hohe Bandbreite für eine gu-

te Auflösung.

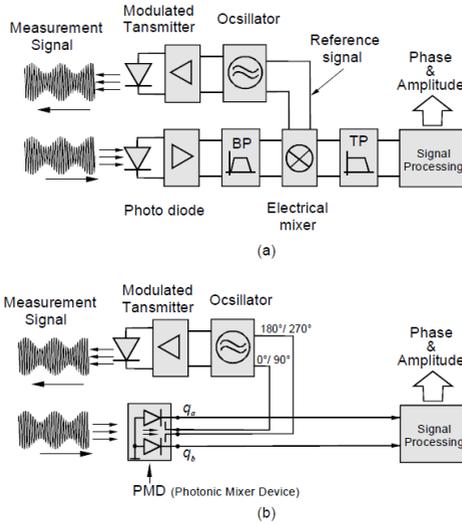


Abb. 2.14: Prinzip der Lichtlaufzeitmessung (a) Conventional continuous-wave modulation TOF-measurement; (b) Messprinzip eines PMD Time of Flight Sensors [33]

Als eine andere Methode bietet es sich an, dass ein kontinuierlich amplitudenmoduliertes Licht als Trägersignal ausgesendet wird. Das Continuous-Wave-Verfahren verwendet monofrequente, amplitudenmodulierte Lichtsignale mit der Modulationsfrequenz f_{mod} . Es wird die Laufzeit über die Differenz der Phasenlage φ_d gemessen, die zwischen dem Sende- und Empfangssignal ermittelt werden kann. Bei einer Modulationsperiodendauer T_{mod} des modulierten Signals ergibt sich dann für die Phasenverschiebung nach der Laufzeit t_L :

$$t_L = T_{mod} \cdot \frac{\varphi_d}{2\pi} \quad (2.20)$$

Setzt man diese Laufzeit t_L in Gleichung 2.19 ein, ergibt sich die Distanz:

$$d = \frac{c \cdot T_{mod}}{2} \cdot \frac{\varphi_d}{2\pi} \quad (2.21)$$

Die Eindeutigkeit der Messung über die Entfernung wird durch die periodische Wiederholung des Modulationssignals begrenzt. Eine eindeutige Entfernungsmessung kann innerhalb des Eindeutigkeitsbereiches Z_{max} im Winkelbereich von 2π der Modulationsfrequenz f_{mod} durchgeführt werden. Es ergibt sich für die Kenngrößen des Modulationssignals, mit der Modulationswellenlänge λ_{mod} , der Modulationsfrequenz f_{mod} , der Modulationsperiodendauer T_{mod} und der Eindeutigkeitsbereich Z_{max} der folgende Zusammenhang:

$$Z_{max} = \frac{\lambda_{mod}}{2} = \frac{c}{2f_{mod}} = \frac{T_{mod} \cdot c}{2} \quad (2.22)$$

Das Messverfahren der PMD-Kamera basiert auf diesem Sachverhalt. Es wird der Phasenunterschied zwischen dem reflektierten Licht einer kontinuierlich modulierten Lichtquelle und einem auf dem PMD-Sensor gleichartig moduliertem Referenzsignal bestimmt. Ein PMD Sensor (Photonic Mixer Device) ist zugleich ein Photodetektor und ein optoelektronischer Mischer. Der Sensor vereint als integriertes Bauelement mehrere Funktionen des konventionellen Modulationsinterferometrieverfahrens. Das Grundprinzip und der genaue Aufbau eines PMD-Sensors bzw. eines Pixels kann der Literatur beispielsweise [34] oder [35] entnommen werden. Die Beleuchtungsmodule bestehen aus LED-Arrays. Von diesen wird moduliertes Licht ausgesendet. Das Licht wird von der Szene reflektiert und durch die Optik auf den PMD-Sensor projiziert. Die Integrationszeit (vergleichbar mit der Belichtungszeit bei einer CCD Kamera) bestimmt die Bildrate. Mit aktuellen PMD-Kameras können Bildraten von bis zu 100 Frames/s erzielt werden. Die Messgenauigkeit eines PMD-Systems wird durch das System selbst und durch die Menge des einfallenden modulierten Lichtes beeinflusst. Bei zu wenig einfallendem Licht kommt es zu Rauschen, bei zu viel einfallendem Licht kommt es zur Übersättigung. Ein BVS mit PMD-Kamera als Lösung einer Automatisierungsaufgabe muss wie jedes andere BVS an die jeweilige Anwendung angepasst werden, um den besten Kompromiss zwischen den gestellten Anforderungen und der Realisierbarkeit zu erzeugen.

Die erzielbare Tiefengenauigkeit hängt primär von der Menge des einfallenden Lichtes ab. Die Menge des Lichtes ergibt sich aus der Messentfernung, der Größe der lichtempfindlichen Pixel und der Strahlungsstärke der eingesetzten Beleuchtung. Ein Problem ist die laterale Auflösung, diese kann nur mit einer hohen Pixeldichte des Chips erreicht werden. Bei einer hohen Pixeldichte muss die Größe des einzelnen Pixels reduziert werden, was dazu führt, dass die Empfindlichkeit des Pixels abnimmt. Typische Pixelgrößen aktueller PMD-Kameras liegen im Bereich 40-500 μm , das würde bei einem Megapixel-Chip mit angenommener Pixelgröße von 250 μm , der bei CCD- oder CMOS-Kamera üblich ist, eine Sensorgröße von mehr als 20 cm^2 ergeben. Darunter leidet die Wirtschaftlichkeit, Größe und Verwendbarkeit derartiger Kameras.

Die Messunsicherheit dR eines PMD-Systems kann nach [34] wie folgt berechnet werden:

$$dR = \frac{1}{\sqrt{N_{Phase}}} \cdot \frac{1}{k_{tot} \cdot \frac{S}{N}} \cdot \frac{\lambda_{mod}}{\pi\sqrt{8}} \quad (2.23)$$

Hierbei entspricht N_{Phase} der Anzahl der Rohwert-Messungen bei sequentiell „phase shift“, k_{tot} dem Modulationskontrast, S der Anzahl der von dem modulierten Licht generierten Signalelektronen, λ_{mod} der Wellenlänge des Modulationssignals und N der Anzahl der Rauschelektronen. Aus diesem Zusammenhang wird ersichtlich, dass das Rauschen durch die Parameter S, N und k_{tot} aktiv beeinflusst werden kann. Wenn die Anzahl der Signalelektronen viel größer als die Anzahl der Rauschelektronen ist, dann geht die Messunsicherheit gegen Null: $\frac{S}{N} \rightarrow \infty \Rightarrow dR \rightarrow 0$. Dementsprechend sind schlecht reflektierende Materialien und große Entfernungen zur Szene ein grundsätzliches Problem für PMD-Systeme.

Die aktuellen Forschungsbeiträge im Bereich Time-of-Flight Sensorik zeigen, dass die Bildgebung mit diesem Verfahren stetig verbessert wird. So wird beispielsweise in [36] dargestellt, wie das Rauschen in den Daten von Time-of-Flight erzeugten Signalen gemindert werden kann.

Der Beitrag von [37] zeigt, wie Time-of-Flight Sensoriken multimodal verwendet werden können, beispielsweise in Kombination mit Stereokamerasystemen.

Dies verdeutlicht das ständig wachsende Potential bei der hier vorgestellten 3D-Datengewinnung. In Tabelle 2.4 sind die Vor- und Nachteile von PMD-Kameras in der Produktionstechnik kurz dargestellt.

Vorteile	Nachteile
keine Mechaniken/Kinematiken nötig	hohes Grundrauschen
Geschwindigkeit (echtzeitfähig)	geringe laterale Auflösung
sehr geringe Baugröße	geringe Tiefenauflösung
Robustheit	junges Forschungsfeld
geringe Kosten	

Tab. 2.4: Vor- und Nachteile von PMD

2.4.5 Lichtfeldkamera

Das Lichtfeld ist der dreidimensionale Raum, in welchem an jeder Position (X, Y, Z) die dort vorhandene Strahldichte L definiert ist. Die plenoptische Funktion $L(X, Y, Z, \theta, \varphi)$ beschreibt die Verteilung dieser Strahldichte entlang von Lichtstrahlen, vgl. [38]. Neben der Raumposition beschreiben zwei Winkel die Richtung des Lichtstrahls. Dabei wird von einem 4D-Lichtfeld gesprochen, wenn die Funktion auf eine Referenzebene bezogen wird, in der die Strahldichte an jedem Punkt x, y definiert ist, vgl. [17]. Eine Lichtfeldkamera oder plenoptische Kamera ist eine spezielle Kamera, die einen Ausschnitt des Lichtfelds erfassen kann. Dabei werden Raumrichtung, Farbwert und Entfernung eines Objektpunktes im Bildsensor so abgebildet, dass sie rekonstruierbar

sind. Dies ermöglicht, eine 3D-Beschreibung der Szene aus nur einem Bild abzuleiten. Außerdem ermöglicht es diese Technik, eine die Fokusebene frei zu definieren. Bei einer Lichtfeldkamera ist im Unterschied zu einer herkömmlichen Kamera ein Mikrolinsenarray vor der Bildebene angebracht, siehe hierzu Abbildung 2.15.

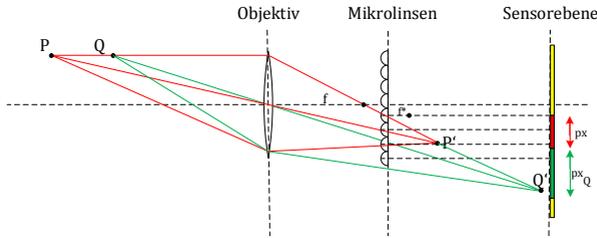


Abb. 2.15: Prinzip der Lichtfeldkamera [38]

Daraus ergibt sich, dass je nach Aufnahmeentfernung das Bild eines Objektpunktes von unterschiedlich vielen Mikrolinsen auf den Bildsensor abgebildet wird. Es ergibt sich ein facettenhaftes Bild mit Mehrfachabbildungen von Szenenausschnitten. Über diese wird eine entfernungsabhängige Parallaxe bestimmt, aus der der 3D-Punkt berechnet werden kann. Die Ermittlung von 3D-Informationen einer Szene wird in [39] genauer erläutert. Aufgrund der Komplexität des Verfahrens und der vielfältigen Methoden, die beispielsweise bei der Erzeugung von Tiefenkarten Verwendung finden, sei hier nur auf die weiterführende Literatur [38], [39] und [18] hingewiesen. Auch ist der Markt der Lichtfeldkameras momentan noch recht übersichtlich.

Aufgrund der recht neuen Technologie der Lichtfeldkameras ist es an dieser Stelle nicht möglich, diese qualitativ für die Produktionstechnik zu beurteilen, da zu Projektlaufzeit keine ausreichende Datenbasis in diesem Bereich zur Verfügung stand. Eine kurze Übersicht zu der noch jungen Technologie wird in Tabelle 2.5 gegeben. Es muss darauf hingewiesen werden, dass diese Technologie großes Potential für die Produktionstechnik birgt.

2.4.6 Einfluss Tiefengenaugkeit

An dieser Stelle werden noch einmal kurz die Eigenschaften der vorgestellten Bildaufnahmesysteme zusammengefasst, um eine Gegenüberstellung von deren Eigenschaften für die Auswahl eines geeigneten Systems darzustellen. Lasertriangulation, Stereoaufnahme Verfahren und Streifenlichtprojektion lassen sich zusammenfassen als triangulationsbasierte Verfahren zur Gewinnung von Tiefeninformationen. Die Zu-

Vorteile	Nachteile
Ein-Kamerasystem	kommerziell kaum verfügbar
3D-Messung im Nahbereich	begrenzte Tiefenauflösung
Schätzung der optischen Eigenschaften der Oberflächen	junges Forschungsfeld
Bilder mit erweiterter Tiefenschärfe	

Tab. 2.5: Vor- und Nachteile von Lichtfeld

verlässigkeit der gewonnenen Informationen ist bei diesen optischen Verfahren in der Praxis von mehreren Einflüssen abhängig:

- mathematisches Modell des Bildaufnahmesystems
- Erfassung und Korrektur der Abbildungsfehler
- Genauigkeit der Koordinatentransformation (auch als Klaffung bezeichnet)
- Kalibrierungsfehler (Überführung in Weltkoordinaten)
- Messobjekt (Eigenschaften zur Beeinflussung des Bildaufnahmesystems)

Diese Zusammenhänge können im Vorfeld für die Auswahl eines geeigneten Bildaufnahmesystems nur schwer betrachtet werden. Daher werden zunächst nur die reinen physikalischen Grenzen der Messunsicherheit von den beschriebenen Triangulationsverfahren erfasst.

Diese ergeben sich vor allem durch die optischen Eigenschaften des Bildaufnahmesystems (Apertur), die Textur der Szene und dem Triangulationswinkel. Auf die elementaren Bestandteile heruntergebrochen, ergibt sich der in Abbildung 2.16 dargestellte Aufbau.

$$z = \frac{bf}{u} \quad (2.24)$$

Mittels der Fehlerfortpflanzung ist eine Einschätzung des zu erwartenden Fehlers Δz der Tiefen möglich, wobei angenommen wird, dass die beiden Konstanten f und b des Stereokamerasystems fehlerfrei sind. Es folgt für den Fehler:

$$\Delta z = \left| \frac{\delta z}{\delta u} \Delta u \right| = \frac{z^2}{bf} \Delta u \quad (2.25)$$

Die Genauigkeit bzw. Tiefenauflösung dieser Sensoren ist also direkt von der Genauigkeit Δu abhängig, mit der die Position des Bildpunktes erfasst werden kann, das heißt also von der Genauigkeit, mit der die eigentliche Messinformation gewonnen wird. Bei den vorgestellten Verfahren Lichtschnitt ist dies die Bestimmung des Intensitätsmaximums des projizierten Punktes, bei der Streifenlichtprojektion die Phasenmessgenauigkeit und bei dem Stereokamerasystem die Disparität. Bei einem üblichen Detektor, z.B. CCD-Chip, hängt das Auflösungsvermögen vom Pixelabstand ab. Es

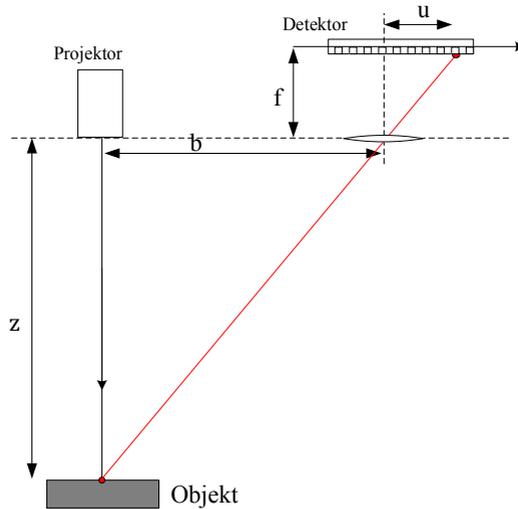


Abb. 2.16: Einfaches Lochkameramodell zur Darstellung des Triangulationsprinzips, durch die Änderung der Distanz z ergibt sich eine Änderung von u , da die Projektion auf dem Detektor sich ändert.

bieten sich aber auch hier Verfahren an, den zu triangulierenden Bildpunkt, der sich über mehrere Pixel erstrecken kann, mit Subpixelgenauigkeit zu bestimmen und damit die Genauigkeit wie bei der lateralen Genauigkeit zu verbessern.

Bezogen auf das Messfeld, kann man bei den triangulierenden Verfahren bezogen auf das Messfeld Messunsicherheiten von $\frac{1}{10000}$ des Messfelddurchmessers erreichen. Dies deckt sich mit den Aussagen der Literatur vgl. [23].

Bei ToF-Sensoren, wie beispielsweise den beschriebenen PMD-Kameras, ist nur wenig Einflussnahme möglich, diese für eine industrielle Anwendung anzupassen. Das bedeutet, man ist an die Herstellerangaben der Bildaufnahmesysteme gebunden. Darüber hinaus muss bei diesen Systemen beachtet werden, dass die Genauigkeit durch Mittelung oder Best-Fit-Algorithmen erheblich gesteigert werden kann, als es die Rohdaten vermuten lassen.

Diese Verfahren befassen sich mit der Verarbeitung der durch das Bildaufnahmesystem gewonnenen Punktwolken. Diese sind mehr oder minder Fehler belastet und weisen teilweise inakzeptable systematische Abweichungen auf. Diese Abweichungen können mittels Messung vieler Punkte in Kombination mit Besteinpassungsverfahren verbessert werden. Es kann schon in der Punktwolkenvorverarbeitung eine Interpolation zur Generierung zusätzlicher Punkte durchgeführt werden oder mittels Glättung

Ausreißer eliminiert werden, sodass sich eine verbesserte Punktwolke ergibt. Der nächste Schritt wäre die Weiterverarbeitung der gewonnenen Punktwolke. Es können beispielsweise Regelgeometrien approximiert werden, diese können dann durch adaptive Ausgleichsrechnung segmentiert werden.

Die Approximation und Segmentierung führen zu einer Genauigkeitssteigerung, da die idealen Geometrien des Objektes angenähert werden. Voraussetzung dafür ist, dass das Objekt durch eine Regelgeometrie beschrieben werden kann.

Zusätzlich kann die Genauigkeit oder das Segmentieren bei der Detektion von Objekten in Punktwolken verbessert werden, wenn das zu suchende Objekt als Modell vorliegt. Diese Methode erlaubt einen Vergleich der zu erfassenden Objektgeometrie mit einem Datensatz oder Modell. Vorteil dieser Verfahren sind neben der Präzision, die umfangreichen Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeiten von Ergebnissen. Bei den sogenannten Best-Fit-Verfahren werden die Oberflächen der beiden Datensätze Modell und gewonnene Punktwolke solange gegeneinander verschoben und verdreht, bis ein im Vorfeld definiertes Abbruchkriterium, beispielsweise die minimale Summe der Abweichungsquadrate, erfüllt ist. Der Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus ist eine weit verbreitete Methode für die Ausrichtung von 3D-Modellen. In [40] wird die Anwendung und das Potential des ICP Algorithmus näher beschrieben.

Eine detaillierte Beschreibung wird an dieser Stelle nicht gegeben, da die Verarbeitung von 3D-Punktwolken sehr umfangreich ist. Die Algorithmen reichen von der einfachen Vorverarbeitung bis zu hoch komplexen Registrierungsverfahren zur wissensbasierten Objekterkennung deren Erörterung zu umfassend wäre. Zudem ist es komplex, die Möglichkeiten dieser Verfahren mit in den Entwurf, in deren Kontext sich diese Arbeit bewegt, einzubeziehen. Bei der Genauigkeitsbetrachtung sowohl der lateralen als auch der Tiefengenauigkeit muss sorgfältig und verfahrensunabhängig zwischen bildpunktbezogener und merkmalsbezogener Interpretation unterschieden werden.

2.4.7 Auswahl

Die beschriebene Einordnung der Bildverarbeitung und die Zielsetzung dieser Arbeit stellen spezielle Anforderungen an die Bildaufnahmesysteme. An dieser Stelle soll die detaillierte Beschreibung zur Gewinnung von 3D-Daten und Bildaufnahmesystemen eingestellt werden. Es gibt noch andere Verfahren, die zur 3D-Datengewinnung eingesetzt werden können und die in bestimmten Anwendungsfällen ihre Vorteile haben. Die hier genannten Verfahren sind am weitesten verbreitet und als Standardkomponenten verfügbar oder lassen sich mittels Standardkomponenten und leistungsfähiger BV-Bibliotheken schnell erstellen. Auch im Bereich der sogenannten Low-Cost Sensoren sind zunehmend leistungsfähige Systeme zu finden. Eine gute Übersicht hierzu ist [41] zu entnehmen.

Im Folgenden wird eine Auswahl an Bildaufnahmesystemen getroffen werden, die bei dem methodischen Vorgehen mit in die Entscheidungsfindung einbezogen werden. Die getroffene Auswahl soll nicht als exklusiv angesehen werden, sondern vielmehr als

Einschränkung des Rahmens dieser Arbeit dienen. Es wird eine sinnvolle Begrenzung der Möglichkeiten vorgenommen, um exemplarisch das Vorgehen anhand der Auswahl darzustellen. Diese Vorgehen kann dann bei Bedarf an andere Bildaufnahmesysteme angepasst werden. Bei der Auswahl des Verfahrens zur Gewinnung der 3D-Daten für das zu entwickelnde System beschränkt sich diese Arbeit auf Bildaufnahmesysteme, die mit folgenden Verfahren arbeiten:

- Stereo-Systeme
- Lichtschnitt-Systeme
- Streifenlichtprojektions-Systeme
- ToF-Systeme

Bei den in Kapitel 5 modellierten Systemen und dem dazu beschriebenen Entwicklungsablauf werden also nur diese vier Systeme betrachtet, um die Übersichtlichkeit der Arbeit zu wahren und der aktuellen Marktsituation zu Projektlaufzeit zu entsprechen.

2.5 Bildverarbeitungssoftware

Für die Entwicklung von Bildverarbeitungssystemen wird neben dem bildgebenden System auch noch eine geeignete Software benötigt. Die Software als unverzichtbare Komponente des BVS ermöglicht mit dem Einsatz bestimmter Algorithmen den Ablauf der in Abbildung 2.3 dargestellten Bildverarbeitungskette. Die Qualität der Software bzw. die Implementierung unterschiedlicher Algorithmen in der Software ist für den Einsatz im Umfeld der Produktionstechnik sehr wichtig, da eine Abhängigkeit zwischen den Entscheidungen des BVS und der Fehlerquote des Gesamtsystems und der Produktionsanlage besteht.

Bei der industriellen Bildverarbeitung werden unterschiedliche Aufgabenstellungen softwaregesteuert gelöst:

- Parametrierung Bildaufnahmesystem
- Bildeinzug
- Bildverarbeitung
- Prozesskommunikation
- Mensch-Maschine-Kommunikation

Die dargestellten Aufgaben müssen bei der Projektierung eines BVS mit betrachtet werden. Bei den genannten Aufgaben sind Teilgebiete dabei, die auch schon in anderem Zusammenhang mit BVS erwähnt worden sind bzw. sich mit diesen überschneiden. Es wird deutlich, dass die Bildverarbeitungssoftware in einem industriellen BVS der Kern des Gesamtsystems ist, da hier alle Komponenten zusammengefügt werden. Auch die Performanz, mit der die Bilder vom BVS verarbeitet und in eine Entscheidung überführt werden, ist für die Produktionsanlage von Bedeutung. Neben

der Performance der Software selber ist auch die Geschwindigkeit, mit der man mit etwaigen Softwarewerkzeugen eine Anwendung für die Produktionstechnik erzeugen kann, von Bedeutung.

Es ist auch möglich, die Software zur Lösung des Automatisierungsproblems selbst mittels einer Hochsprache zu programmieren, beispielsweise C++, was zum einen Kenntnisse der verwendeten Programmiersprache und deren Entwicklungsumgebung, zum anderen Sachkenntnis im Bereich der Algorithmen der Bildverarbeitung erfordert. Das bedeutet, es können die Funktionen in einer höheren Programmiersprache erstellt werden oder es kommen Funktionen aus zugekauften Bibliotheken zum Einsatz. In Tabelle 2.6 werden die Vor- und Nachteile bei Verwendung von Bibliotheken und Hochsprachen gegenübergestellt. Der Zeitraum für die Entwicklung, Qualität der Programmierer sowie die verwendete Bibliothek werden nicht in diese Betrachtung mit einbezogen.

In der Gegenwart bedient man sich fertig zusammengestellter Bildverarbeitungssoft-

Vorteile bei Verwendung von Hochsprache	Vorteile bei Verwendung von BV-Bibliothek
individuell und applikationsspezifisch entspricht den Applikationsanforderungen	abrufbare Funktionen bewährte Funktionen
Nachteile bei Verwendung von Hochsprache	Nachteile bei Verwendung von BV-Bibliothek
zeitaufwändig und kostenintensiv	Lizenzkosten für Development und Runtime
bedingte Korrektheit	Hersteller gebunden

Tab. 2.6: Vor- und Nachteile bei der Verwendung von BV-Bibliotheken

ware bzw. Bibliotheken. Diese bringen bestimmte Methoden und Algorithmen mit und senken so den Programmieraufwand. In diesem Bereich gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die hier kurz vorgestellt werden sollen.

[42] unterscheidet drei Softwaretypen für die industrielle Bildverarbeitung, wobei keine deutliche Abstufung zwischen diesen erfolgt, sondern eher ein fließender Übergang beschrieben wird:

- Software-Bibliothek
- Geschlossenes System
- Komponentenbasiertes System

Eine Software-Bibliothek ist flexibel einsetzbar und oft mit unterschiedlichen anderen Softwareentwicklungswerkzeugen kombinierbar, sodass sie den Erfordernissen des Automatisierungsproblems angepasst werden kann. Eine Software-Bibliothek bietet unterschiedliche BV-Algorithmen und Operatoren, die frei einsetzbar sind. Dabei

kann oft das Softwareinterface der eigenen Entwicklungsumgebung des Integrators genutzt werden. Auch die Reihenfolge der Abarbeitung bestimmter Operationen ist nicht festgelegt, wie bei einigen geschlossenen Systemen. Der Entwickler kann daraus basierend auf seiner Wissensbasis eine Anwendung nach seinen Vorstellungen erstellen. Diese Form der BV-Software Entwicklung setzt gute Programmierkenntnisse und Bildverarbeitungskenntnisse voraus, bietet aber die höchste Flexibilität, vgl. [42].

Ein geschlossenes System ist Software, die im Auslieferungszustand ablauffähig ist und nicht mehr programmiert werden muss. Die sogenannte „geschlossene Software“ wird meist vom Anbieter bereits für eine festgelegte Verwendung vorkonfiguriert und bietet kaum Möglichkeit, den Umfang zu erweitern, vgl. [42].

Ein komponentenbasiertes System beruht in der Softwaretechnik auf der Verwendung des Komponentenmodells, wobei das System unter dem Paradigma der komponentenbasierten Entwicklung erstellt wird. Komponenten repräsentieren speziell im Hinblick auf Wiederverwendung entworfene und implementierte Softwarebausteine. Darüber hinaus wird spezifiziert, wie Komponenten miteinander interagieren und verbunden werden können, d.h., es können unterschiedliche Softwarekomponenten miteinander kombiniert werden. Die verwendeten Softwarekomponenten können auch von unterschiedlichen Anbietern oder Herstellern stammen. Der Vorteil ist, die Entwicklung geschieht anhand von Tools, die einen gewissen Freiraum bei der Parametrierung geben; außerdem ist eine Programmierung noch nötig. Ein Beispiel ist die Microsoft-Architektur Component Object Mode vgl. [42].

Der Markt für industrielle Bildverarbeitung bietet verschiedene Softwarelösungen für diesen Bereich an, die sich zum Teil auch an unterschiedliche Klientele wenden. Die Software unterscheidet sich im Umfang, Einsatzgebiet, Programmieraufwand, unterstützte Bildaufnahmesysteme und Support. Software-Bibliotheken für den benannten Bereich können an die Anforderungen in der Produktionstechnik beliebig angepasst werden, sie bieten darüber hinaus die Möglichkeit, sie in bestehende Software eines Integrators mit einzubeziehen.

Es wird jedoch ein gewisses Expertenwissen in der Bildverarbeitung und Programmierkenntnisse für die Anwendungserstellung vorausgesetzt. Sie bieten sich dann an, wenn das gesamte Automatisierungsproblem von einem Integrator gelöst werden soll, der die nötige Bildverarbeitungskompetenz hat. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die BVS mittels solcher Bibliotheken umgesetzt werden und das nötige Wissen bei dem jeweiligen Entwickler vorhanden ist. Dies gewährleistet zum einen die Wiederverwertbarkeit und zum anderen, dass etwaig erworbene Kompetenz dem Unternehmen erhalten bleibt.

2.6 Modellbildung

Eine effiziente Entwicklung von technischen Systemen, wie Automatisierungsprojekten oder Bildverarbeitungssystemen, verlangt eine eingehende Analyse des Problems, das gelöst werden soll. Die Analyse von technischen Prozessen bedient sich der Anwendung von Modellen.

Ziel ist es dabei, mittels Modellbildung eine auf das Wesentliche reduzierte Beschreibung der Realität zu erreichen, ohne diese zu verfälschen. Die Modellbildung ist der Abstraktionsvorgang zur vereinfachenden Darstellung des Systems unter Anwendung eines Modellierungskonzeptes. In [19] wird dies als erster Lösungsschritt für die meisten Automatisierungsaufgaben bezeichnet.

Zunächst sollen die wichtigsten Modellierungsprinzipien, also das Vorgehen bei der Modellierung, betrachtet werden. Zu Beginn der Modellierung eines Systems oder Prozesses steht die Abstraktion, also Verallgemeinerung durch Vernachlässigung von Eigenschaften. Die Problemstellung bestimmt hierbei die Aspekte, die vernachlässigbar sind. Ziel der Abstraktion ist die Reduzierung von Komplexität.

Die Strukturierung grenzt die Bestandteile des Gesamtsystems ab, wodurch diese getrennt vom Ganzen betrachtet werden. Daraus folgt eine sinnvolle Zerlegung der Problemstellung, mit der Zielsetzung in Richtung Modularisierung und Hierarchisierung. Modularisierung (Schaffung von funktional abgeschlossenen Bausteinen) und Hierarchisierung (Erstellung einer Rangfolge) sind unmittelbar miteinander verknüpft, was bedeutet, der konkrete Aufbau des Modells, also die Konfiguration aller Module, ist durch die Struktur der Hierarchie dargestellt.

In der objektorientierten Softwareentwicklung würde man von einer Aggregation, also Teil von etwas, sprechen. In der Softwareentwicklung heißt es, dass durch die Hierarchisierung die Komplexität der Strukturen verringert und die Transparenz für alle Planungs- und Entscheidungsbeteiligten erhöht wird, vgl. [43]. Dieser Ansatz soll auch für die hier beschriebene Modellbildung gelten.

2.6.1 Geeignete Modellierungstechniken

Die Planung, Projektierung und Entwicklung von BVS kann durch eine Modellierung des Zielsystems unterstützt werden. Eine Modellierung bietet die Möglichkeit, einen Überblick über das Gesamtsystem zu generieren und hieraus Aufgaben und Kernfunktionen abzuleiten.

Dies ermöglicht eine fundierte Abschätzung des Entwicklungsverlaufs und den damit verbundenen Aufwand. Die zweckorientierte Modellierung eines BVS setzt eine geeignete Modellierungstechnik voraus. Daher soll hier kurz die Terminologie, die eine Modellierungstechnik charakterisiert, erläutert werden. Aufbauend darauf soll aus der Vielzahl der Modellierungstechniken die für den Zweck dieser Arbeit passende ausgewählt werden.

Der Begriff des Modellierungskonzeptes ist recht frei definiert, aber grundsätzlich noch umfassender als die Modellierungsmethode. Eine Modellierungsmethode kann mehrere Modellierungstechniken beinhalten, die wiederum einem Sichtenkonzept zugeordnet sind. Zur Reduzierung der Systemkomplexität ist es sinnvoll, ein System aus verschiedenen statischen und dynamischen Perspektiven, den sogenannten Sichten, zu beschreiben, vgl.[44]. Die Modellierungskonzepte werden bei [45] in folgende vier Gruppen aufgeteilt:

- Datenorientierte Modellierung

- Prozessorientierte Modellierung
- Zustandsorientierte Modellierung
- Objektorientierte Modellierung

Diese Modellierungskonzepte stellen im Grunde den Ausgangspunkt für die Modellbildung dar. Dabei ergeben sich unterschiedliche Werkzeuge, mit denen man ein Modell bilden kann. So kann zum Beispiel mittels Differentialgleichungen ein dynamisches System sehr gut abgebildet werden. Sequentielle Vorgänge werden am besten mittels Petri-Netzen oder endlichen Automaten beschrieben.

Ausgehend von der bisherigen Einordnung des BVS als System mit unterschiedlichen Komponenten und Schnittstellen mit anderen Bereichen der Automatisierungstechnik, also das BVS, bestehend aus Objekten, wird für diese Arbeit die objektorientierte Modellierung ausgewählt.

2.7 Objektorientierte Modellierung

Die Anforderungen an das Modellierungskonzept ergeben sich aus der vorangegangenen Einordnung eines BVS und der Integration dieser Systeme in die Architektur der Produktionssysteme. Die objektorientierte Modellierung erlaubt die Beschreibung und Betrachtung des Systems auf unterschiedliche Arten bzw. aus unterschiedlichen Sichten. Dabei arbeitet die objektorientierte Modellierung mit unterschiedlichen Werkzeugen, um ein System möglichst vollständig zu erfassen. Ein Werkzeug zur Dokumentation der objektorientierten Modellierung ist die Unified Modeling Language (UML). UML ist von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) standardisiert, vgl. [46]. UML legt dabei Bezeichner für die meisten der bei der objektorientierten Modellierung wichtigen Begriffe fest.

Der Vorteil der objektorientierten Modellierung ist, dass durchgängig in allen Phasen des Entwicklungsprozesses, Analyse, Entwurf und Implementierung, dasselbe Beschreibungskonzept genutzt wird und UML die hierfür nötigen Werkzeuge bereitstellt. Es werden zunächst die Anforderungen an die Modellierung für die vorgestellte Methodik beschrieben, dabei wird auf die objektorientierten Konzepte verwiesen, die diese Anforderungen erfüllen.

Anschließend werden die Möglichkeiten der objektorientierten Modellierung für das hier vorgestellte Vorgehen erläutert sowie die UML als Werkzeug der objektorientierten Modellierung und Entwicklung vorgestellt.

Im Vordergrund der Modellierung für die Projektierung sollte eine einfache Erfassung aller Elemente des BVS und die Auflistung der Eigenschaften und Funktionen stehen. Darüber hinaus soll eine eingängige Beschreibung der Ressourcen und Elemente der Produktionsanlage verständlich beschrieben werden.

Die Zusammenfassung aller relevanten Informationen sowie ihres Verhaltens erfolgt in der objektorientierten Modellierung mithilfe von Klassen bzw. Objekten. Ein UML-Klassendiagramm dient der Darstellung dieser Elemente.

Änderungen in der Projektierung und Modifikationen sollen nur an den relevanten Stellen im Projektplan erfolgen, um die Übersichtlichkeit zu erhalten. Dies wird durch den Gebrauch von Klassen und Komponenten realisiert. Änderungen, die einzelne Objekte betreffen, können einfach im UML-Klassendiagramm vorgenommen werden, Änderungen von Systembestandteilen können mittels Komponentendiagramm zielführend betrachtet werden. Beide Darstellungsarten bieten den Vorteil, dass eventuelle Abhängigkeiten zwischen den Systembestandteilen sofort ersichtlich sind.

Bereits existierende Beschreibungen aus früheren Projekten müssen einfach integrierbar und wiederverwendbar sein. Die objektorientierte Modellierung bietet hierfür Klassen und das grundlegende Konzept der Vererbung an.

Es soll eine sinnvolle Beschreibung bzw. die Interaktion der einzelnen Elemente soll für alle Beteiligten ersichtlich dargestellt werden. Die Modellierung von Interaktionen kann grafisch beispielsweise durch Sequenz- oder Kommunikationsdiagramme erfolgen.

Abläufe im System oder im Zusammenhang mit dem Gesamtsystem, das Verhalten der einzelnen Objekte sowie die Betrachtung des dynamischen Verhaltens des Systems müssen modellierbar sein. Für die Darstellung dieser Aspekte eignen sich Aktivitätsdiagramme, Sequenzdiagramme oder Zustandsdiagramme, die als Werkzeug in der UML angeboten werden.

Das reale BVS, die reale Produktionsanlage und der reale Produktionsprozess sollen im Modell direkt auffindbar sein. Dies wird durch strukturierte Objekte, die Modellierung der jeweiligen Teile als eigenständige Objekte, realisiert.

Objekte Bei der objektorientierten Modellierung können reale Objekte direkt im Modell abgebildet werden. Diese modellierten Objekte sind durch ihr Verhalten und Zustände identifizierbar und dem Objekt im realen Projekt sehr ähnlich. Durch die Objektorientierung können einmal modellierte Objekte in verschiedenen Projekten oder Phasen eines Projektes wieder verwendet werden.

Objekte sind das zentrale Konzept der objektorientierten Modellierung. Objekte besitzen unterschiedliche Eigenschaften und Methoden. Dabei beschreiben die Eigenschaften die Struktur eines Objektes. Der Objektbegriff ist in der Regel so weit gefasst, dass letztlich jeder Gegenstand, auch abstrakte Gegenstände, als ein Objekt beschrieben werden können.

Klassen Für die Beschreibung der Eigenschaften von ähnlichen Objekten werden Klassen genutzt. Eine Klasse ist das abstrakte Modell für eine Reihe gleichartiger Objekte, sie definiert deren Struktur (Attribute), Verhalten (Operationen) und Beziehungen (Assoziationen). Botschaften beschreiben das Verhalten einer Klasse. Die Klasse reagiert auf eine Botschaft durch die Aktivierung einer entsprechenden Operation, üblicherweise hat die Operation den gleichen Namen wie die Botschaft.

In der UML ist ein Klassendiagramm eine statisch-deklarative Darstellung der Beziehungen zwischen den Klassen des Systems, wobei die Attribute und Operationen jeder Klasse hinzugefügt werden können, also die Beschreibung der jeweilige Klasse selbst.

Vererbung Die Vererbung dient in der objektorientierten Modellierung dazu, ausgehend von existierenden Klassen, neue zu erstellen, wobei die Beziehung zwischen ursprünglicher und neuer Klasse dauerhaft ist. Die neue Klasse kann sowohl eine Erweiterung als auch eine Einschränkung der ursprünglichen Klasse sein. Die Vererbung ermöglicht auch die Dokumentation von Ähnlichkeiten zwischen Klassen, dieser Aspekt ist insbesondere in den frühen Phasen der Projektierung von Bedeutung.

Komponenten Eine Komponente ist eine zusammengesetzte Einheit mit definierten und spezifizierten Schnittstellen, worüber ein Verhalten (Funktionalität) bereitgestellt wird. Das Komponentendiagramm ist ein Strukturdiagramm der UML. Mit diesem wird eine bestimmte Sicht auf die Struktur des modellierten Systems dargestellt. Das Diagramm umfasst dabei in der Regel Komponenten mit deren Schnittstellen und wie die Komponenten miteinander verbunden sind.

Die hier vorgestellten Konzepte entsprechen den objektorientierten Grundkonzepten nach [47]. Aufgrund des Vorhandenseins dieser Konzepte und der Modellierung mittels dieser Konzepte kann von einem objektorientierten Vorgehen gesprochen werden. Der Vorteil der objektorientierten Modellierung ist, dass durchgängig in allen Phasen des Entwicklungsprozesses, Analyse, Entwurf und Implementierung, dasselbe Beschreibungskonzept genutzt wird und UML die hierfür nötigen Werkzeuge bereitstellt.

In [47] wird das grundlegende Vorgehen bei der Erstellung von objektorientierten Modellen in Analyse und Entwurf eingeteilt. Dabei wird in der Analyse das Fachkonzept des zu realisierenden Systems erstellt, also ein Modell, das die essentielle Struktur und Semantik des Problems beschreibt. Der Entwurf soll das Fachkonzept unter den geforderten technischen Randbedingungen beschreiben, er stellt also ein Modell des Zielsystems dar. Ergänzt um die Anforderungsanalyse und Implementierung lässt sich das Vorgehen wie in Abbildung 2.17 dargestellt gliedern.

Die Anforderungsdefinition besteht aus mehreren zusammenhängenden Aktionen, die von einem Akteur in Interaktion mit dem System durchgeführt werden, um ein Ziel zu erreichen oder ein gewünschtes Ergebnis zu erstellen. Dies stellt den Anwendungsfall (englisch Use-Case) dar, in dem mögliche Szenarien zusammengefasst werden, die eintreten können, wenn ein Akteur versucht, mit Hilfe des modellierten Systems ein definiertes Ziel zu erreichen. Der Use-Case ist laut [47] immer eine Blackbox, die das von außen wahrnehmbare Verhalten beschreibt, ohne Details der internen Strukturen zu spezifizieren. Ziel dabei ist es, prinzipiell zu ermitteln, welche Aufgaben mit dem System zu erfüllen sind, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Diese Vorgehensweise wird in dieser Arbeit adaptiert und auf die Entwicklung von BVS übertragen, sodass sich eine Methode zur Modellierung von BVS daraus ableiten lässt, die als Unterstützung zur Entwicklung genutzt werden kann.

Der Vorteil der objektorientierten Modellierung ist, dass von Analyse, Entwurf zur Implementierung kein Paradigmenwechsel stattfindet, vorausgesetzt, es wird mit einer objektorientierten Sprache (UML) gearbeitet. Die starke Verzahnung von Entwurfs- und Implementierungsphase ermöglicht es, Klassen, die im Entwurf als zweckmäßig bewertet worden sind, direkt im System zu implementieren. Dieser direkte Übergang bietet gerade für Integratoren aus dem Bereich der KMU Möglichkeiten, das

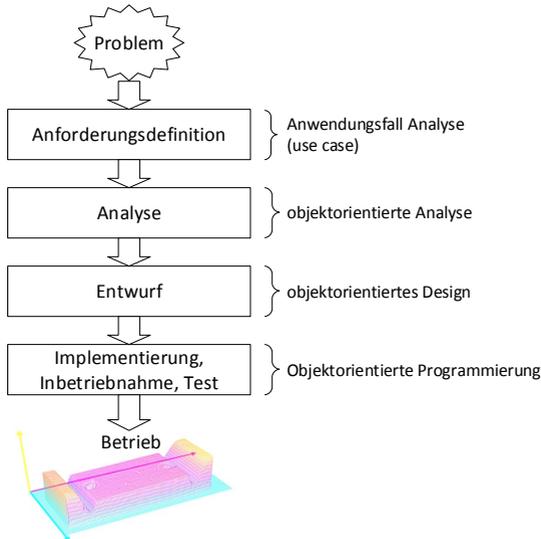


Abb. 2.17: Objektorientierte Vorgehensweise

Knowhow der Mitarbeiter projektübergreifend mit in die Entwicklung einzubinden, ohne dass dies in den einzelnen Projektierungsschritten verloren geht. Die objektorientierte Modellierung und UML bieten sich als Werkzeug für die Beschreibung von BVS an, da die präzise Semantik der Notationselemente es plattform- und sprachunabhängig ermöglichen, das System mit verschiedenen Sichtweisen auf Basis von realen und gedachten Objekten zu modellieren. Die objektorientierte Modellierung und Entwicklung mit der UML werden in [47] und [48] ausführlich diskutiert. Im Folgenden werden die verwendeten Werkzeuge (Diagramme) und Konzepte, die für das Verständnis der Arbeit nötig sind, übersichtlich aufgeführt.

Die objektorientierte Modellierung bzw. das objektorientierte Vorgehen bei der Entwicklung von BVS ist nicht die einzig mögliche oder alles umfassende Lösung. Es handelt sich aber mit Sicherheit um die Modellierung bzw. das Vorgehen, welchem bei einem so Software affinen System eine zentrale Bedeutung zukommt.

Die zunehmende Bedeutung der Software wird in [49] erläutert, dabei wird erwähnt, dass der Entwicklungsprozess im Maschinen- und Anlagenbau zwar schon stark an die Bedürfnisse der Entwicklung mechatronischer Systeme angepasst worden ist. Es wird aber ausdrücklich auf die Berücksichtigung des Softwareanteils hingewiesen:

„Der zunehmende Softwareanteil macht es jedoch erforderlich, die Prozesse der Softwareentwicklung stärker und früher zu berücksichtigen.“ [49, S.30]

2.8 Bewertung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass 3D-Bildverarbeitungssysteme in allen Bereichen der Produktionsautomatisierung eingesetzt werden. Dabei sind die Komponenten eines Bildverarbeitungssystems ebenso vielfältig wie der Aufgabenbereich der Bildverarbeitung. Die verwendeten Methoden und Technologien der Bildverarbeitung und die daraus erwachsenden Anforderungen verdeutlichen den Systemgedanken. Ein BVS kommt in allen Hierarchieebenen der Automatisierung zum Einsatz und übernimmt dabei sowohl prozessnahe Funktionalitäten, die eine hohe Verfügbarkeit erfordern, als auch reine statistische Funktionen, die zur Prozessanalyse in der Leitebene dienen. Im Bereich der Fertigungs- und Anlagenautomation ist derzeit keine eindeutige Methodik zur Entwicklung und gezielten Auslegung von 3D-Bildverarbeitungssystemen existent. Bei der Entwicklung von 3D-BVS für die automatische Produktion müssen alle Komponenten einzeln festgelegt werden und eine individuelle Projektierung ist eine relativ komplexe Aufgabe.

Die Projektierung umfasst den gesamten Bereich der Automatisierungssysteme und Produktionstechnik sowie den Bereich der bildgebenden Systeme und der industriellen Bildverarbeitung. Zusätzlich besteht in der Anlagenautomatisierung eine hohe Varietät von Anlage zu Anlage und Kunde zu Kunde. Daher besteht in der Entwicklung von 3D-BVS oft der Anlass, die gesamte Systematik für eine bestimmte Anlage oder eine bestimmte Prozessperipherie eines Kunden neu zu projektieren und zu entwickeln. Um das Potential der industriellen Bildverarbeitung und der modernen 3D-Bildverarbeitung im Bereich der Produktionstechnik besser nutzen zu können, ist es daher sinnvoll, eine Methodik und daraus Werkzeuge zu entwickeln, die auf Basis einer Modellierung des BVS und dessen Funktionalität die Entwicklung von 3D-BVS in der Produktionstechnik unterstützen.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Grundlagen verdeutlichen die in der Zielsetzung genannten Punkte.

Kapitel 3

Potential und Anforderungsanalyse

Das Ziel, die Schaffung einer Methodik zur Entwicklung von 3D-BVS, soll ermöglichen, 3D-BVS in der Produktionstechnik effektiv zu nutzen. Es sollen die Potentiale, die durch die Entwicklung der Methodik und der daraus resultierenden Modellierungsansätzen entstehen, bestimmt werden. Dazu wird das Vorgehen bei der Entwicklung derartiger Systeme analysiert, wobei eventuell auftretende Synergieeffekte für zukünftige Projekte genauer betrachtet und festgehalten werden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden den Anforderungen an ein 3D-BVS in der Produktionstechnik gegenübergestellt.

3.1 Potential bei der Planung von Bildverarbeitungssystemen

Bei der Analyse des Potentials einer Methodik für die Entwicklung von 3D-BVS müssen sowohl die direkt bewertbaren, technischen und wirtschaftlichen Potentiale betrachtet werden als auch eine genauere Betrachtung der Potentiale, die sich aus den weiter gefassten Zusammenhängen einer solchen Entwicklung ergeben.

3.1.1 Aktueller Bedarf und Potential

Das Potential eines strukturierten Lösungsprozesses für die Projektierung von BVS wird deutlich, wenn man die Ergebnisse der Umfrage des Transfervverbundes Südwestfalen und der Fachhochschule Südwestfalen (FH-SWF) genauer betrachtet. Der Transfervverbund Südwestfalen¹ hat im Jahr 2013, unterstützt von der FH-SWF, eine Umfrage zur Thematik „Bildungsverarbeitungssysteme im Fertigungsprozess“ gestartet. Die Umfrage wurde online über das Umfrage-Tool „SurveyMonkey“, mit einer Laufzeit vom 25. April bis zum 10. Mai 2013, durchgeführt. Dabei wurden insgesamt 905 Unternehmen aus Südwestfalen angeschrieben, von denen sich 85 an der Umfrage beteiligt haben (Rücklaufquote von 9,4%). Die Zusammensetzung der befragten Unternehmen entspricht der Gruppe der KMU, wie vorangegangen schon erwähnt

¹Der Transfervverbund Südwestfalen dient der Koordination und Bündelung der regionalen Potenziale sowie zur Abstimmung der Aktivitäten im Bereich des regionalen Technologietransfers in der Region Südwestfalen. Er wurde im Rahmen des Projektes „Branchenkompetenzen Südwestfalen“ gefördert durch die Europäische Union und das Land Nordrhein-Westfalen.

worden ist.. Die Umfrage hat ergeben, dass die Systeme in allen Bereichen der Produktion und des Betriebs eingesetzt werden (vgl. hierzu Abbildung 3.1), dies bestätigt die zuvor getroffene theoretische Feststellung des sehr heterogenen Anwendungs- und Einsatzbereichs der BVS. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass insgesamt $\frac{3}{4}$ der

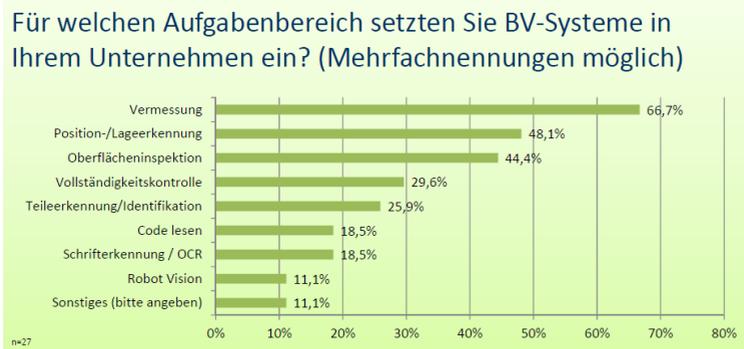


Abb. 3.1: Einsatzbereich der BVS bei den befragten Unternehmen

Unternehmen bereits Bildverarbeitungssysteme einsetzen, siehe hierzu Abbildung 3.2. Gleichzeitig hat sich gezeigt, dass nur 40% bereits 3D-Bildverarbeitungssysteme nutzen, wobei jedoch 27% deren Einsatz planen, siehe Abbildung 3.3. Deutlich wird



Abb. 3.2: Einsatz und Anzahl von BVS in der Produktion

der Bedarf nach strukturierter Lösungsdefinition für Bildverarbeitungssysteme im Allgemeinen jedoch dadurch, dass 49,2% der Unternehmen weiteren Beratungsbedarf

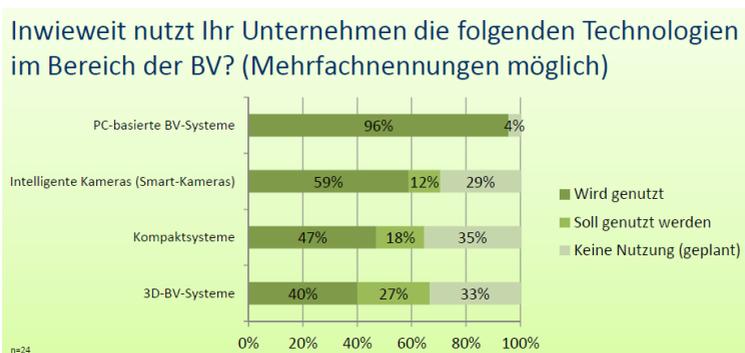


Abb. 3.3: Momentaer Zustand und Planung von Systemen

haben. Die im Anschluss an diese Umfrage geführten Gespräche mit den interessierten Unternehmen bekräftigten, dass man sich von der unternehmerischen Seite gerade im Mittelstand klarere Aussagen in Bezug auf BVS im Allgemeinen wünscht. Außerdem wurde deutlich, dass man sich zwar mit BVS befasst hat, jedoch gerade im Bereich der 3D-BVS nicht über die aktuellen Möglichkeiten informiert ist. Die Umfrage verdeutlicht das mögliche Potential und den Forschungsbedarf in dieser Richtung.

3.1.2 Anforderungen bei der Entwicklung von Bildverarbeitungssystemen

Zunächst werden die Entwicklung eines 3D-BVS und die Bedeutung einer gezielten Methodik, die diese Entwicklung unterstützt bzw. das Vorgehen bei dieser führt, betrachtet. Ein einheitliches und gerichtetes Vorgehen vom Entwurf bis zur Inbetriebnahme eines 3D-BVS bietet den Entwicklern von solchen Systemen immer erhebliche Vorteile und Mehrwerte. So kann in den einzelnen Phasen eines Entwicklungsprojektes der jeweilige Aufwand und die nötigen Anforderungen spezifiziert und dokumentiert werden. Dies wird in der Literatur zum Projektmanagement bei [50] unter dem Punkt Aufwandschätzung sehr deutlich formuliert:

„Je präziser unsere Eingangsinformationen sind, desto besser wird unsere Schätzung. Die Beschaffung aussagekräftiger Informationen ist daher von essentieller Wichtigkeit.“ [50, S. 75]

Diese aussagekräftigen Informationen können in der Projektierung nur durch eindeutige methodisches und analytisches Vorgehen generiert werden. Die Dokumentation bewirkt, dass gewonnene Erkenntnisse projektübergreifend verwendet werden können. Die Entwicklung von 3D-BVS wird anhand der Entwicklung von Automatisie-

nungssystemen genauer betrachtet.

Dazu folgt die Einordnung des Begriffs „Entwicklung eines 3D-BVS“. Der Vorgang der Entwicklung wird im Folgenden als Projekt angenommen. Dieses Projekt ist die Lösung einer Aufgabe unter zur Hilfenahme von Methoden der Bildverarbeitung. Diese Definition findet sich auch in ähnlicher Formulierung bei [6] wieder. In [6] wird ein Automatisierungsprojekt als ein Vorhaben zur Lösung einer Automatisierungsaufgabe beschrieben.

Die Betrachtung der Entwicklung eines BVS als Automatisierungsprojekt ermöglicht die Übertragung der Vorgehensweise und Art der Durchführung eines Automatisierungsprojektes auf die Entwicklung eines BVS. Entsprechend der Definition, die in [45] getroffen wird, bewegt sich eine solche Entwicklung im Bereich der Anlagenentwicklungsprojekte, da es sich bei den in dieser Arbeit behandelten BVS um Bestandteile produktionstechnischer Anlagen handelt. Im Bereich des Projektmanagements existiert eine Vielzahl verschiedener Modelle zur Durchführung eines Projektes in Phasen. Diese Modelle zielen darauf ab, den Projektverlauf zu strukturieren und auf diese Weise die Projektkoordination zu vereinfachen. In dieser Arbeit wird das Phasenmodell nach den Ansätzen für den Produktionsbereich [51] S. 6–37 Teil1 verwendet. Demnach gliedert sich das Projekt in die folgenden Phasen:

- Konzeptionsphase
- Definitionsphase
- Realisierungsphase
- Einführungsphase

Es ist darauf zu achten, dass die Projektbearbeitung bzw. Projektlaufzeit schon im Vorfeld vor der Entscheidungsfindung mit der Angebotsphase beginnt. Daraus ergibt sich eine Vorprojektphase, die hier mit zur Konzeptionsphase gerechnet werden soll. In der Vorprojektphase und der Konzeptionsphase werden schon die ersten wichtigen Eigenschaften zum Erreichen des Projektziels definiert, da hier eine Kosteneinschätzung getroffen wird.

Die Vorprojektphase und Konzeptionsphase dienen der Entscheidungsfindung, ein Projekt durchzuführen und die dafür nötigen Mittel zu bestimmen. Dazu muss zunächst die Aufgabenstellung analysiert und abgegrenzt werden. Gegebenenfalls muss eine Machbarkeitsstudie durchgeführt werden. Diese bietet sich gerade für den komplexen Bereich der Bildverarbeitung an, um die für das Projekt nötigen Mittel genauer zu bestimmen. So kann beispielsweise eine Machbarkeitsstudie bereits Aussagen zur Eignung bestimmter bildgebender Verfahren liefern.

Das Ergebnis der Konzeptphase sollte ein Konzept sein, das Leistung, Zeitraum und Kostenrahmen festlegt. Aus diesem kann ein Angebot bzw. eine Durchführbarkeit für ein entsprechendes Projekt abgeleitet werden. Eine positive Entscheidung vorausgesetzt, wird in der Definitionsphase konkret ausgearbeitet, wie das Projekt realisiert werden kann. Dazu findet eine detaillierte Termin- und Leistungsplanung für die Realisierungsphase, in der das ausgearbeitete Konzept umgesetzt und erprobt wird, statt. Die Einführungsphase ist prinzipiell die Inbetriebnahme beim Auftraggeber mit der

Abnahme des fertigen Systems. Hier schließen sich nur noch Wartungs- und Pflegearbeiten an.

Die Übertragung des beschriebenen Ablaufs auf die Projektierung von BVS ermöglicht es, das Potential einer Methodik abzuleiten bzw. zeigt die Möglichkeit, die zu entwickelnde Methodik in die beschriebenen Phasen zu integrieren.

Anhand der bisher getroffenen Aussagen zeichnet sich ab, dass die Erkenntnisse dieser Arbeit in die Vorprojektphase, Konzeptionsphase und Definitionsphase eingeordnet werden können. Die Methodik soll sich an diesen Phasen anlehnen und bei der Entwicklung eines BVS-Projektes als Werkzeug zur gezielten Durchführung dieser Phasen dienen. Es bietet sich daher an, die Erkenntnisse dieser Arbeit in einer Art Beratungssystem bzw. Konfigurationssystem² zu überführen, welches von Entwicklern und Integratoren in den genannten Phasen unterstützend genutzt werden kann. Zunächst lässt sich jedoch feststellen, dass eine derartige Methodik den grundlegenden Anforderungen des Projektmanagements entspricht und Potential für die effektive Entwicklung eines BVS bereitstellt. Für das Projekt BVS bedeutet eine solche Methodik Vorteile bei der Kostenabschätzung, da eine klare Struktur die Aufwandsabschätzung wesentlich erleichtert. Eine detaillierte Vorstellung der Methoden und Techniken zur Aufwandsabschätzung würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

3.2 Anforderungen in der Produktionsautomation

Die größten Herausforderungen in der Produktionsautomation entstehen durch die ständig wechselnden Restriktionen bei der Planung von Produktionssystemen. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich heutzutage jeder Prozess automatisieren lässt. Die Stückzahl des zu fertigenden Produktes muss nur hoch genug sein, sodass sich die Investition in eine automatische Fertigung rechnet. Für kleine und mittelständische Unternehmen ist dies eine herausfordernde Aufgabe, gerade in diesen Betrieben muss ein effizienter Weg für die Automation gefunden werden.

Dieser Weg beginnt mit einer effizienten Entwicklungsmethodik. In diesem Kapitel soll zunächst die effiziente Entwicklung aus der Automatisierungstechnik übernommen und erklärt werden, anschließend wird die effiziente Entwicklungsmethodik mittels geeigneter Modellierungstechniken auf die Bildverarbeitung übertragen.

3.2.1 Restriktionen

Die Restriktionen, also die Rand- und Rahmenbedingungen, sind die Bedingungen, die an den Betrieb und die Planung der Anlage geknüpft sind. Dabei wird durch diese Bedingungen der Handlungsspielraum bei der Entwicklung eines BVS eingeschränkt. Es gilt zum einen, Restriktionen, die durch das Marktumfeld vorgegeben sind, zu beachten, die nicht oder nur in geringem Maße beeinflusst werden können. Zum anderen

²Beratungssysteme bzw. Konfigurationssysteme sind Klassifikationen des Expertensystems. Ein Softwaresystem wird als Expertensystem bezeichnet, wenn es in der Lage ist, Lösungen für Probleme aus einem begrenzten Fachgebiet zu liefern, vgl. [8].

müssen Rahmenbedingungen beachtet werden, die sich aus der Definition des geforderten Produktionssystems ergeben, also dem aktuellen Stand der Technik. Bei denen sich aus dem Marktumfeld ergebenden Restriktionen muss man den fundamentalen Wandel der Produktion in den letzten Jahren mit betrachten. Dieser Wandel wird in [52] zuerst durch die Hochautomatisierung von Produktionsanlagen beschrieben, die eine Inflexibilität mit sich brachte. Später wurden kurze Innovationszyklen gefordert, außerdem verlangte der Markt nach kundenindividuellen Produkten, dies führte zu hoher Produktvielfalt bei kleinerer Produktionsvolumina. Daraus entwickelten sich die Ansätze der schlanken Produktion und der ganzheitlichen Produktionssysteme. Die Bedingungen für die Entwicklung einer Produktionsanlage ergeben sich vereinfacht betrachtet aus den Bedingungen für die produzierenden Unternehmen. Die wesentlichen Produktionsanforderungen ergeben die Bedingungen für die Produktion, die im Rahmen der Fabrik- und Fertigungsplanung genauer betrachtet werden. Eine genaue Auflistung ist [53] zu entnehmen und ist nicht Teil dieser Arbeit.

Das Verhalten und die Wertung der Anforderungen geschehen prinzipiell vor der Entwicklung der Produktionsanlage, sodass sie für das Automatisierungsprojekt und das BVS als exogene Einflussgrößen der Fertigungsplanung angesehen werden können. Diese sind vorgegeben und stellen damit Bedingungen dar, die nicht oder nur in geringem Maße beeinflusst werden können. Dabei sind die Bedingungen, die hier generiert werden, stark von dem Produktionskonzept des Unternehmens abhängig.

Diesen Produktionskonzepten liegt die Wirtschaftlichkeit zugrunde, was bedeutet, dass sowohl die Entwicklung der Anlage als auch die Produktion, die auf der Anlage stattfinden muss, den Regeln einer wirtschaftlichen Produktion unterliegen.

Das heißt, die Restriktionen bei der Entwicklung, der Auswahl der Komponenten, der Inbetriebnahme, etc. ergeben sich in erster Linie aus der wirtschaftlichen Betrachtung des Systems. Das bedeutet konkret, dass teilweise nicht die technisch beste Lösung betrachtet werden kann, sondern der Lösungsweg bzw. die Komponenten, die den wirtschaftlichen Möglichkeiten des Projektes entsprechen.

Bei der wirtschaftlichen Betrachtung und dem Fokus dieser Arbeit auf den Anlagen- und Sondermaschinenbau wird deutlich, dass die Planungs- und Entwicklungskosten ein wesentlicher Bestandteil des Produktes sind. Die Planungs- und Entwicklungskosten können in diesem Bereich nicht auf große Stückzahlen umgelegt werden.

Betrachtet man eine Produktionsanlage oder Sondermaschine müssen die Planungs- und Entwicklungskosten direkt aufgeschlagen werden, sodass eine Verbesserung dieses Vorgangs ein großes Potential für die Reduzierung der Kosten bietet und damit die Wirtschaftlichkeit steigert.

3.2.2 Abläufe der effizienten Entwicklung

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten das technische Projektmanagement und die Entwicklung in der Produktionsautomation beschrieben worden ist, sollen an dieser Stelle nun die einzelnen Phasen im Maschinen- und Anlagenbau konkretisiert werden. Überträgt man die in Kapitel 3.1.2 gemachte Einteilung in Phasen auf die Entwicklung im Sondermaschinenbau, so kann man die Phasen wie in [54]

herleiten. Diese werden in Abbildung 3.4 anhand des zeitlichen Ablaufs der Produktentwicklung dargestellt. Der Entwicklungsprozess im Sondermaschinen- bzw. Anlagenbau unterscheidet sich wesentlich von der Entwicklung von Serienprodukten. Im Sondermaschinen- und Anlagenbau ist die Entwicklung und Realisierung des Produktes, beispielsweise die Produktionsanlage oder das BVS, sehr eng miteinander verbunden. Das bedeutet, dass teilweise schon in den Entwicklungsphasen mit der Umsetzung bestimmter Komponenten begonnen wird bzw. nur ein geringer Zeitversatz zwischen den Phasen besteht. Es wird auch in der Literatur ausdrücklich auf die

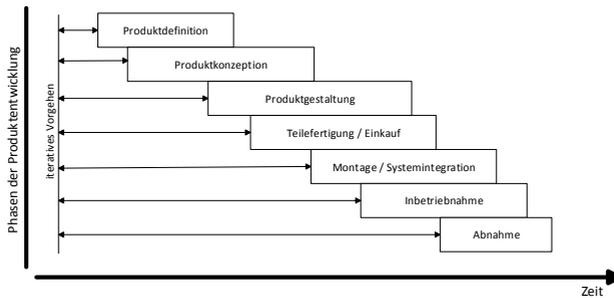


Abb. 3.4: Einteilung der Produktentwicklung im Sondermaschinenbau, vgl. [54]

Besonderheit und die Verflechtung zwischen der Entwicklung und der Realisierung hingewiesen:

„Eine Absicherung der Ergebnisse der Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit mittels Prototypen ist nicht oder nur sehr selten möglich. So ist es sicherlich leicht vorstellbar, dass Fehler in der Entwicklung zu schwerwiegenden Problemen bei der Realisierung der Maschinen und Anlagen führen können, die Zeitverzögerungen, Kostenüberschreitungen und Qualitätsprobleme zur Folge haben. Deshalb bedarf es für solche Produkte einer besonderen Sorgfalt im Rahmen der Entwicklung, die eine besonders enge Abstimmung zwischen den Unternehmensbereichen Entwicklung, Konstruktion und Produktion erfordern.“ [55, S.24]

Die vorgenommene Einteilung in Phasen findet sich in ähnlicher Form in anderer Literatur wieder, so wird in [56] die Entstehung des Produktes in die Phasen Produktplanen, Produktentwicklung, Produkterprobung und Produktherstellung eingeteilt. Die eigentliche Produktentwicklung wird in das Anforderungsmanagement, die methodische Konstruktion und die Ergebnisanalyse unterteilt. Diese Unterteilung findet sich in ähnlicher Weise in der Softwareentwicklung wieder. In der objektorientierten Vorgehensweise für die Softwareentwicklung findet sich eine Aufteilung in die Punkte:

- Anforderungsdefinition
- Analyse
- Entwurf

Diese Vorgehensweise wird in Kapitel 2.6.1 aufgegriffen und auf die Problemstellung übertragen.

Ausgehend von den im Vorfeld gemachten Betrachtungen der einzelnen Phasen werden die Abläufe der technischen Entwicklung im Rahmen des Sondermaschinenbaus untersucht.

Es wird zunächst das V-Modell nach [57] betrachtet, siehe hierzu Abbildung 3.5. Dieses gibt einen idealisierten Ablauf des Entwurfs mechatronischer Systeme wieder, in den man auch die Entwicklung von BVS für die Produktionstechnik einordnen kann.

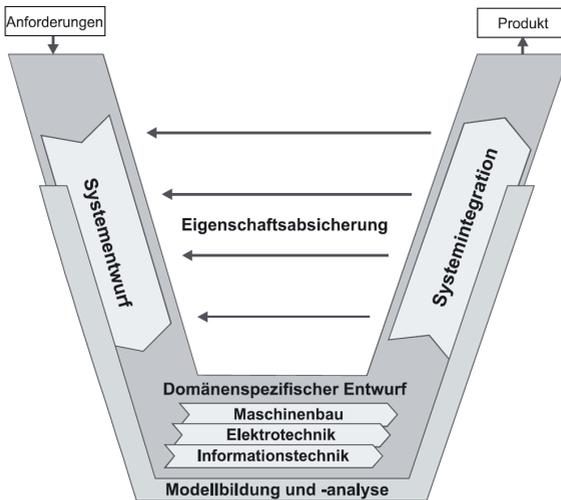


Abb. 3.5: V-Modell als Makrozyklus nach der VDI-Richtlinie 2206 [57]

Dabei werden aus den Anforderungen an das System die Eingangsparameter gebildet. Anschließend erfolgt der Systementwurf mit der Festlegung der Funktionen des Gesamtsystems. In der frühen Phase der Projektierung ist der interdisziplinäre Systementwurf für die Erstellung einer funktionalen Lösung unerlässlich, dieser sollte von

allen Disziplinen erfolgen. Der Entwurf wird in Teilfunktionen zerlegt, welche im domänenspezifischen Entwurf von den entsprechenden Fachabteilungen bzw. beteiligten Disziplinen bearbeitet werden.

Anschließend sollen in der Systemintegration die Teillösungen zusammengeführt werden.

Das Produkt bildet die Ausgangsgröße, die an den Anforderungen, also der Eingangsgröße, beurteilt wird. Das Vorgehen des V-Modells ist allerdings eine Idealisierung für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Gerade die geforderte Zusammenarbeit der einzelnen Disziplinen erscheint zu ideal. In [58] wird beschrieben, dass in dem vorherrschenden sequentiellen Ansatz die Fachabteilungen meist getrennt voneinander und zeitlich nacheinander arbeiten. Darüber hinaus wird beschrieben, dass die Informationsflüsse und Kooperation nicht ausreichend formalisiert sind, vgl. [58]. Dies bestätigt die beschriebene Problemstellung und verdeutlicht, dass im Bereich der industriellen Bildverarbeitung sowie der Entwicklung von 3D-BVS ähnliche Probleme gelten wie im Bereich der mechatronischen Entwicklung und davon ausgehend mit der zu entwickelnden Methode der kommunikative Aspekt der Projektierung gestärkt werden muss.

3.2.3 Inbetriebnahme und Umsetzungsdauer

Es wurde bereits kurz auf die enge Verflechtung zwischen der Entwicklung und Realisierung hingewiesen, an dieser Stelle soll kurz der Begriff der Inbetriebnahme erläutert und der Bezug zu Bildverarbeitungssystemen hergestellt werden. Die Inbetriebnahme wird bei [59] als Vorgang definiert, der die montierten Produkte in Funktionsbereitschaft versetzt sowie einer anschließenden Überprüfung dieser Funktionsbereitschaft, wobei es auch sein kann, dass diese Funktionsbereitschaft herzustellen ist. Das bedeutet, dass die Inbetriebnahme auch alle notwendigen Maßnahmen und Tätigkeiten hierzu umfasst. Dabei steht insbesondere die Steuerung (Hardware, Software und Module) im Vordergrund.

Übertragen auf ein Automatisierungsprojekt mit BVS bedeutet dies, dass das bildgebende System in den Produktionsprozess eingebracht werden muss und die Softwarefunktionalitäten des Systems geprüft werden müssen. Gegebenenfalls kann es auch sein, dass gewisse Funktionalitäten erst während der Inbetriebnahme entwickelt werden können, da erst jetzt alle nötigen Komponenten vorhanden sind.

Eine Abgrenzung der Inbetriebnahme ist in der Realität wegen der Natur des Projektgeschäftes schwierig, vgl. [59]. Bei der Entwicklung von Produktionsanlagen lassen sich Montage und Inbetriebnahme nicht klar trennen, da z.B. Inbetriebnahmetätigkeiten in die Phasen der Baugruppenvorprüfung in der Montage fallen können, etc.. Außer dieser Zuordnungsschwierigkeiten der Inbetriebnahme kann es zu den in folgender Abbildung 3.6 dargestellten Zielkonflikten in der Inbetriebnahme kommen. Es wird auch beschrieben, dass die häufigsten Fehler in der Inbetriebnahme auf unzureichende Strukturierung oder fehlerhafte Software zurückzuführen sind. Auch dieser Sachverhalt lässt sich auf die Inbetriebnahme von BVS übertragen, da oft ein erstma-

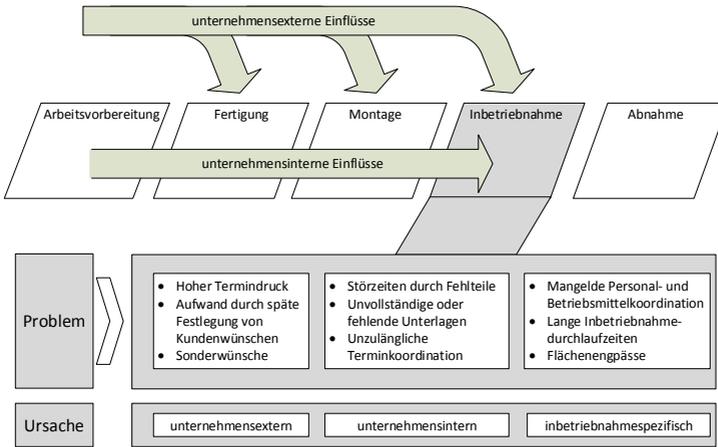


Abb. 3.6: Problematik der Inbetriebnahme komplexer Anlagen [59]

liger Test nur innerhalb der Produktionsanlage durchgeführt werden kann und erst hier die komplexen Funktionsabläufe optimiert werden können.

Diesem Sachverhalt sollte schon in der Projektierung Rechnung getragen werden, sodass im Vorfeld terminliche und betriebstechnische Abläufe koordiniert werden können, sodass Einflussfaktoren auf die Inbetriebnahme möglichst gering gehalten werden können.

Es wird deutlich, dass ein wesentlicher Faktor der Inbetriebnahme die Zeit, also Dauer bis zur Funktionsbereitschaft der Produktionsanlage ist. Diese Zeitspanne wird unterschiedlich bezeichnet, Realisierungsdauer, Umsetzungsdauer bzw. Umsetzungszeit. Wird im Rahmen dieser Arbeit die Umsetzungsdauer beschrieben, ist die Zeitspanne zwischen Konzeption, Start der Projektierung und Funktionsbereitschaft gemeint. Diese Zeitspanne ist von Bedeutung, da ein Produktionssystem und die darauf stattfindende Produktion schnellstmöglich aus wirtschaftlichen Gründen anlaufen muss. Aufgrund der Bedeutung dieses Faktors und der engen Verzahnung der einzelnen Umsetzungsphasen bei BVS muss dieser mit in die zu entwickelnde Methodik einfließen.

3.2.4 Simulation

Da sich in technischen Prozessen die Simulation bewährt hat, soll hier zunächst geprüft werden, inwiefern die Simulation auf die beschriebene Problematik anwendbar ist. Dazu wird zunächst der Begriff Simulation erläutert, daran schließt sich die Un-

tersuchung der Einsatzmöglichkeiten der Simulationstechnik für Automatisierungsprojekte und BVS an.

Eine Simulation ermöglicht es, den in einem noch zu entwerfenden System ablaufenden technischen Prozess zu untersuchen. Die durch die Simulation gewonnenen Kenntnisse lassen sich auf den real existierenden Prozess übertragen und dienen folglich dazu, ihn so zu entwerfen, dass die an den Prozess gestellten Forderungen erfüllt werden, vgl. [60]. Als Einsatzgebiet der Simulationstechnik in Fertigungsplanung wird bei [61] das gesamte Feld von der Geschäftsprozesssimulationen zur Unterstützung von strategischen Entscheidungen bis hin zu Maschinensimulationen für Kollisionsuntersuchungen und Funktionsprüfungen genannt. Es wird auch beschrieben, dass die Modellaggregation dabei von der Geschäftsprozesssimulation zur Maschinensimulation kontinuierlich abnimmt, der Detaillierungsgrad jedoch steigt. Die Möglichkeiten und Arten zur Simulation in der Produktionstechnik werden wie in Abbildung 3.7 vorgestellt.

Ebene	Simulation von	Aggregation
Unternehmen	Geschäftsprozessen	hoch
Fabrik	Logistikabläufen, Lieferketten	gering
Linie oder Anlage	Auslastung, Durchsatz, Durchlaufzeiten	Aggregation
Maschine oder Station in der Anlage	Roboterbewegung, Kollisionsbetrachtung, manuellen Abläufen	gering
		Detaillierung
		hoch

Abb. 3.7: Arten der Simulation in der Produktionstechnik nach [61]

Die Simulation, die zur Unterstützung bei der Planung von BVS zum Einsatz kommen kann, ist in der Ebene Maschine oder der Linie einzuordnen. Diese Art der Simulation hat eine gewisse Schnittmenge mit der virtuellen Inbetriebnahme und ist von dieser nicht eindeutig zu trennen.

Zu den Anwendungsgebieten der virtuellen Inbetriebnahme zählen alle Felder der Automatisierungstechnik. Die Grundidee der virtuellen Inbetriebnahme ist nach [62] die Vorwegnahme der Steuerungsinbetriebnahme an einem virtuellen Modell aller wesentlichen Bestandteile einer Maschine. An diesem Modell können Simulationen durchgeführt werden. Hier lassen sich Abschätzungen zu Zykluszeiten, Kollisionen, mechanischen Schwierigkeiten oder Schwierigkeiten mit einzelnen Komponenten aufzeigen. Eine solche Evaluation, der Sensorik bzw. deren Integration in den Gesamtprozess der Produktion und welche Bedingungen sich aus der Integration wechselseitig

ergeben, kann mittels CAD-based Vision und den Konstruktionsdaten der Produktionsanlage ermittelt werden. Inhalt der CAD-based Vision ist z.B. die Bestimmung von Kamerapositionen und Möglichkeiten der Optimierung des Gesamtaufbaus für die Objekterfassung zu bestimmen. Eine gute Zusammenfassung von den Möglichkeiten von CAD-based Vision gibt [63]. Dies stellt prinzipiell eine Simulation des Konstruktionsmodells dar.

In [62] ist beschrieben, dass die eigentliche Inbetriebnahme dann mit einer wesentlich hochwertigeren Steuerungssoftware erfolgen kann. Außerdem steigert die virtuelle Inbetriebnahme die Planungssicherheit. Laut [64] wird die virtuelle Inbetriebnahme mehrheitlich in Bereichen eingesetzt, in denen die Implementierung der Steuerungssoftware wesentlich zur Gesamtfunktionalität des Produktionssystems beiträgt.

Die Simulation und virtuelle Inbetriebnahme sind bei Automatisierungsprojekten sehr zweckmäßig anwendbar, der Kern der Bildverarbeitung selbst kann jedoch kaum mit Softwarewerkzeugen simuliert werden. Hier bieten sich Vorversuche oder Modellaufbauten an, um z.B. eine Machbarkeit abzuschätzen.

In Kombination mit den Mitteln der Simulation und virtuellen Inbetriebnahme kann so das ganzheitliche Konzept eines 3D-BVS entwickelt und auf seine Eignung hin geprüft werden. Die Simulation bietet sich hier nicht als Modellierungswerkzeug für den Prozess der Entwicklung an, sondern kann in Zusammenhang mit Versuchsaufbauten bei der Beurteilung von Lösungsansätzen herangezogen werden. Der Detaillierungsgrad eines solchen Modells ist in der Regel jedoch sehr hoch, sodass in der Praxis das Simulieren von speziellen Systemen für die üblicherweise kostenlosen Angebote vor Erhalt des Auftrags nur selten angewendet wird. Die Entscheidung zur Durchführung einer umfassenden Simulation ist laut [61] stets mit einer Kosten-Nutzen-Analyse bzgl. der anstehenden Aufgabe zu verbinden.

3.2.5 Modellierung von BVS

An dieser Stelle soll kurz dargestellt werden, welche Ansätze zur Modellierung des BVS im Rahmen der objektorientierten Modellierung geeignet und wie sie auf die einzelnen Phasen der Projektierung anwendbar sind. Die Projektierung ist nicht nur eine technische Aufgabe, sondern auch ein personenbezogener Vorgang, bei dem kommunikative Fähigkeiten wichtig sind. Gerade in komplexen Anwendungsbereichen kann man beobachten, dass das Verständnis mit steigender Komplexität sinkt. Das richtige gegenseitige Verstehen ist jedoch essentiell für die Entwicklung und Projektierung. Die Modellierung dient hier als Austauschmittel des Wissens und der Erfahrung der Projektbeteiligten.

Für die Modellierung des BVS und die sich aus den einzelnen Phasen der Projektierung ergebenden Zusammenhänge wird UML verwendet, da sich das Grundkonzept der objektorientierten Entwicklung in der Praxis bewährt hat.

Ein Hindernis bei der Verwendung von UML ist jedoch die Vielfalt der Beschreibungsmöglichkeiten und des Detailreichtums. UML hat mittlerweile die Version 2.5, die auch im Rahmen dieser Arbeit genutzt wird, und eine sehr umfangreiche Spezifikation erreicht.

In Abbildung 3.8 sind alle 15 Diagrammtypen der UML dargestellt, wobei die Bezeichnung aus [48] verwendet wird. Dies stellt den Umfang und die Möglichkeit der UML gut dar und gibt einen Einblick, wie ein System abgebildet werden kann. Um

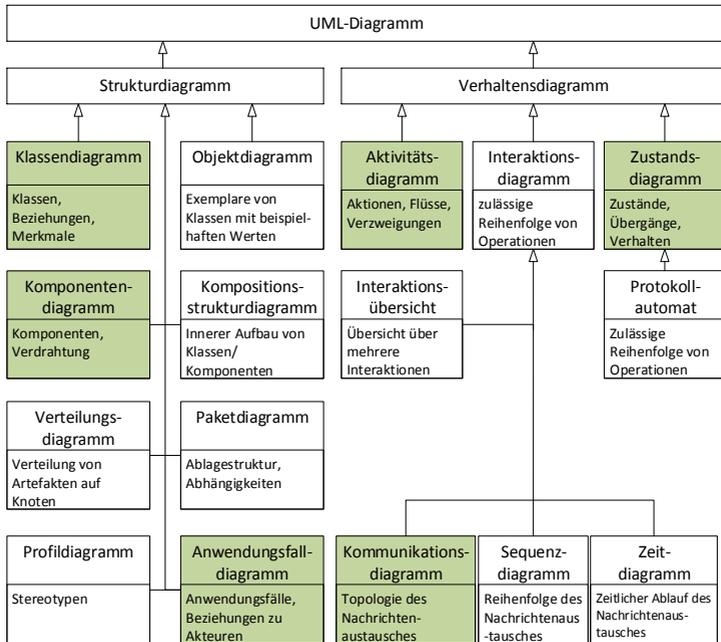


Abb. 3.8: Übersicht UML-Diagramme nach [48], die grün markierten Diagrammtypen finden Anwendung in der vorgestellten Methode

die allgemeine Verständlichkeit zu gewährleisten, beschränkt sich die Modellierung in erster Näherung zunächst auf die grundlegenden Elemente von UML. Grundsätzlich scheint eine Zuordnung der einzelnen Diagrammtypen zu den vier benannten Phasen wie folgt sinnvoll:

- 1. Phase betrachtet: Anforderungen
 - Use-Case-Diagramm
- 2. Phase betrachtet: logischen Aufbau des BVS
 - Klassendiagramm
- 3. Phase betrachtet: Interaktionen und Abläufe

- Aktivitätsdiagramm
- Zustandsdiagramm
- 4. Phase betrachtet: Implementierung des Systems
 - Komponentendiagramm

Es wird nicht nur das Softwaresystem der Bildverarbeitung, sondern vielmehr das gesamte BVS mittels UML modelliert. Die Modellierung mittels UML hat den Vorteil, dass die Anforderungsanalyse und die folgenden Schritte aus dem Blickwinkel der objektorientierten Entwicklung betrachtet werden können und ein einheitliches strukturiertes Vorgehensmodell verwendet wird.

Use-Case-Diagramm Ein Anwendungsfalldiagramm besteht aus einer Menge von Anwendungsfällen und zeigt die strukturellen Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Akteuren und Anwendungsfällen, dargestellt in 3.9. Es stellt das äußerlich erkennbare Systemverhalten aus der Sicht eines Anwenders dar. In diesem Zusammenhang kann der Anwender eine Person, ein Gerät oder ein anderes System sein. Der Anwender steht außerhalb des zu untersuchenden Systems.

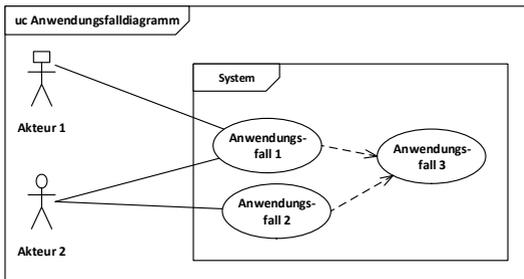


Abb. 3.9: Notation Anwendungsfalldiagramm

Klassendiagramm Ein Klassendiagramm ist das mit Abstand wichtigste Strukturdiagramm der UML. Im Klassendiagramm können die Zusammenhänge zwischen den Klassen als auch dem Aufbau von Klassen dargestellt werden.

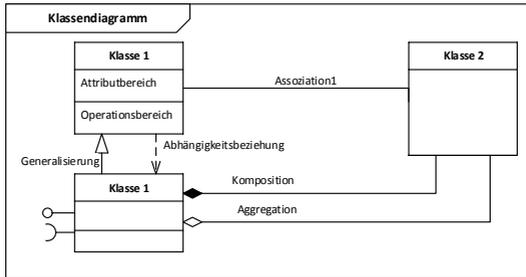


Abb. 3.10: Notation Klassendiagramm

Zustandsdiagramm Ein Zustandsdiagramm zeigt eine Folge von Zuständen, die ein Objekt während seiner Existenz annimmt sowie welche Übergänge aufgrund von Ereignissen stattfinden. Mit dem Zustandsdiagramm wird ein sogenannter endlicher Automat beschrieben.

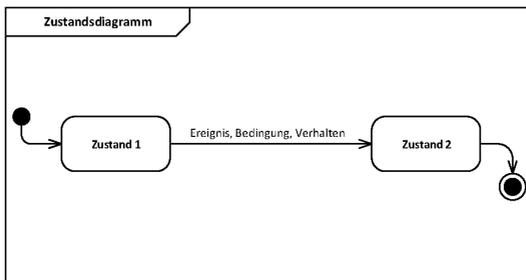


Abb. 3.11: Notation Zustandsdiagramm

Aktivitätsdiagramm Ein Aktivitätsdiagramm zeigt die grundlegenden Abläufe in einem System, das durch die einzelnen Elemente (Knoten) definiert wird. Das Aktivitätsdiagramm wird bei dem Entwurf von Systemen präferiert genutzt, da es die Abläufe und Abarbeitung eines Anwendungsfalls konkret visualisiert.

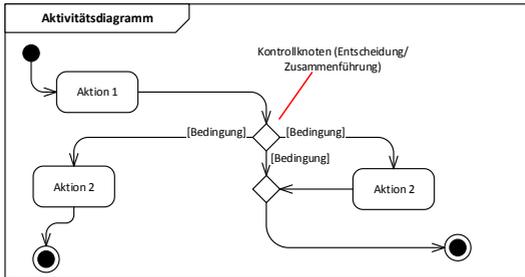


Abb. 3.12: Notation Aktivitätsdiagramm

Komponentendiagramm Ein Komponentendiagramm zeigt eine bestimmte Sicht auf die Struktur des modellierten Systems. Es werden die Komponenten mit deren Schnittstellen dargestellt. Das Diagramm zeigt auch, wie Komponenten über Abhängigkeitsbeziehungen und Konnektoren miteinander verbunden sind.

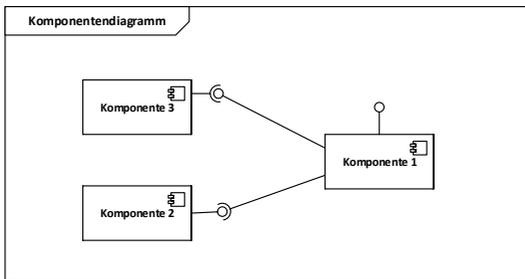


Abb. 3.13: Notation Komponentendiagramm

Kommunikationsdiagramm Ein Kommunikationsdiagramm zeigt Interaktionen zwischen Objekten in einem bestimmten Kontext. Dieser Diagrammtyp legt besonderes Augenmerk auf die Zusammenarbeit der Objekte. Es werden ausgewählte Nachrichten zwischen den Objekten dargestellt. Dabei können die zeitliche Abfolge, der Name, die mögliche Antwort und Argumente der Nachricht modelliert werden.

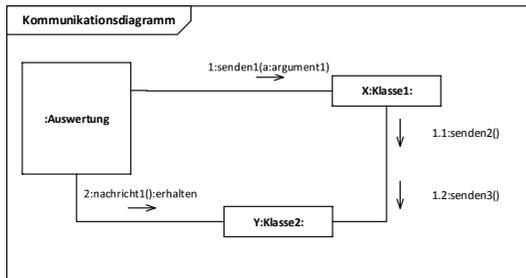


Abb. 3.14: Notation Komponentendiagramm

Auf eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Diagrammtypen wird verzichtet, eine genaue Definition und Aufführung aller möglicher Diagrammtypen kann beispielsweise [48] und [46] entnommen werden. Die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Diagrammtypen sind weitestgehend selbsterklärend oder die Entwicklung des Modells ergibt sich aus dem Kontext des zu beschreibenden Systems.

3.3 Bewertung Potential und Anforderungen

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die Entwicklung der beschriebenen Methodik Potential für die unterschiedlichen Bereiche bietet. So wurde einerseits gezeigt, dass der Bedarf nach einer klaren Strukturierung besteht und andererseits auch im Bereich des technischen Projektmanagements für die Produktionstechnik Lücken geschlossen werden müssen. Der Entwurf eines BVS in der Produktionstechnik ist ein überwiegend kreatives, auf Wissen und Erfahrung begründetes Vorausdenken eines technischen Systems. Im Entwurf müssen die Anforderungen an das BVS erfasst und analysiert werden, sodass eine Funktionshierarchie geschaffen wird. Anhand dieser Funktionen muss eine Systemstruktur erzeugt werden, die eine sinnvolle Ableitung von Komponenten zur Erfüllung der Anforderungen gestattet. Die produktionstechnischen Restriktionen müssen erfüllt werden. Außerdem muss die Methodik in die Phasen eines Entwicklungsprojektes einzuordnen sein sowie der effizienten Entwicklung entsprechen.

Die verschiedenen Vorgehensmodelle und dargestellte sequenzielle Arbeitsweise im Maschinen- und Anlagenbau bewirken oft lange Bearbeitungszeiten. Als Lösung dieses Problems wird die engere Zusammenarbeit der Disziplinen vorgeschlagen. Gerade in KMUs ist aber die sequenzielle Vorgehensweise etabliert. In [65] wird die Forderung gestellt, möglichst früh alle Disziplinen in den Entwicklungsprozess einzubinden.

Die objektorientierte Modellierung bietet die Möglichkeit, all diesen Anforderungen zu entsprechen und stellt gleichzeitig geeignete Werkzeuge für eine solche Methodik

bereit. Unter diesen Voraussetzungen kann im nächsten Kapitel mit der Beschreibung der entwickelten Methodik begonnen werden.

Kapitel 4

Methodik bei Entwicklung von 3D-BVS

Wie bereits erwähnt, bringt der Einsatz objektorientierter Methoden Vorteile mit sich. Ein Vorteil ist, dass in allen Phasen des Entwicklungsprozesses ein durchgängiges Modell Verwendung findet. Dies führt zu einer sehr guten Verwendbarkeit der Entwurfsergebnisse. Nachfolgend soll eine Methodik vorgestellt werden, die den objektorientierten Ansatz auf die Entwicklung von Bildverarbeitungssystemen im Bereich der Anlagenautomation vor allem bei sogenannten KMU unterstützt.

4.1 Grundkonzept

Das entwickelte Grundkonzept entstand aus einer Gegenüberstellung der klassischen Vorgehensweise der objektorientierten Entwicklung und dem Schema für die Planung und Durchführung einer 3D-Messaufgabe, wie in [23] beschrieben. Die beiden Modelle bilden den Einstieg für das methodische Vorgehen zur Entwicklung von 3D-BVS. In Abbildung 4.1 wird als Vorgehensmodell der dargestellte Ablauf vorgeschlagen, dabei wird die Einteilung in vier Phasen ähnlich der objektorientierten Entwicklung genutzt. Ausgehend von diesem Ansatz, wird die Planung und Projektierung des BVS in die folgenden Phasen unterteilt:

1. Anforderungsanalyse
2. statische Analyse
3. dynamische Analyse
4. Entwurf des Systems

Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung der einzelnen Phasen gegeben, die detaillierte Beschreibung und das Vorgehen in diesen Phasen kann den jeweiligen Unterkapiteln entnommen werden. In der Anforderungsanalyse muss zunächst geklärt werden, welches Problem mittels Methoden der Bildverarbeitung gelöst werden soll. Dies lässt sich generell mit der Anfrage nach einer bestimmten Automatisierungslösung eines Kunden bei einem Automatisierungshersteller (Integrator) vergleichen. In der statischen Analyse geht es darum, alle Anforderungen zu erfassen, die das zu entwickelnde BVS erfüllen soll. In dieser Phase wird geklärt, wie das Problem mittels Bildverarbeitung gelöst werden kann. Die dynamische Analyse befasst sich mit der

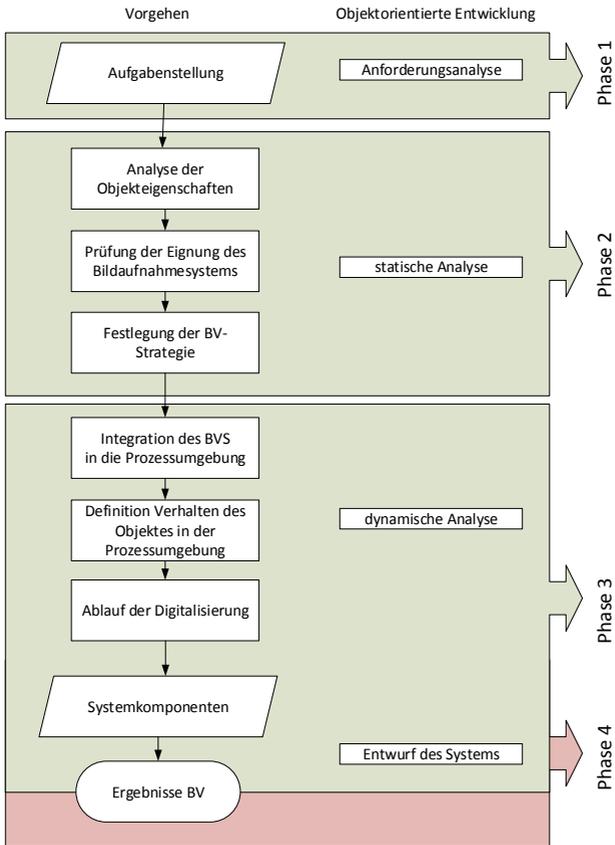


Abb. 4.1: Durchführung einer 3D-Messaufgabe, unterteilt in Phasen, zugeordnet zu den Schritten der objektorientierten Entwicklung

funktionalen Beschreibung des Verhaltens des zu entwickelnden BVS in der Produktion. In dieser Phase soll geklärt werden, wie das BVS in die Produktion eingebunden werden kann.

Ausgehend von der Analyse wird der Systementwurf des BVS erstellt, also die konkrete Umsetzung des Vorhabens geplant.

Die hier beschriebenen Phasen können so direkt aus der objektorientierten Entwicklung übernommen werden. Das bedeutet, es wird prinzipiell wie in [47] beschrieben vorgegangen. Aus der Analyse wird der Entwurf abgeleitet, in Rahmen dessen das System modelliert werden kann, sodass sich daraus die Zusammenhänge für die technische Umsetzung ergeben, die zur Implementierung des Systems genutzt werden.

Ausgehend von dem gewöhnlichen Ablauf eines Automatisierungsprojektes lassen sich die Phasen wie folgt einordnen:

Die erste Phase ist gleichzusetzen mit einer Anfrage bzw. mit der Einreichung eines Lastenheftes. In die zweite Phase fällt das Erstellen eines Pflichtenheftes bzw. auch schon erste Vorversuche. Die dritte Phase stellt die detaillierte Entwicklung und Projektierung des BVS dar. Phase Vier ergibt dann den konkreten Entwurf des Systems mit allen Eigenheiten und die Umsetzung des Systems.

4.2 Vorgehen bei Projektierung

Im Folgenden wird das Vorgehensmodell für die Projektierung detailliert vorgestellt. In den einzelnen Abschnitten werden strukturiert die Methoden und Techniken dargestellt, diese können für konkrete Projekte angepasst werden.

4.2.1 Anforderungsanalyse

Die Anforderungsanalyse fällt in den Bereich der Vorprojektphase und stellt den ersten Schritt in ein Projekt dar.

Es wird also durch die Systembeschreibung aus Kundensicht das Projekt gestartet. Der Kunde beschreibt in natürlicher Sprache die Funktionen, die das BVS in der Produktion leisten soll. Der Produktionsprozess liefert die Randbedingungen, unter denen das BVS betrieben wird. Daraus ergeben sich die fachlichen Basisanforderungen für das Projekt. Diese sollten möglichst in Form eines Lastenheftes spezifiziert werden. Ein Lastenheft ist wie folgt definiert:

„...vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines (Projekt-) Auftrags.“ [66, S. 9]

Gerade im Bereich der industriellen Bildverarbeitung ist eine gute Definition der Anforderungen essentiell. Diese Feststellung wurde auch vom VDI/VDE-GMA- Fachausschuss „Bildverarbeitung in der Mess- und Automatisierungstechnik“ getroffen und Handlungsbedarf abgeleitet. Daraus hat der Fachausschuss für die Verständigung von Nutzern und Anbietern von BVS in [7] einige Hinweise für Lasten- und Pflichtenhefte

entwickelt. Dabei werden folgende Einflussgrößen genannt, die in das Lastenheft mit aufgenommen werden müssen:

- Aufgabenstellung
- Prüfobjekt
- Szene
- Prozessintegration
- Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Prozessintegration beschreibt die Nutzung der Daten des BVS, also was mit den Daten, die durch das BVS generiert werden, geschehen soll. Zum anderen muss hier erfasst werden, wie die Hardware-Umgebung des Produktionssystems beschaffen ist, in die das 3D-BVS eingebunden werden soll. Bei der Betrachtung der Prozessintegration werden die Elemente identifiziert, die mit dem BVS interagieren, also die Akteure.

Die genannten Anforderungen werden an den Entwickler des BVS übergeben, woraus dieser dann in der nächsten Projektphase die entsprechenden Schlussfolgerungen ziehen kann. Wenn der Informationsgehalt der Anforderungen nicht ausreichend ist, sollte der Entwickler dem Kunden eventuell entsprechend seiner Erfahrungen Gelegenheit geben, das Lastenheft zu spezifizieren.

Für die Modellierung der Anforderungen bzw. deren Erfassung bietet UML eine Lösung in Form von Anwendungsfällen und den sogenannten Use-Case-Diagrammen an. Ein Anwendungsfall beschreibt die Interaktion zwischen Anwender und System.

Der Anwender muss nicht menschlich, sondern kann auch ein anderes System sein.

Ein Anwendungsfall beschreibt, **was** das System, aber nicht **wie** es dies leisten soll. Die Abbildung eines BVS mittels Use-Case-Diagrammen ist in Abbildung 4.2 verallgemeinert dargestellt. Mittels dieser Darstellung und der Anforderungsanalyse sollen die folgenden Punkte erreicht werden:

- Strukturierung der Anforderungen
- Beschreibung der Beziehungen
- Betonung des Wesentlichen

Außerdem sollten während der Anforderungsanalyse das Use-Case-Diagramm und die sich daraus ergebenden Anwendungsfälle durchgehend verfeinert und ergänzt werden. Ausgehend von der Beschreibung der Anwendungsfälle können Objekte bzw. Klassen des BVS identifiziert werden.

Beispiel Anforderungsanalyse

Anhand der im Folgenden dargestellten Robot-Vision Anwendung soll das Vorgehen bei der Anforderungsanalyse kurz vorgestellt werden. Es wird erläutert, welche Aufgabenstellung in Form einer Anfrage, Lastenheft oder Ähnlichem eingeht und wie diese mittels UML in einen Anwendungsfall überführt werden kann, so dass sich die

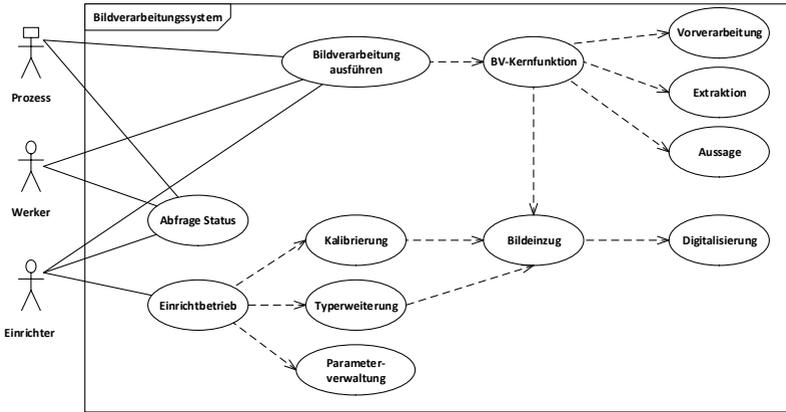


Abb. 4.2: Use-Case Diagramm einer Bildverarbeitungssoftware

Beschreibung des Systems als Use-Case Diagramm (Abbildung 4.3) ergibt, mit der das System weiter projiziert werden kann.

Ausgangssituation: Die Nester eines Rundschanttisches werden von einem Produktionshelfer mit einem Bauteil bestückt. Die Bauteile werden am Arbeitsplatz in einem Kleinladungsträger (KLT) als Schüttgut bereitgestellt. Hat der Produktionshelfer ein Nest bestückt, wird dies über einen Taster bestätigt, woraufhin der Prozess den Tisch eine Position weiter taktet.

Funktionale Anforderungen: Der Bestückungsprozess soll automatisch ohne Eingreifen eines Produktionshelfers ablaufen. Die Bereitstellung der Bauteile soll nicht verändert werden. Die Bearbeitung erfolgt sortenrein. In der beschriebenen Anlage wird nur ein Bauteiltyp verarbeitet.

Die beschriebene Ausgangssituation und die funktionalen Anforderungen beschreiben die gesamte Automatisierungsaufgabe. Als Lösungsansatz ergibt sich eine Applikation, bei der mit einem 6-Achsen-Industrieroboter die Bauteile aus dem KLT entnommen werden und in die Nester des Rundschanttisches gelegt werden sollen.

Die Position des nächsten zu greifenden Bauteils in dem KLT soll mittels 3D-BVS erfolgen. Der Roboter signalisiert dem Prozess die Ausführung. Daraus resultiert eine direkte Kommunikation zwischen Roboter und BVS, an die übergeordnete Prozessperipherie wird lediglich der Status des Systems übermittelt. Die Einrichtung des Systems wird nur durch den Integrator vorgenommen. Aus dieser Ableitung der Aufgabenstellung für das 3D-BVS ergeben sich die in Abbildung 4.3 angegebenen An-

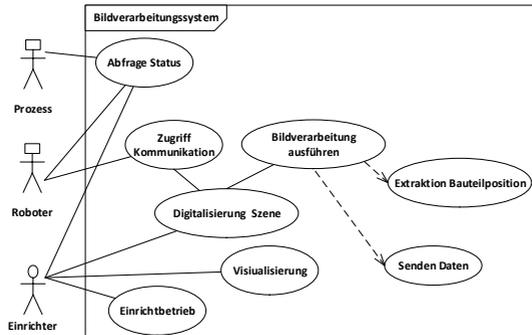


Abb. 4.3: Use-Case Diagramm Anforderungsanalyse Robot-Vision Anwendung

wendungsfälle.

In der Darstellung wird deutlich, in welcher Beziehung das BVS mit den möglichen Akteuren steht. Die Anforderungen, die es erfüllen muss, ergeben sich aus den Anwendungsfällen. Es ergibt sich also eine strukturierte und auf das Wesentliche gebrachte Beschreibung der Werte, die in die Anforderungsanalyse eingebracht werden.

4.2.2 Statische Analyse

Der erste Schritt der Analyse und der Einstieg in das Projekt von der Entwicklerseite her sollte die Erstellung eines Pflichtenheftes sein. Das Pflichtenheft ist allgemein wie folgt definiert:

„...vom Auftragnehmer erarbeitete Realisierungsvorgaben auf der Basis des vom Auftraggeber vorgegebenen Lastenheftes.“ [66, S. 10]

Die Erstellung eines Pflichtenheftes verlangt, dass eine Lösungsbeschreibung erarbeitet werden muss.

Zur Präzisierung der Anforderungen und Erfassung der Lösungsbedingungen wird in der vorgestellten Methodik die statische Analyse verwendet.

Die Auswahl der Sensorik, also des Bildaufnahmesystems, beeinflusst das gesamte Automatisierungsprojekt. In [67] wurde festgestellt, dass das Bildaufnahmesystem direkt auf den Aufwand zur Entwicklung einer entsprechenden BV-Software wirkt. Zum anderen kann es durch die suboptimale Auswahl eines Bildaufnahmesystems dazu kommen, dass die Flexibilität des entworfenen BVS eingeschränkt wird. Ausgehend von diesem Ansatz wird die Vorgehensweise bei der statischen Analyse definiert.

Die Entwicklung von 3D-BVS wird durch die in Abbildung 4.4 dargestellten Kriterien bestimmt, die auf die Komponenten Objekt, Aufgabe und Produktionsprozess wirken. Die Gesamtaufgabe des BVS in der Produktionstechnik setzt sich aus den

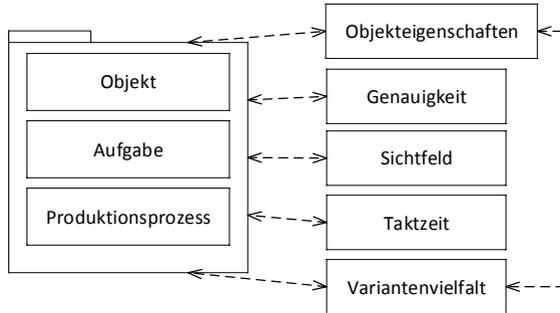


Abb. 4.4: Einfluss der Kriterien auf die Komponenten eines 3D-BVS

Komponenten Objekt, Aufgabe und Produktionsprozess zusammen. Unter Objekt soll das Bauteil verstanden werden, dessen Merkmale extrahiert werden müssen. Die Komponente Aufgabe stellt die Funktion dar, die das BVS im umgebenden Produktionsprozess erfüllen muss. Das Bildaufnahmesystem muss anhand dieser Kriterien, die sich aus den Komponenten ableiten lassen bzw. in Wechselwirkung mit diesen stehen, ausgewählt werden.

In der statischen Analyse wird ein Modell des BVS in Form eines Klassendiagramms erzeugt, das die technischen Kernanforderungen des BVS zusammenfasst. Abgeleitet aus den in [67] beschriebenen Paketen zur Bestimmung des Bildaufnahmesystems, die in Abbildung 4.5 dargestellt werden, ergeben sich die drei Punkte, die im Rahmen der statischen Analyse erarbeitet werden müssen.

1. Analyse der Objekteigenschaften
2. Prüfung der Eignung des Bildaufnahmesystems
3. Festlegung der BV-Strategie

Analyse der Objekteigenschaften

Es erfolgt die Analyse des Objektes und der Merkmale, die erfasst werden müssen. Durch diese Betrachtung kann in erster Näherung das nötige Sichtfeld bestimmt werden. Nach [7] ist das Sichtfeld der räumliche Szenenbereich, den das Bildaufnahmesystem erfasst. Bei der Analyse müssen die folgenden Gesichtspunkte betrachtet werden, mit deren Hilfe die Eigenschaften der Szene weiter eingegrenzt werden können:

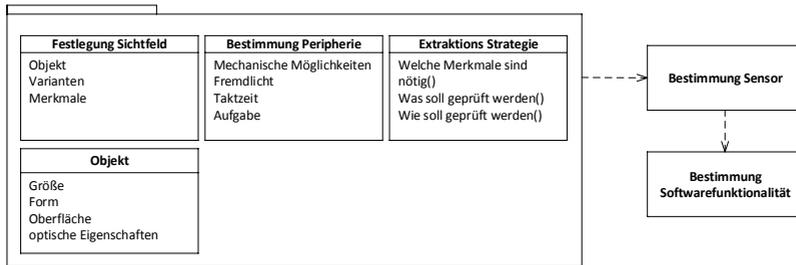


Abb. 4.5: Strukturdiagramm: Klassen zur Definition eines BVS, Zielsetzung Bestimmung der Sensorik und Softwarestruktur [67]

- Abmessungen
- Geometrie
- Material
- Oberfläche
- Kanten, Referenzflächen, Symmetrien
- Varianz an zu erfassenden Objekten

Ausgehend von diesen Eigenschaften und Anforderungen, die sich aus der zu erfassenden Szene mit dem Prüfobjekt ergeben, können die Dimensionen des Sichtfeldes bestimmt werden. Die Anforderungen an die Genauigkeit, also Auflösungs- bzw. Quantisierungseigenschaften des Sensors, werden im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

Prüfung der Eignung des Bildaufnahmesystems

Nachdem die Eigenschaften des Objektes und daraus das Sichtfeld bestimmt worden ist, muss anhand von diesen ein geeignetes Bildaufnahmesystem ausgewählt werden. Es muss das Bildaufnahmesystem ausgewählt werden, welches über die beste Eignung verfügt, die durch die Objekteigenschaften beschriebene Szene zu digitalisieren. Es werden die Anforderungen der Szene an das Bildaufnahmesystems um die Anforderungen ergänzt, die beim Einsatz und der Auswahl von Sensoren für Automatisierungsaufgaben zum Tragen kommen. Das heißt, es wird definiert, welcher Bedarf an sensorischen Funktionen zur Erfüllung der Automatisierungsaufgabe für das Bildaufnahmesystem vorliegt.

Es muss zunächst die nötige Genauigkeit bestimmt werden. Die Genauigkeitsvorgaben ergeben sich aus der Aufgabenstellung. Die Genauigkeit eines BVS-Sensors ergeben sich aus dem Sichtfeld bzw. in der 3D-BVS dem Messraum, also der Szenen Größe,

und dem Quantisierungsverhalten des Sensors.

Im Rahmen der Produktionsautomation ist der Zeitfaktor immer mit zu beachten, also das Ansprechverhalten, die Reaktionszeit und Schaltgeschwindigkeit eines Sensors, die im Rahmen der Taktzeit liegen müssen. Die Produktion unterliegt den Regeln der Wirtschaftlichkeit, was bedeutet, dass das Bildaufnahmesystem auf den wirtschaftlichen Rahmen der Produktionsanlage abgestimmt sein muss, das impliziert Kosten und Umsetzungsdauer.

Ausgehend von diesen Anforderungen und den Eigenschaften der festgelegten Szene kann man für die Auswahl des Bildaufnahmesystems folgende Bewertungskriterien festlegen:

- Sichtfeld bzw. Messraum
- laterale Genauigkeit
- Tiefengenauigkeit
- Bildrate/Taktzeit
- Oberflächenrelief
- Textur der Szene
- Fremdlicht
- Komplexität

Sichtfeld bzw. Messraum Aus der Analyse der Objekteigenschaften sind die Abmessungen und die Beschaffenheit der Szene bekannt. Aus diesen kann das Sichtfeld bzw. der Messraum abgeleitet werden, das zur Erfüllung der Automatisierungsaufgabe benötigt werden. Wenn die Abmessungen der Szene bekannt sind, kann der Messraum errechnet werden, der zur Erfüllung der Automatisierungsaufgabe benötigt wird. Das bedeutet, der Messraum, den das ausgewählte Bildaufnahmesystem (X_S , Y_S und Z_S) erfassen kann, muss den Messraum (X_M , Y_M und Z_M), der für die Automatisierungsaufgabe nötig ist, einschließen, siehe hierzu Abbildung 4.6. Der Messraum stellt das erste Kriterium zur Auswahl des Bildaufnahmesystems dar, da mit diesem weitere Kriterien wie die Genauigkeit bestimmt werden können. Der Messraum, mit den Kennwerten X_M , Y_M und Z_M und die Genauigkeitsvorgaben der Automatisierungsaufgabe dienen zur Bestimmung der Anforderungen, die im Folgenden beschrieben werden.

laterale Genauigkeit Aus der Genauigkeitsvorgabe der Aufgabenstellung muss die Genauigkeit des zu entwickelnden Bildverarbeitungssystems abgeleitet werden. Der Zusammenhang der Genauigkeitsbetrachtung und des Auflösungsvermögens eines Bildaufnahmesystems ist jedoch nicht so trivial zu behandeln. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit vereinfachte Verfahren genutzt bzw. es werden die Herstellerangaben von der entsprechenden Sensorik verwendet. Hier wird davon ausgegangen, dass mittels der Sensorik, hier das Bildaufnahmesystem, ein Signal erzeugt wird, welches in geeigneter Form für das Bildverstehen digitalisiert wird. Unter der Digitalisierung

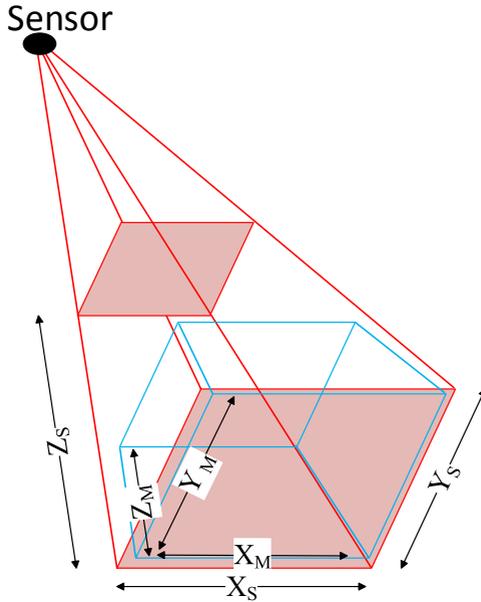


Abb. 4.6: nötiger Messraum (blau) und Messraum eines möglichen Sensors (rot)

versteht man die Transformation stetiger Signale in diskrete Werte. Aufgrund dieser Transformation müssen auch die Folgen der Orts- und Wertdiskretisierung Beachtung finden, siehe Abbildung 4.7. Diese Annahme würde bedeuten, dass die Diskretisierung, also das Pixelraster des Bildes, die Genauigkeit des BVS begrenzt. In erster Annäherung muss also, um ein Bildaufnahmesystem mit geeigneter Genauigkeit auszuwählen, die nötige Anzahl an Bildpunkten bestimmt werden.

Im einfachsten Fall würde das bedeuten, dass sich die Bildpunktauflösung oder Genauigkeit aus dem Verhältnis der Szenengröße zur Bildpunktzahl ergibt. Aus der Signalverarbeitung ist bekannt, dass durch die Digitalisierung möglicherweise Informationsverlust bei Unterabtastung entsteht bzw. es zu einer Verfälschung der Strukturen (Aliasing) kommt. Im Nyquist-Shannon-Abtasttheorem ist formuliert, dass ein kontinuierliches Signal der maximalen Bandbreite f_{max} mit einer Frequenz $f_{abtast} \geq 2f_{max}$ abgetastet werden muss, damit aus dem so erhaltenen zeitdiskreten Signal das Ursprungssignal ohne Informationsverlust rekonstruiert werden kann [68]. Daraus lässt sich für die Bilderfassung schließen, dass für die adäquate Digitalisierung einer Objektstruktur mindestens die doppelte Auflösung benötigt wird, besonders,

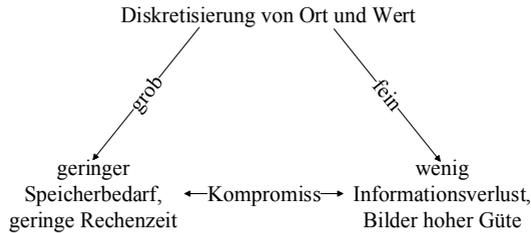


Abb. 4.7: Konflikt bei der Orts- und Wertdiskretisierung, zwischen ausreichend Informationen und geringem Speicherbedarf

wenn kleine Details eines Objekts erfasst werden müssen.

Die Genauigkeit des BVS ist nicht nur von der Anzahl der Bildpunkte abhängig, sondern von unterschiedlichen Faktoren. Diese Faktoren lassen sich nur schwer verallgemeinert darstellen. An dieser Stelle sind zum einen Faktoren zu nennen, welche das Bildsignal, also die Qualität des Bildes beeinflussen, und zum anderen Faktoren, welche die Genauigkeit bei der Auswertung softwareseitig beeinflussen.

Die Qualität der Digitalisierung wird von unterschiedlichen Aspekten bestimmt, hier sind zum Beispiel das Rauschverhalten des Signals, Verzeichnung und erzielbarer Kontrast zu nennen. Rauschverhalten und Kontrast ergeben sich aus der Beschaffenheit des Sensors, wie z.B. Bildpunktgröße, Sensitivität des Pixels und Ähnlichem. Der Kontrast kann beispielsweise durch die Belichtungszeit gesteuert werden, welche wiederum auch Auswirkung auf das Rauschen im Bild hat. Die Verzeichnung kann im Rahmen der Kalibrierung erfasst und korrigiert werden.

Diese Größen können nicht vereinfacht werden, da auch die Wechselwirkung, in der sie stehen, nicht trivial betrachtet werden können. Es ist nicht ohne Weiteres möglich, vor der Auswahl des Bildaufnahmesystems eine detaillierte Vorhersage der Qualität der Digitalisierung zu treffen. Es muss jedoch zur Bestimmung und Auslegung des Bildaufnahmesystems eine Eingrenzung der nötigen Anzahl an Pixeln getroffen werden, wobei eine Abschätzung der Qualität der Digitalisierung erfolgen muss.

In erster Annäherung muss davon ausgegangen werden, dass nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem mindestens die doppelte Anzahl an Bildpunkten für die Erfassung der Merkmale nötig ist, also ergibt das Verhältnis der Szenengröße zur doppelten Bildpunktanzahl die Genauigkeit. Weiter kann davon ausgegangen werden, dass bedingt durch die Signalqualität bei nicht idealer Digitalisierung eine noch größere Anzahl an Bildpunkten erforderlich ist. Daraus resultiert ein Multiplikator abhängig von der Signalqualität, der mit in die Berechnung der nötigen Bildpunkte miteinbezogen werden muss, im Folgenden p_{an} genannt.

Neben den benannten Begrenzungen durch das Bildaufnahmesystem besteht die Möglichkeit, mit der Signalverarbeitung und Bildverarbeitung die Genauigkeit zu verbes-

sern. Diese Möglichkeiten müssen mit einbezogen werden, um eine Überauslegung zu vermeiden.

Die bisher getroffenen Annahmen zur Abschätzung der Genauigkeit bzw. Bestimmung der notwendigen Anzahl an Bildpunkten beruht auf der Annahme, dass die Merkmale mittels Binärverfahren aus den digitalisierten Daten extrahiert werden. Binärverfahren sind stark vom Kontrast im Bild abhängig, es wird teilweise eine Differenz von mehr als 30% bei den Werten des Bildpunktes für die Unterscheidung verlangt. Bei diesen Verfahren liegt die Genauigkeit der Antastung von Kanten im Bereich von maximal ± 1 Bildpunkt. Die Bildverarbeitung bietet jedoch im Bereich der Software Antastalgorithmen, die weniger vom Kontrast des Bildes abhängig sind und auch mit wechselnden Kontrastverhältnissen umgehen können. Gradientenverfahren bieten die Möglichkeit der Merkmalsextraktion bei schlechten Kontrastverhältnissen. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit Antastalgorithmen zu verwenden, welche mit Subpixeling arbeiten. Diese sind sehr schnell, kontrastunabhängig und ermöglichen die Antastung von Kanten mit einer Genauigkeit bis zu $\pm 0,1$ Bildpunkt. Dabei wird beispielsweise mit einer Regressionsanalyse gearbeitet, um anhand eines Werteverlaufs die Kanten eines Merkmals zu bestimmen.

Es kann auch von der subpixelgenauen Ermittlung eines Merkmals bzw. einer Größe gesprochen werden, wenn der Schwerpunkt eines Objektes im Bild ermittelt wird. Der Schwerpunkt eines Objektes findet oft bei Positionsbestimmungen von Objekten Verwendung. Dies ist üblicherweise bei Handhabungsaufgaben, die mittels BVS erfüllt werden sollen, der Fall, beispielsweise sogenannte „pick and place“ Automatisierungsaufgaben.

Für die Bestimmung des Zielpunktes wird der Schwerpunkt eines Bildbereiches berechnet. Dies geschieht über die Anzahl N der Bildpunkte des Objektes und die Koordinaten der Bildpunkte des Objektes, wobei der Mittelwert dieser den Schwerpunkt bildet. Dieses Vorgehen entspricht dem Ermitteln des Schwerpunktes in der Physik.

Aus der Mittelwertbildung wird deutlich, dass sich eine Subpixelgenauigkeit ergibt, da durch die Anzahl der Bildpunkte N geteilt wird. Die Verwendung von Mittelwerten erhöht die Robustheit und Messsicherheit bei der Detektion von Merkmalen in einem Bild. Die Einpassung von Kurven und Flächen in eine gegebene Wolke von Punkten wären ein Beispiel, bei dem mit einer Anzahl an Punkten und Interpolation gearbeitet würde.

Die Verwendung von derartigen Interpolationsverfahren soll an dieser Stelle auch Eingang in die Bestimmung der Anzahl der nötigen Pixel finden. Die Betrachtung der möglichen Interpolation wird hier als I_{Faktor} in die Berechnung mit eingehen.

Die einfachste Art der Interpolation ist die Schätzung der zu interpolierenden Werte für beliebige Positionen $I(x, y)$ zwischen bekannten diskreten Bildpunkten $P(u, v)$. Für diese Art der Interpolation bieten sich die linearen Interpolation, die Nearest-Neighbor-Interpolation und die bilineare Interpolation an. Bei der linearen Interpolation erfolgt Interpolation anhand der Gewichtung der nächsten beiden benachbarten Funktionswerte in Abhängigkeit zu ihrem Abstand, dabei wird nur eine Richtung betrachtet, also x oder y .

Die Nearest-Neighbor-Interpolation untersucht die benachbarten Bildpunkte und weist

den Funktionswert des nächst gelegenen Bildpunktes zu.

Bei der bilinearen Interpolation erfolgt die Berechnung von Bildpunkten an einer nicht ganzzahligen Position $I(x, y)$ aus den vier umliegenden Bildpunkten $P(u_n, v_n)$ mit Gewichtung entsprechend dem Abstand dieser zum Punkt I . Mit diesen Verfahren kann also an einer beliebigen Stelle $I(x, y)$ der Funktionswert subpixelgenau bestimmt werden. Die Extraktion von Informationen kann darüber hinaus auch mit anderen Verfahren verbessert bzw. interpoliert werden. So bieten sich gerade bei der Kantenextraktion z.B. auch Gradientenverfahren an, um den Informationsgehalt zu steigern und so die Genauigkeit zu verbessern. Eine detaillierte Beschreibung würde zu weit gehen, da diesen Methoden oft relativ aufwendige Rechenverfahren zugrunde liegen, die nicht ohne Weiteres im Vorfeld abgeschätzt werden können oder sehr fundiertes Wissen in diesem Bereich voraussetzen. Daher werden für die Abschätzung der Möglichkeiten eines BVS an dieser Stelle Richtwerte aus der Literatur und Praxiserfahrung vorgegeben.

In der Literatur werden unterschiedliche Werte für die Antastgenauigkeit mit Subpixel Algorithmen gegeben, so wird in [69] von $1/8$ Bildpunkt angegeben, in [70] wird von $1/4$ Bildpunkt als Wert ausgegangen, der sich mit der Bildverarbeitungspraxis deckt. Angelehnt an diese Werte wurden die in Tabelle 4.1 aufgeführten Werte definiert. Es wird bewusst nicht das volle Potential der Subpixel Algorithmen angesetzt, da nur eine Abschätzung vorliegt und noch Funktionsreserven vorhanden sein sollen.

I_{Faktor}	Beschreibung
0,3	optimale Verwendung von Subpixelverfahren möglich
0,6	Verwendung von Subpixelverfahren oder Interpolation über Schwerpunkte
1	keine Interpolation möglich

Tab. 4.1: Richtwerte für I_{Faktor} ,

An dieser Stelle wird angemerkt, dass eine Fülle von Störeinflüssen die Subpixel-Genauigkeit überdecken können. Beispielsweise perspektivische Verzerrung, optische Verzeichnung, Signalrauschen und die Geometrie des Bildpunkterasters im Bildaufnahmesystem.

Die eigentliche Übertragung der Subpixel-Genauigkeit von der Digitalisierung in den realen Raum ist ein Bereich, der ein eigenes, schwieriges Teilgebiet der Bildverarbeitung darstellt, daher kann an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden. Ausgehend von beschriebenen Zusammenhängen muss p_{an} nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem mindestens 2 sein. In der folgenden Tabelle 4.2 werden für p_{an} Richtwerte aufgeführt und deren Zusammensetzung kurz dargestellt.

Es wird angenommen, dass die Komponenten und Algorithmen mit dem nötigen Fachwissen ausgewählt und optimiert worden sind. Auch das etwaige Auftreten von Kalibrierfehlern wird an dieser Stelle ausgeschlossen. *Szene* ist die Ausdehnung der

p_{an}	Beschreibung
2	Erwartung optimaler Kontrast und geringes Rauschverhalten
3	übliche Bildgüte mit Funktionsreserve
...	kann theoretisch beliebig hoch gewählt werden für Funktionsreserve und schlechte Bildqualität

Tab. 4.2: Richtwerte für p_{an} ,

Szene in die zu bestimmende Richtung in mm (x,y oder z) und *Genauigkeit* ist die verlangte Genauigkeit in mm, daraus ergibt sich näherungsweise der Ansatz:

$$\frac{(p_{an} \times I_{Faktor} \times Szene)}{Genauigkeit} = Bildpunktzahl \quad (4.1)$$

Die hier getroffene Annahme ist eine starke Vereinfachung und dient nur als grundsätzlicher Anhaltspunkt für eine Abschätzung der nötigen Auflösung. Die Genauigkeit des Bildaufnahmesystems unterliegt noch weiteren Einflussfaktoren, wie z.B. den optischen Komponenten, der Anlagenumgebung, Beugung bei der Signalerzeugung, etc.. An dieser Stelle muss auch darauf hingewiesen werden, dass für messende Systeme etablierte Vorgaben wie [71] existieren; diese beschreiben, wie die Genauigkeit berechnet und daraus die Eignung für eine gegebene Aufgabenstellung abgeleitet werden kann. Dies ist jedoch teilweise sehr aufwändig und in der Phase des ersten Entwurfs oder bei klassifizierenden Systemen nicht möglich oder nötig, daher der beschriebene Ansatz des ersten Abschätzens.

Neben dem an dieser Stelle beschriebenen Ansatz der Genauigkeitsbetrachtung müssen gegebenenfalls noch weitere Aspekte mit einbezogen werden, die nicht ohne Weiteres eine Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit ermöglichen. In diesem Fall müssen Vorversuche zur Evaluierung dieser Ansätze durchgeführt werden.

Tiefengenauigkeit Die Bestimmung der Genauigkeit eines Systems zur Erfassung der Tiefe unterliegt vielen beeinflussenden Faktoren und lässt sich nicht für die aufgeführten Bildaufnahmesysteme vereinheitlicht darstellen, da hier die sehr individuellen Eigenschaften betrachtet werden müssen. Die Einordnung der Tiefengenauigkeit ist dem Grundlagenkapitel zu entnehmen und muss anhand der Anforderungen des Projektes sorgfältig abgeschätzt werden.

Bildrate/Taktzeit Der Punkt Bildrate bzw. Taktzeit beschreibt die Fähigkeiten eines Sensors, die Szene zu digitalisieren bzw. welche Taktzeit der Prozess dem BVS zugesteht. Das bedeutet auch, dass hier eventuelle Rechenzeiten des Gesamtablaufs des BVS mit einbezogen werden müssen.

In der Regel wird in der Anforderungsbeschreibung definiert, was für eine Taktzeit die Produktionsanlage erreichen muss. Darunter wird die Zeit verstanden, in der jeweils eine Mengeneinheit des zu produzierenden Gutes fertiggestellt wird, um die Soll-Mengenleistung der Produktionsanlage zu erfüllen.

Aus dieser Zeit t_{Takt} , die üblicherweise in Sekunden angegeben wird, lässt sich die Zeit t_{BVS} ermitteln, welche dem BVS zur Verfügung steht. Dabei muss der Produktionsprozess analysiert und über diese Analyse das Zeitfenster ermittelt werden, das sich für das BVS ergibt. Das bedeutet, es müssen sowohl die Einzelabläufe betrachtet werden als auch parallele Abläufe und Latenzen, die sich im Gesamttablauf ergeben. t_{BVS} lässt sich in die Digitalisierungszeit t_{Dig} und Auswertzeit t_{Aus} aufschlüsseln. t_{Dig} ist die Zeit, die zur Digitalisierung und 3D-Rekonstruktion der gesamten Szene benötigt wird und t_{Aus} gibt die Zeit an, bis dem Prozess die Ergebnisse zur Verfügung stehen.

Für Auswahl eines Bildaufnahmesystems muss also t_{Dig} betrachtet und geprüft werden, ob die Szene ausreichend schnell digitalisiert werden kann.

Im Vorfeld reicht eine Prüfung ob $t_{Takt} > t_{Dig}$, da die Auswertzeit aufgrund der modernen Algorithmen und Rechner oft vernachlässigbar ist und vorerst die generelle Machbarkeit untersucht werden muss. Die Auswertzeit ist immer an die Performanz des Systems gebunden, auf dem die Rechenoperationen bzw. Bildverarbeitung ausgeführt wird. Es sollten immer entsprechend rechenstarke Maschinen für zeitkritische Bildverarbeitungsoperationen eingesetzt werden. Aufgrund der Heterogenität der Möglichkeiten, die sowohl bei Bildverarbeitungsdaten als auch bei den Operatoren zur Verarbeitung dieser vorliegt, können kein allgemeingültiger Ansatz zur Bestimmung der Auswertungszeit gegeben werden.

Bei besonders zeitkritischen Abläufen oder komplexen Systemen muss die zeitliche Betrachtung zusätzlich in der dynamischen Analyse erfolgen, um die einzelnen Abläufe aufeinander abzustimmen.

An dieser Stelle wird auf die eventuell bestehende Wechselwirkung zwischen Anzahl an Bildpunkten und Bildrate hingewiesen, da eine steigende Anzahl an Bildpunkten oft ein Sinken der Bildrate bedeutet und sich damit t_{Dig} erhöht.

Oberflächenrelief Das Oberflächenrelief der Szene ergibt sich aus der Zusammensetzung der zu digitalisierenden Szene. Unter Relief wird die Höhengestaltung der Szene verstanden; gerade im Bereich der 3D-Bildverarbeitung ist diese Form oft ausschlaggebend für die Auswahl des korrekten Bildaufnahmesystems. Im Rahmen dieser Betrachtung wird das makroskopische Oberflächenrelief betrachtet. Die mikroskopische Oberflächenstruktur, die ebenfalls als Relief verstanden werden kann, wird bei den optischen Eigenschaften des Objektes betrachtet.

Die Abbildung 4.8 verdeutlicht unterschiedliche starke Reliefausprägungen und kategorisiert diese grob in drei Bereiche. Das Oberflächenrelief definiert sich durch die Winkel α und β und die Höhendifferenz h im Verhältnis zur Gesamthöhe. Es wird deutlich, dass triangulierende Systeme bei starker Reliefausbildung nicht zur Digitalisierung geeignet sind. Die Ausprägung des Reliefs kann zu einer Abschattung

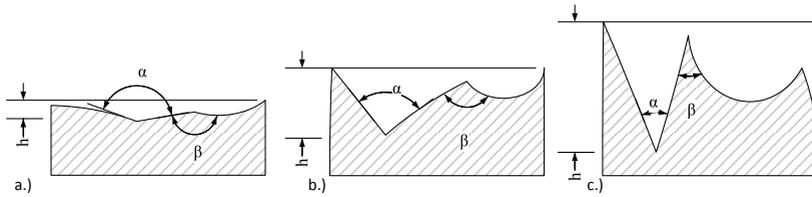


Abb. 4.8: Unterschiedlich stark ausgeprägtes Oberflächen Relief a.) Schwaches bis kaum vorhandenes Relief α und $\beta \geq 90^\circ$ und geringer Höhendifferenz h b.) Relief mit $90^\circ \geq \alpha$ und $\beta \geq 30^\circ$, c.) Starkes Relief α und $\beta \leq 30^\circ$ und deutlicher Höhendifferenz h

eines Strahlengangs (Beobachtungs- oder Projektionsstrahlengang) führen oder es kann durch Mehrfachreflexionen zu einer Störung der Korrespondenzanalyse kommen. Durch die üblichen Triangulationswinkel, die zwischen 10° und 30° liegen, sind diese Bildaufnahmesysteme oft nicht dazu geeignet, Szenen mit starkem Relief, wie beispielsweise Abbildung 4.8 c.) zu digitalisieren.

Verläuft das Relief nur in eine Richtung, kann die Digitalisierung durch geschickte Anordnung von Projektionsrichtung zum Reliefverlauf (d.h. die Projektor-Kamera Ebene muss parallel zu den Strukturen laufen) gegebenenfalls auch bei stärkerer Reliefausprägung erreicht werden. ToF-Bildaufnahmesysteme weisen in der Regel weniger Probleme bei der Digitalisierung der genannten Oberflächen auf.

Textur der Szene Textur einer Szene beschreibt die rein zweidimensional ausgeprägte Oberflächenbeschaffenheit einer Szene bzw. eines Objektes in der Szene. Die Textur kann dabei statistisch oder deterministisch regelmäßig sein. Eine Textur ist grundsätzlich die unterschiedliche Intensität der Abbildung der Oberfläche in der Digitalisierung. Dies beruht auf unterschiedlichen Effekten.

Textur kann durch einen Unterschied der Oberfläche mit konstanter Reflektanz (auch Reflexionsgrad) entstehen, also die geeignete Beleuchtung des Oberflächenreliefs. Textur entsteht auch bei Unterschieden in der Reflektanz auf ebenen Oberflächen. Unterschied in der Reflektanz entsteht beispielsweise bei bedrucktem Papier durch die aufgetragenen Farbpartikel, welche sich im Brechungsindex unterscheiden und so zu den Intensitätsunterschieden in der Digitalisierung führen. Außerdem entsteht Textur durch eine Kombination dieser beiden Effekte.

Die Textur einer Szene ist für das Bildaufnahmesystem relevant, wenn dieses aus der Szene Korrespondenzinformationen gewinnen muss, wie ein Stereokamerasystem. Für die anderen aufgeführten Bildaufnahmesysteme ist die Textur nicht bedeutend.

Fremdlicht Der Punkt Fremdlicht beschreibt den Einfluss, den Fremdlicht auf die Funktionalität und Güte des Bildaufnahmesystems haben kann. In der industriellen Bildverarbeitung sollte immer eine bestmögliche auf die jeweilige Problematik abgestimmte Beleuchtung definiert werden. Als Fremdlicht werden Lichteinflüsse, also Strahlungseinflüsse, verstanden, die nicht kontrolliert werden können. Fremdlichteinflüsse sollten, wenn möglich, immer in der Konzipierung der Anlage unterdrückt werden.

Besteht prozessseitig die Möglichkeit, Fremdlichteinflüsse auszuschließen, kann dieser Punkt bei der Auswahl des Verfahrens und des Bildaufnahmesystems vernachlässigt werden.

Die Fremdlichtempfindlichkeit eines Bildaufnahmesystems ist nicht eindeutig definiert. Bei optischen Systemen wird diese beispielsweise durch Appretur und Belichtungszeit bestimmt. Ein sehr empfindliches System ist oft auch sehr Fremdlichtempfindlich. Die Sensitivität eines Bildaufnahmesystems bedingt eine Reihe von Abhängigkeiten und wirkt sich auf den Kontrast und das Rauschverhalten sowie die Fremdlichtempfindlichkeit aus.

Generell ist davon auszugehen, dass ein Bildaufnahmesystem für die entsprechenden Lichtverhältnisse ausgelegt ist. Als Fremdlicht sollten Schwankungen, etwa Sonneneinstrahlung durch ein Fenster und nicht kontrollierbare Einflüsse verstanden werden. Die Fremdlichtempfindlichkeit ist jedoch eine Größe, die kaum angegeben wird bzw. über die Sensitivität des Sensors indirekt geregelt werden kann. Die Quantisierung des Fremdlichts kann am ehesten über die Messung der Schwankungen in der Bestrahlungsstärke oder Beleuchtungsstärke erfolgen. Es erscheint aufgrund mangelnder Angaben seitens der Systemhersteller, mit Ausnahmen der ToF-Hersteller, die in der Regel Fremdlichtunterdrückungsfaktoren angeben, da bei ToF Fremdlicht schaltungstechnisch unterdrückt werden kann, jedoch obsolet, dies zu ermitteln.

In der Literatur finden sich nur relativ allgemein gehaltene Aussagen. So wird in [72] beschrieben, dass z.B. PMD-Kameras unempfindlich auch gegen extreme Fremdlichtverhältnisse wie Tageslichtbedingungen (Sonnenlicht) sind.

Ausgehend von den beschriebenen Systemen wird hier das Stereokamerasystem aufgrund des Korrespondenzproblems als sehr anfällig gegenüber Schwankungen in der Beleuchtungsstärke benannt. Die aktiv triangulierenden Systeme Lichtschnitt- und Streifenlichtprojektionsverfahren sind unempfindlich gegenüber Fremdlicht, solange dies nicht die Muster der Projektionen überstrahlt oder stört.

Komplexität Ein besonderer Punkt in der hier aufgestellten Bewertungsmatrix ist die Komplexität. Dieser Punkt soll beschreiben, wie komplex der Umgang mit den einzelnen Bildaufnahmesystemen bzw. deren Daten ist. In diesem Punkt müssen unterschiedliche Faktoren betrachtet werden. Diese Faktoren beeinflussen zusammengekommen die Umsetzungs- bzw. Inbetriebnahmedauer eines BVS mit entsprechendem Bildaufnahmesystem.

- Implementierungsverfahren
- Konstruktionsaufwand (Trajektorie, etc.)

- Parametrisierung

Das Implementierungsverfahren beschreibt die Umsetzung in die BV Software: Wie komplex ist der konstruktive Aufwand, um das Bildaufnahmesystem in den Prozess einzubinden. Die Parametrisierung kann die Einstellung einiger Parameter bedeuten oder aber die Konstruktion des Systems aus Einzelkomponenten und Inbetriebnahme zu einem Bildaufnahmesystem. Die Komplexität ist nur schwer zu erfassen, da diese einerseits vom Bildaufnahmesystem und andererseits von innerbetrieblichen Faktoren, wie Qualifikation der Mitarbeiter, abhängig ist.

Die Komplexität beeinflusst die Umsetzungsdauer und sollte daher beispielsweise in zu leistender Arbeitszeit erfasst werden, um die Umsetzungsdauer bei unterschiedlichen Bildaufnahmesystemen vergleichen zu können.

Es wird deutlich, dass die Komplexität sowohl in den Bereich des Bildaufnahmesystems fällt und auch in die Implementierung der Problemlösung mittels Software hineinreicht. Daher wird an dieser Stelle mit der Beschreibung der Bildverarbeitungsstrategie fortgefahren.

Festlegung der BV-Strategie

Das Bildaufnahmesystem bestimmt die Digitalisierung und damit das Datenformat. Aus der Art der Digitalisierung resultiert dann die Strategie zur Extraktion der geforderten Merkmale. Daraus lässt sich schließen, dass nicht bei allen bildgebenden Verfahren mit derselben Strategie vorgegangen werden kann. Die unterschiedlichen Verfahren der Bildaufnahmesysteme bieten bei der Datengewinnung verschiedene Vor- und Nachteile, um Merkmale der Szene mittels Bildanalyse zu extrahieren.

Ausgehend von dem ausgewählten Bildaufnahmesystem kann darauf geschlossen werden, in welcher Form die 3D-Daten vorliegen. Anhand dieser Informationen soll in diesem Schritt nun die Strategie entwickelt werden, wie die nötigen Merkmale zur Lösung des Automatisierungsproblems aus den Daten des Bildaufnahmesystems extrahiert werden können.

Die Erstellung der Lösungsstrategie und Festlegung des groben Ablaufs der Bildverarbeitungssoftware erfordert Fachwissen im Bereich der Methoden der industriellen Bildverarbeitung. Bei dem erforderlichen Fachwissen handelt es sich vor allem um Algorithmen der digitalen Bildverarbeitung, diese reichen von einfachen Segmentieralgorithmen bis hin zu hoch komplexen Filteralgorithmen und Optimierungsverfahren. Dieser Bereich kann am ehesten als Bildanalyse betrachtet werden, also der Analyse und Interpretation von visueller Information (Bilder oder Bildfolgen) und stellt eines der schwierigsten Teilgebiete der Informatik dar, da Methoden der künstlichen Intelligenzen, digitale Bildverarbeitung und Mustererkennung Eingang in diesen Bereich finden.

Hier wird deutlich, dass an dieser Stelle auf Grund des sehr umfassenden Gebiets der anwendbaren Methoden keine klare Vorschrift in diese Richtung gegeben werden kann. Die Methoden, die im System zum Einsatz kommen, hängen schlussendlich vom individuellen Fachwissen der ausführenden Abteilung ab oder aber den Methoden und Algorithmen, die in einer Bildverarbeitungsbibliothek vorhanden und auf die

Problematik anwendbar sind.

Das in diesen Schritt der Projektierung mit eingebrachte Fachwissen sowie die Erfahrungen sind relevant, da der Zusammenhang zwischen zu erwartendem Softwareaufwand und genutztem Verfahren des Bildaufnahmesystems oft schwierig abzuschätzen ist. Es muss bei der Auswahl des Bildaufnahmesystems und Festlegung der Software- bzw. Extraktionsstrategie das wirtschaftliche und produktionstechnisch günstigere Paar gewählt werden.

Das bedeutet, dass in diesem Schritt der Projektierung nicht die Implementierung der BVS-Software erfolgen soll, sondern vielmehr an dieser Stelle festgelegt wird, welche Merkmale der digitalisierten Szene extrahiert werden, um die geforderte Aufgabe zu erfüllen. Anhand dieser funktionalen Anforderungen können die Kernfunktionen abgeleitet werden, die in das BVS implementiert werden müssen. Die Erörterung des Vorgehens zur softwareseitigen Extraktion der Merkmale aus den Daten des Bildaufnahmesystems liefert gleichzeitig eine erste grobe Übersicht dazu, welcher Aufwand für die Programmierung der Kernfunktionalität des BVS nötig sein wird.

Neben der Planung der reinen Bildverarbeitungsfunktionalität werden die Punkte, die zur Erfüllung der geforderten Funktionalität dienen, definiert. In diesen Bereich fallen z.B. Kommunikationsfunktionen, Datenbankanbindung, Dokumentation der Ergebnisse, Erweiterbarkeit, Wartung, Kontrollfunktionen, etc..

Der Schritt Festlegung der BV-Strategie beschreibt also, mit welchen Mitteln die nötigen Informationen zur Lösung des Automatisierungsproblems extrahiert werden können und welche Funktionen darüber hinaus in der Software enthalten sein müssen.

Ausgehend von der generellen Machbarkeit wird anhand des Aufwandes die wirtschaftlichste Strategie ausgewählt. Die in diesem Punkt festgehaltenen Abwägungen zum Aufwand im Bezug auf das Bildaufnahmesystem können dann bei Bedarf in dem Kriterium Komplexität bei der Auswahl eines Bildaufnahmesystems mit erfasst werden. Dies stellt gegebenenfalls Vorteile bestimmter bildgebender Verfahren klar heraus.

Bewertung der Kriterien

Die beschriebenen und analysierten Kriterien können zur Auswahl eines Bildaufnahmesystems zusammengefasst werden. Ausgehend von den genannten Verfahren und deren Vor- und Nachteilen bezogen auf das Automatisierungsproblem und die zu erfassende Szene wird hier eine Bewertungsmatrix aufgestellt, siehe Abbildung 4.9. Die Bewertungsmatrix soll zur Auswahl des infrage kommenden Verfahrens für das Bildaufnahmesystem dienen. Die Bewertungsmatrix stellt eine Methode zum Vergleich unterschiedlicher Kriterien dar. Die hier vorgenommene Bewertung und Ausprägung richtet sich zunächst nach den beschriebenen Merkmalen der Verfahren zur 3D-Bildgebung.

Diese Bewertungsmatrix dient den an der Projektierung beteiligten Parteien zur Übersicht bei der Auswahl des Bildaufnahmesystems bei bekannten Voraussetzungen. Die Voraussetzungen gibt der Produktionsprozess vor, in den das BVS integriert

	Stereo-Verfahren	Laser-triangulation	Streifenlicht-Verfahren	ToF-Verfahren	Anforderungen
laterale Auflösung	+	+	+	-	Geforderte Auflösung
tiefen Auflösung	+	+	+	-	Geforderte Auflösung z.B.: Δz
Messbereich bzw. Messfeld	○	+	○	-	Geforderter Messbereich (mm)
Bildrate/Taktzeit	+	○	○	+	t_{Dig}
Oberflächenrelief	+	-	○	+	
Textur der Szene	-	+	+	+	Beschreibung Textur
Fremdlicht	-	○	-	+	Ausprägung der Schwankungen
Komplexität des Verfahrens	+	○	○	○	Abschätzung der zusätzlichen Zeit

+ positives Verhalten in diesem Bereich ○ neutral
 - negatives Verhalten in diesem Bereich

Abb. 4.9: Beispiel einer Bewertungsmatrix zur Auswahl des Verfahrens des Bildaufnahmesystems

werden soll. Die Beurteilung der Bildaufnahmesysteme, im Hinblick auf ihre Eignung, kann nur in Bezug auf die Aufgabenstellung, die das Automatisierungsproblem beschreibt, getroffen werden. Aus diesem Grund werden in Abbildung 4.9 die Systeme in der Bewertungsmatrix nur grob nach ihren Eigenschaften beschrieben. Eine tabellarische Aufstellung der definierten Merkmale wie diese Bewertungsmatrix wird zur Festlegung des Bildaufnahmesystems genutzt, in Abbildung 4.9 durch die Anforderungsspalte dargestellt. In den Beispielen wird die Anwendung dieses Vorgehens verdeutlicht.

Daraus folgt die Auswahl des Sensors mit dem Messraum (X_S , Y_S und Z_S) sowie der entsprechenden Auflösung. Diese Auswahl wird zunächst auf Bildaufnahmesysteme, die mit den vier in Kapitel 2 ausgewählten Verfahren arbeiten, begrenzt.

Die genauen Daten werden bei der Auswahl des Sensors den Datenblättern entnommen bzw. mit den in den Grundlagen genannten Methoden bestimmt. Dabei werden wie erwähnt Annahmen zur Vereinfachung getroffen, da es gilt, die Methode beherrschbar zu gestalten und die nötige Wissensbasis nicht zu umfangreich zu gestalten. Ausnahmen bilden hier Bildaufnahmesysteme, bei denen auf zusätzliche Methoden zurückgegriffen wird, z.B., wenn die Systeme multimodal genutzt werden. So können beispielsweise unterschiedliche Methoden der Bildverarbeitung zur Gewinnung der Tiefeninformation zusätzlich genutzt werden, wie z.B. Berechnung der Tiefe aus der

Skalierung in einem Intensitätsbild. Dies kann auf der einen Seite einen positiven Effekt auf die sich bietenden Möglichkeiten zur Lösung des Automatisierungsproblems haben, auf der anderen Seite muss wesentlich mehr Wissen vom Entwickler, also gegebenenfalls Softwareaufwand, mit eingebracht werden. Sollen solche Möglichkeiten mit betrachtet werden, dann bietet es sich an, diese mit in den Punkt Komplexität einzubeziehen. So kann der entstehende Aufwand berücksichtigt werden.

Für Genauigkeitsbetrachtungen, die über eine erste Abschätzung hinausreichen, sei hier auf die entsprechende Literatur, wie z.B. [18] verwiesen.

Die statische Analyse ist mit der Erfassung der genannten Parameter und der Festlegung des Bildaufnahmesystems abgeschlossen und die Ergebnisse können zusammengefasst werden. Das nachfolgend dargestellte Klassendiagramm Abbildung 4.10 verdeutlicht, wie mittels UML die Anforderungen und Komponenten modelliert und analysiert werden können. In dem Klassendiagramm werden die Ergebnisse der vorangegangenen Schritte für die Projektierung festgehalten.

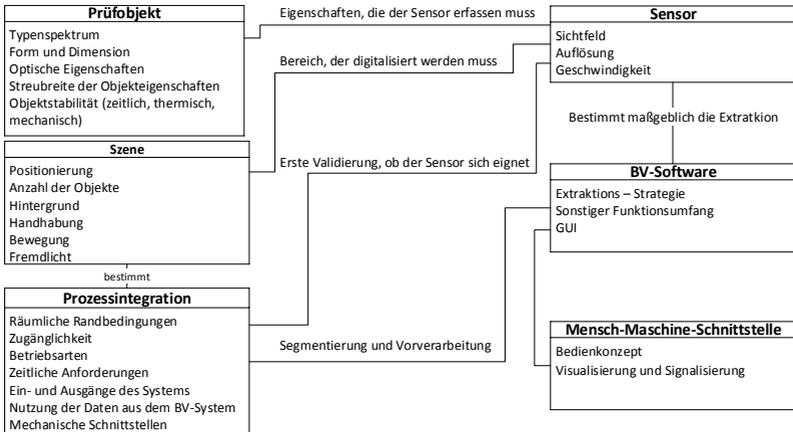


Abb. 4.10: Zusammenfassung der Ergebnisse der 2. Phase als Klassendiagramm

Beispiel statische Analyse

An dieser Stelle wird das Beispiel aus der Anforderungsanalyse aufgegriffen und mit der vorgestellten Methode exemplarisch die statische Analyse durchgeführt, um das System mit den einzelnen Schritten weiter zu definieren. Im ersten Schritt findet die Analyse der Objekteigenschaften statt. Zunächst kann aus den Anforderungen die Beschaffenheit der Szene abgeleitet werden.

Sichtfeld bzw. Messraum In den Anforderungen wurde festgelegt, dass die Bereitstellung der Bauteile nicht verändert wird. Das bedeutet, die Bauteile müssen innerhalb des KLT erfasst werden, daraus ergibt sich die Szenengröße gleich KLT-Größe. Die Abmessungen eines KLT ergeben sich aus der Empfehlungen 4500 des Verbands der Automobilindustrie (VDA), welche das KLT-System zur Optimierung der logistischen Kette in der Automobilhersteller- und Zuliefererindustrie beschreibt. Es wird hier davon ausgegangen, dass ein RL-KLT 4147 mit einem Nennmaß von $400 \times 300 \times 147\text{mm}$ verwendet wird.

Nachdem die Szenengröße festgelegt worden ist, müssen nun die Eigenschaften des Bauteils näher betrachtet werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Bauteile einen sehr guten Kontrast bilden und eine gewisse Textur vorhanden ist. Die Bauteile haben eine Abmessung von $85 \times 55 \times 20\text{mm}$. Aus den Anforderungen wird auch klar, dass es sich lediglich um einen Objekttypen handelt. Die Bauteile sind opak und weisen keine Licht streuende oder stark reflektierende bzw. spiegelnde Flächen auf. Daraus ergeben sich die in Abbildung 4.11 dargestellten Parameter für das BVS. Diese Klassen

Bauteil	Szene
1 Bauteiltyp 85x55x20 mm opak, keine Besonderheiten	400x300x147mm Bauteile geschüttet Keine Bewegung oder Vibration Kein Fremdlicht

Abb. 4.11: Objekteigenschaften und Szene als Klassen

bilden in gewisser Weise die Eingangsgrößen, um ein geeignetes Bildaufnahmesystem auszuwählen und auf seine Eignung hin zu prüfen.

Laterale Genauigkeit Die Beschreibung der Szene und Aufgabenstellung, sichere Extraktion der Position des Objektes mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5\text{mm}$, lassen auf die mindestens nötige laterale Auflösung für die Digitalisierung schließen. Diese ergibt sich aus Formel 4.1, wobei mit den folgenden Werten gearbeitet wird: $p_{an} = 3$ ausgewählt nach den entsprechenden Richtwerten, $Szene = 400\text{mm}$ für die weiteste Ausdehnung der Szene und $I_{Faktor} = 0,6$, die benötigte *Genauigkeit* wird auf $\pm 0,5\text{mm}$ festgelegt.

$$\frac{(3 \times 0,6 \times 400\text{mm})}{0,5\text{mm}} = 1440 \quad (4.2)$$

Die errechnete laterale Auflösung kann von allen Systemen erreicht werden, bis auf die gängigen ToF-Kameras, die in Frage kommen. Bei diesen müsste die Szene gegebenenfalls in mehrere Abschnitte geteilt und in mehreren Aufnahmen digitalisiert

werden, dies erscheint aufgrund der geforderten Taktzeit und dem entstehenden Aufwand, steigende Komplexität, als nicht praktikabel, in Abbildung 4.12 wird dies mit 1. gekennzeichnet.

Tiefengenauigkeit Die Tiefenauflösung, respektive Genauigkeit der Z-Koordinate für das sichere Greifen und weitere Handling im Prozess, wurde aufgrund des Endeffektors, der über einen flexiblen Sauger und entsprechende Mechanik das Bauteil zentriert aufnimmt, auf $\pm 1mm$ angepasst. Die Genauigkeit kann nicht von den gebräuchlichen PMD-Kameras gewährleistet werden.

Bildrate/Taktzeit Ein Punkt, der nicht eindeutig aus den bisherigen Anforderungen hervorgeht, ist die Taktzeit. Aufgrund der Ausgangssituation und der vom Prozess vorgegebenen Gesamtaktzeit ergibt sich eine Taktzeit für das BVS, also Digitalisierung, Auswertung und Übergabe der Koordinaten, für eine Szene von $t_{BVS} = 2s$. Die Digitalisierungsdauer wurde ausgehend von $t_{BVS} = 2s$ auf $t_{Dig} = 1,5s$ begrenzt, siehe Abbildung 4.12 Punkt 2. Die relativ geringe Zeit t_{Dig} schließt scannende oder sich bewegende bildgebende Systeme, wie z.B. Lichtschnittverfahren, aus. Die Bahnbewegung des Sensors über die Szene würde die Digitalisierung verlangsamen und konstruktiven Aufwand bedeuten. Ein Bildaufnahmesystem mit Streifenlichtprojektion erscheint aufgrund der Projektionsdauer ungeeignet, Systeme, die im angegebenen Zeitintervall arbeiten können, sind dann aber eher ungenau, verfügen also über keine Funktionsreserven.

Oberflächenrelief Es ist kein starkes Oberflächenrelief vorhanden. Aufgrund der niedrigen Höhe der Bauteile und der Bereitstellung in den KLTs ergibt sich nur eine schwache bis mittlere Reliefausprägung durch die Ordnung der Bauteile im KLT. Das Oberflächenrelief stellt für kein Bildaufnahmesystem eine Schwierigkeit dar.

Textur Die Bauteile sind opak und ergeben durch ihre Anordnung eine Textur. In Abbildung 4.12 mit 3. gekennzeichnet, da die Textur Bauteilform eine Extraktion der Position mit Verfahren der Mustererkennung, Kontur des Bauteils, ermöglicht. Dieses Verfahren bringt den Vorteil mit sich, dass über die Mittelung des Flächenschwerpunktes die Genauigkeit verbessert werden kann.

Fremdlicht Es liegen definierte Lichtverhältnisse vor.

Komplexität An dieser Stelle liegen keine Besonderheiten vor außer die bereits beschriebene Aufteilung der Szene, siehe laterale Genauigkeit und Abbildung 4.12 1. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Umsetzungsdauer durch kein Verfahren negativ beeinflusst wird.

Bewertung der Kriterien

In Abbildung 4.12 werden die gemachten bisher festgestellten Angaben gegenübergestellt, um ein Bildaufnahmesystem auszuwählen. Ausgehend von der günstigen Be-

	Stereo-Verfahren	Laser-triangulation	Streifenlicht-Verfahren	ToF-Verfahren	Anforderungen
laterale Auflösung	+	+	+	1. —	1440 Bildpunkte
tiefen Auflösung	+	+	+	—	±1mm
Messbereich bzw. Messfeld	+	+	+	+	X=400mm Y=300mm Z=150mm
Bildrate/Taktzeit	+	—	—	+	$t_{Dg} = 1,5s$ 2.
Oberflächenrelief	○	○	○	○	Schwache bis mittlere Reliefausprägung
Textur der Szene	3.	○	○	○	Ergibt sich aus Form der Bauteile
Fremdlicht	○	○	○	○	Definierte Lichtverhältnisse
Komplexität des Verfahrens				1.	-

+ positives Verhalten in diesem Bereich ○ neutral
 - negatives Verhalten in diesem Bereich

Abb. 4.12: Bewertung der Bildaufnahmesysteme und Anforderungen für die Beispielapplikation

wertung des Stereoverfahrens in Abbildung 4.12 und da dies auch aus wirtschaftlicher/produktionstechnischer Sicht geeignet ist, wird ein solches als Bildaufnahmesystem ausgewählt. Ausgehend von der lateralen *Auflösung* von mindestens 1440px für die Kameras des Stereokamerasystems werden Kameras mit einer Auflösung von $2048 \times 1536px$ ausgewählt. Hierzu muss zunächst noch die erreichbare Genauigkeit für die Tiefeninformation geprüft werden. In der Beschreibung der Stereoaufnahme wird in Formel 2.18 der Fehler der Entfernung bestimmt. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass dieser stark vereinfachte Zusammenhang für eine grobe Eignungsprüfung ausreichend ist, wenn mit einer gewissen Sicherheit gerechnet wird.

Bei der Berechnung der Disparität wird wie im Grundlagenkapitel als realistischer Wert laut [27] $\Delta d = 0,5px$ gewählt. Für das hier angenommene System wird b der Basisabstand der beiden Kameras zueinander mit $b = 140mm$ angenommen, f die Brennweite in Pixeln, die sich aus Sensorgröße, Objektiv und der bestimmten lateralen Auflösung ableitet, entspricht $f = 3750px$. z_c ist der Tiefenwert, die Entfernung des Bildpunktes zum Kamerasystem. Für die Berechnung wird die weiteste Entfernung angenommen, die das Kamerasystem zur detektierenden Einbringposition haben

kann, also $z_c = 900\text{mm}$.

$$\Delta z_c = \Delta d \frac{z_c^2}{bf} = \frac{(900\text{mm})^2}{140\text{mm} \cdot 3750px} 0,5px = 0,771\text{mm} \quad (4.3)$$

Es ergibt sich also ein möglicher Fehler von $\Delta z_c = 0,771\text{mm}$. Hier handelt es sich um eine Vereinfachung, da bei der angenommenen lateralen Auflösung die Beugungsbegrenzung und Schärfentiefe vernachlässigt wird. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass dies ein Grenzfall ist, der für die Abschätzung der Grundparameter des zu implementierenden Systems geeignet ist und nicht allgemeingültig verwendet werden sollte.

Diese Abschätzung verdeutlicht, dass ein so bestimmtes Bildaufnahmesystem dazu geeignet ist, die Merkmale mit der nötigen Genauigkeit zu extrahieren, um Automatisierungsaufgaben zu lösen.

Aus diesem Zusammenhang und der laut Anforderung relativ rudimentär gehaltenen Prozesskommunikation ergeben sich zusammengefasst die in Abbildung 4.13 dargestellten Klassen. Auf eine genaue Beschreibung der BV-Strategie soll für das hier dar-

BV-Software	Stereosystem
Extraktion der Bauteilposition	Kameraanzahl: 2
Hand-Eye Kalibrierung	Kameraauflösung: 2048x1536px
Handshake Prozess()	Sensorgroße: 6,554mmx4,915mm
Übergabe Position an Roboter()	Objektiv: 12mm
	Basisabstand: 140mm
	Arbeitsabstand: 700mm

Abb. 4.13: Objekteigenschaften und Szene als Klassen

gestellte exemplarische Vorgehen verzichtet werden. Es wird angenommen, dass die Bauteile mittels Konturerkennung im rechten und linken Kamerabild lokalisiert werden, woraus sich relativ einfach die Position im Kamerakoordinatensystem bestimmen lässt. Außerdem ist die korrekte Definition eines gemeinsamen Koordinatensystems mittels Hand-Auge-Kalibrierung von Roboter und Bildaufnahmesystem erforderlich. An dieser Stelle wird deutlich, dass das vorgestellte Vorgehen nicht streng sequentiell stattfinden muss, da die einzelnen Kriterien teilweise in Wechselwirkung stehen oder aber auch bestimmte Verfahren im Vorfeld ausgeschlossen werden können. Es bietet sich jedoch trotzdem an, deren Eigenschaften mit zu betrachten, da so die Wissensbasis für spätere Projekte erhöht werden kann.

Das vorgestellte Verfahren zur Auswahl des Bildaufnahmesystems erhebt nicht den Anspruch auf Exklusivität, es soll lediglich ein methodisches Vorgehen für die Projektierung und produktionstechnisch sinnvolle Auslegung eines BVS darstellen.

4.2.3 Dynamische Analyse

Ausgehend von den in der statischen Analyse erfassten Daten und möglichen Ansätzen zur Lösung des Automatisierungsproblems wird in der dynamischen Analyse der Gesamtzusammenhang betrachtet, also wie sich das zu entwerfende BVS in der Produktionsumgebung verhält. Es muss einerseits das Verhalten des BVS und andererseits das Verhalten des Prozesses betrachtet und modelliert werden. Das führt zur Verhaltensmodellierung des BVS im Produktionsprozess und den sich daraus ergebenden Randbedingungen.

Die dynamische Analyse wird genutzt, um das funktionale Verhalten des BVS zu beschreiben. Das bedeutet, es müssen Informationen über den Ablauf, die Kommunikation und den Funktionsablauf der Komponenten im Produktionsprozess gesammelt werden. Es findet also eine Analyse von funktionalen Anforderungen statt, die das BVS erfüllen muss; es wird von der reinen Machbarkeit abgesehen und die Realisierbarkeit im entsprechenden Produktionsprozess betrachtet.

Das bedeutet, es können mittels Methoden der dynamischen Modellierung, z.B. Szenarien, Anwendungsfälle und Interaktionen analysiert werden. Durch die Analyse von Interaktionen können Wechselwirkungen dargestellt werden, die zwischen Objekten stattfinden, die an einem Anwendungsfall teilnehmen. Die dynamische Analyse wird genutzt, um das Verhalten des BVS zu formalisieren und die Kommunikation zwischen teilnehmenden Objekten des BVS und dem Gesamtprozess zu verdeutlichen.

Integration des BVS in die Prozessumgebung

Der erste Schritt der dynamischen Analyse besteht aus der Untersuchung des Produktionsprozesses und der Integrationsmöglichkeiten des zu entwickelnden BVS mit dem zuvor ausgewählten Bildaufnahmesystem in diese Prozessumgebung. Es können zwei Grundsituationen unterschieden werden: Einmal die vollständige Neuentwicklung einer Produktionsanlage mit BVS und die nachträgliche Integration in eine bestehende Produktionsanlage.

Bei der vollständigen Neuentwicklung einer Produktionsanlage können die Restriktionen von BVS und Anlage sehr gut aneinander angepasst werden. Hier gilt es, Anforderungen des Produktionsprozesses zu beachten. Die Besonderheiten oder Anforderungen, die sich für das BVS ergeben, können durch eine Untersuchung der Prozessschritte und Funktionseinheiten, die dem BVS im Prozess vor- bzw. nachgelagert sind, erfasst werden.

Die Restriktionen ergeben sich aus diversen Ursachen und haben unterschiedliche Auswirkungen auf den Prozess. Eine Aufstellung aller Möglichkeiten ist nicht möglich, es wird daher auf die Beispiele in Kapitel 5 verwiesen. Bei der Grundsituation, dass das BVS in einen bestehenden Produktionsprozess eingebracht wird, können kaum Anpassungen an der Anlage vorgenommen werden, sondern es muss vielmehr das BVS inklusive aller Komponenten an die Anlage angepasst werden.

Im Rahmen dieses Schrittes wird zunächst analysiert, ob das ausgewählte Bildaufnahmesystem in den Prozess physikalisch-mechanisch integrierbar ist. Zwecks dieser

Analyse kann eine Simulation der kinematischen Abläufe mit allen bestehenden und neu hinzuzufügenden Komponenten der Anlage geschaffen werden. Eine solche Simulation bietet im Vorfeld die Möglichkeit, kinematische Abläufe zu erfassen und das BVS optimal in die Anlage zu integrieren.

Eine detaillierte Beschreibung von Möglichkeiten der Simulation sind [73] zu entnehmen. Außerdem wird in der Simulation der Umfang des mechanischen Aufwands deutlich.

Rein formal bietet UML Sequenzdiagramme oder das Kommunikationsdiagramm an, um zu beschreiben, welche Objekte am Geschehen beteiligt sind, welche Informationen diese austauschen und in welcher zeitlichen Reihenfolge der Informationsaustausch stattfindet. Für die Modellierung des BVS in der Projektierung wird im Folgenden und in der vorgestellten Methode das Kommunikationsdiagramm genutzt. Mit diesem werden Interaktionen von BVS und Prozess ergänzend zur Simulation dargestellt. Das Kommunikationsdiagramm bietet gegenüber dem Sequenzdiagramm den Vorteil, dass beim Erstellen zunächst keine Ausführungsreihenfolge festgelegt werden muss. Kommunikationsdiagramme bieten darüber hinaus den Vorteil, dass sie einfacher zu verstehen sind als Sequenzdiagramme und mit ihrer Hilfe spezielle Ablaufsituationen einfach erklärt und diskutiert werden können.

Sind die Bildverarbeitungssysteme sehr einfach gestaltet, kann es auch ausreichend sein, im entsprechenden Klassendiagramm die erforderlichen Schnittstellen zu definieren bzw. darzustellen. Zusammengefasst ergeben sich aus diesem Schritt die Restriktionen des Prozesses für das BVS.

An dieser Stelle soll das Beispiel der Robot-Vision Anwendung weitergeführt werden. Ausgehend von der beschriebenen Aufgabenstellung und Ausgangssituation ergibt sich für die mechanische Adaption der Lösung der im Folgenden beschriebene Aufbau. Der Roboter nimmt die Position des Produktionshelfers ein, die Bereitstellungsposition sowie die Ablageposition bleiben erhalten.

Der Ablauf der Handhabungsaufgabe impliziert, dass die Digitalisierung der Szene und die Ermittlung der Position des nächsten zu greifenden Bauteils unmittelbar vor dem Greifvorgang erfolgen muss. Für die Integration in die Anlage bietet es sich an, das Bildaufnahmesystem über der Szene zu platzieren, sodass die Digitalisierung und Auswertung erfolgen kann, während der Roboter ein Bauteil in einem Nest des Rundschalttisches ablegt. Für die Analyse der Interaktion der beteiligten Objekte, Roboter, BVS und Prozesssteuerung wurde das nachfolgende Kommunikationsdiagramm, Abbildung 4.14, erstellt. Es wird deutlich, dass die einzelnen Interaktionen im Rahmen des Kommunikationsdiagramms übersichtlich dargestellt werden können und eine Analyse des Interaktionsverhaltens bzw. der nötigen Kommunikation zwischen den Objekten BVS und der Prozessperipherie gut möglich ist. Die Analyse ermöglicht eine Anpassung der Objekte, sodass diese sich optimal in den Gesamtprozess eingliedern lassen bzw. die erforderlichen Komponenten für den Entwurf festgelegt werden können.

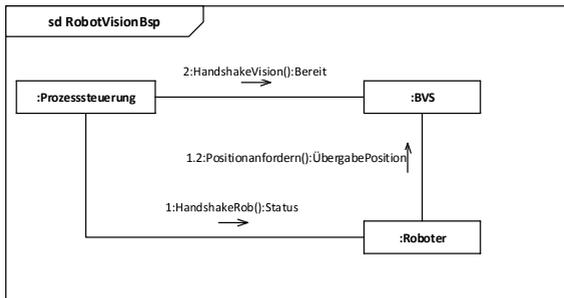


Abb. 4.14: Kommunikationsdiagramm zeigt vereinfacht die Kommunikation und Interaktion der Kommunikationspartner

Definition Verhalten des Objektes in der Prozessumgebung

Bei der Definition des Verhaltens des Objektes in der Prozessumgebung wird der Digitalisierungs- und Auswertungsablauf genauer betrachtet.

Daraus lassen sich die Restriktionen ableiten, die der Prozess erfüllen muss, um die korrekte Funktionalität des BVS zu gewährleisten. Es erfolgt eine Analyse des Digitalisierungsablaufs und der Wirkung der Prozessumwelt auf diesen. Wird das BVS in einen bestehenden Prozess integriert, gibt es kaum die Möglichkeit, Restriktionen des BVS für den Prozess umzusetzen.

Das bedeutet, es muss untersucht werden, welche Zustände der Prozess mit Bildverarbeitung annimmt bzw. in welchem Zustand es möglich ist, die Bildverarbeitung auszuführen. Dazu werden in UML Zustandsdiagramme genutzt. Zustandsdiagramme sind Diagramme zur Spezifikation des Verhaltens von Elementen. Das Zustandsdiagramm beschreibt das Verhalten der Elemente des Prozesses und des BVS während ihres Lebenszyklusses, also eines Prozesszyklusses, durch Darstellung der möglichen Zustände und Zustandsübergänge.

In Abbildung 4.15 wird das Verhalten eines BVS und seiner Elemente in Abhängigkeit vom Prozess dargestellt. Diese allgemeine Darstellung der Zustände wird im folgenden auf das bekannte Beispiel übertragen. Dafür wird zunächst festgelegt, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, um eine Digitalisierung zu starten. Ausgehend von dem Zustandsdiagramm wird, nachdem der Prozess die Bereitschaft hergestellt hat, die Ausführung der Bildverarbeitung verlangt. Zu dieser gehört sowohl die Bildaufnahme als auch die Auswertung. Der Zustand „Szene vorbereitend“ kann beispielsweise die Punkte enthalten, dass der Roboter aus dem Bereich des Bildaufnahmesystems bewegt und geprüft wird, ob sich ein KLT im Bereich der Szene befindet. Ist der Zustand „Szene bereit“ erreicht, kann mit der Ausführung der Bildverarbeitung, also

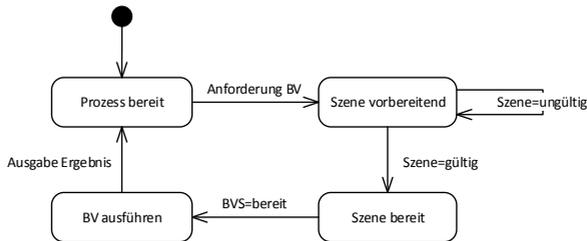


Abb. 4.15: Zustandsdiagramm zeigt verallgemeinert den typischen Durchlauf unterschiedlicher Zustände eines BVS, das an einen Produktionsprozess angebunden ist

Digitalisierung plus Auswertung, begonnen werden.

Das dargestellte Diagramm bezieht sich zunächst nur auf die Zustände des BVS und der Bereitschaftsmeldung von Roboter und Prozessteuerung, die in Form des Zustands „Prozess bereit“ gegeben wird. Bei komplexeren Systemen werden Zustände anderer Systeme, die am Prozess beteiligt sind, mit aufgenommen und dargestellt.

Ablauf der Digitalisierung

Ausgehend von den zuvor festgestellten Restriktionen wird das Verhalten und die Interaktionen der Bildverarbeitung analysiert. Das bedeutet, es wird die Funktionseinheit BVS definiert und ihr Verhalten im Produktionsprozess sowie deren Ablauf. Dazu müssen die folgenden Punkte bestimmt werden:

- Schnittstellendefinition
- Bestimmung Kommunikationsablauf
- Ablauf des BVS

Die Schnittstellendefinition ergibt sich aus den vorangegangenen Schritten der Projektierung. Die Schnittstellen des BVS sind in der statischen Analyse, also im Klassendiagramm das erste Mal festgehalten und definiert worden. Unter dem Punkt „Integration des BVS in die Prozessumgebung“ ist eine Aufstellung und Analyse der Interaktion bzw. Kommunikation der Objekte durchgeführt worden, sodass der elementare Kommunikationsablauf bestimmt worden ist. An dieser Stelle sind alle Komponenten und Objekte definiert, die für das BVS und dessen Integration nötig sind.

Die Definition des Ablaufs der Digitalisierung umfasst neben der Bilderfassung auch

die Auswertung der gewonnenen Daten, also den Ablauf der gesamten Bildverarbeitungskette im BVS. Die Bilderfassung mittels des ausgewählten Bildaufnahmesystems stellt den ersten Schritt der Bildverarbeitung dar. Die Vorverarbeitung ist Teil der Komponente Bildverarbeitungssoftware und beinhaltet Verarbeitungsschritte zur Bildverbesserung, wie z.B. Rauschfilterung und Kontrastanhebung. Laut [18] ist das wesentliche Ziel der Vorverarbeitung, visuell aufschlussreichere Bilder und eine Vereinfachung der nachfolgenden Signalverarbeitung zu generieren.

Segmentierung bezeichnet den Arbeitsschritt, bei dem relevante Bildinhalte hervorgehoben werden, z.B. kann die Trennung des Prüfobjekts vom Hintergrund erforderlich sein. Ausgehend von der Segmentierung erfolgt die Merkmalsextraktion. Der letzte Verarbeitungsschritt ist die Klassifikation und/oder Entscheidung.

Hierbei wird deutlich, dass in diesem Schritt im Wesentlichen der Softwareablauf der Komponenten BV-Software und Kommunikation modelliert und analysiert werden.

Zur Modellierung von Abläufen und deren Steuerung werden Aktivitätsdiagramme benutzt. In Aktivitätsdiagrammen können die einzelnen Verfahrensschritte der Bildverarbeitung, siehe Abbildung 4.16, dargestellt werden. Das bedeutet, es wird das Verhalten des BVS festgehalten. Überträgt man das Beispiel aus Abbildung 4.16 auf

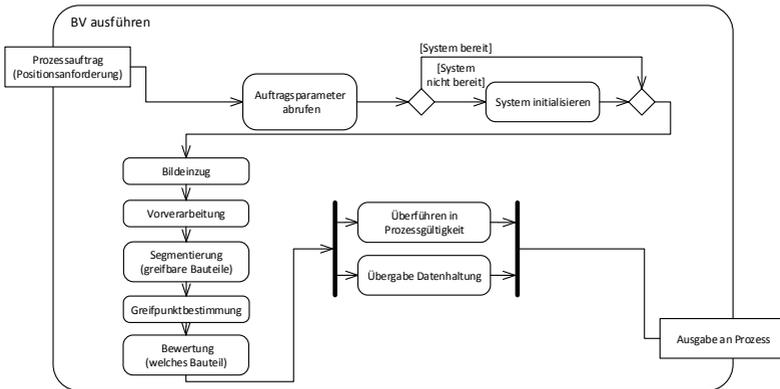


Abb. 4.16: Aktivitätsdiagramm mit beispielhaftem Ablauf der Bildverarbeitung ausgelöst vom Prozess

die Robot-Vision Anwendung, würde sich der Ablauf wie folgt beschreiben lassen: Der Prozess/Roboter veranlasst das BVS dazu, mit der Ausführung des Ablaufs zu beginnen. Die Bedingungen, die zu diesem Schritt führen, ergeben sich aus den Zuständen, die das System einnehmen kann, wie in Definition des Verhaltens zuvor beschrieben. Nach dem Start werden die benötigten Parameter von den beteiligten Partnern abge-

rufen. Außerdem erfolgt eine kurze Prüfung, ob das Bildaufnahmesystem verfügbar ist. Anschließend wird die Bildaufnahme gestartet; bei dem beschriebenen Stereokamerasystem bedeutet dies die synchrone Aufnahme der Szene mit beiden Kameras. Im Rahmen dieses Beispiels bedeutet die Vorverarbeitung, dass beispielsweise Bildrauschen entfernt wird und das Bild für die eigentliche BV vorbereitet wird. Bei der Segmentierung werden dann beispielsweise alle greifbaren Bauteile ermittelt; woraufhin das beste zu greifende Bauteil bestimmt wird, um dessen Koordinaten zu extrahieren. Unter der Überführung der Prozessdaten kann an dieser Stelle verstanden werden, dass die Koordinaten in ein geeignetes Roboter-Kamera-Koordinatensystem transformiert und in ein für die Kommunikation taugliches Format überführt werden. Eine Übertragung in die Datenhaltung ist bei der gestellten Automatisierungsaufgabe nicht nötig. Diese käme z.B. bei einer Aufgabe, die der Qualitätssicherung (Erfassung und Dokumentation von Merkmalen) dienen würde, zum Tragen. Die Ausführung endet mit der Übergabe der Koordinaten an den Prozess/Roboter. Bei diesem exemplarischen Vorgehen wird nicht detailliert auf die BV-Strategie eingegangen. Bei einer Detailplanung sollte die BV-Strategie an dieser Stelle mit aufgegriffen und mit in das Aktivitätsdiagramm aufgenommen werden. Dadurch können eventuell bisher nicht aufgefallene Abhängigkeiten sichtbar gemacht bzw. das BVS weiter optimiert werden. In den im folgenden Kapitel beschriebenen Beispielprojekten wird dieses Vorgehen detaillierter dargestellt.

4.2.4 Entwurf des Systems

Ausgehend von den in der Analyse erstellten Modellen wird in der letzten Phase der Projektierung ein Systementwurf erstellt. Wenn die Hardwarekomponenten und der konstruktive Teil der Projektierung abgeschlossen sind, kann die Softwarearchitektur beschrieben werden. Ausgehend von dem Entwurf kann mit der technischen Umsetzung begonnen werden, da der Entwurf als Vorlage für die Implementierung dient. Es wird deutlich, dass die vorgeschlagene Methodik nicht streng sequentiell abläuft, sondern eine Iteration und Rückkopplung voraussetzt.

Der Entwurf ergibt sich individuell und unterscheidet sich von System zu System sehr stark.

Aus den vorangegangenen vorgestellten Phasen und den gewonnenen Analyseergebnissen werden die Bestandteile und das abstrakte Systemverhalten des BVS abgeleitet.

Das in der statischen Analyse erstellte und in der dynamischen Analyse erweiterte Klassendiagramm kann wie eine Stückliste betrachtet werden und dient als Gesamtübersicht über das Projekt. Es dient allen Gewerken als Orientierung und führt sie zusammen, da sowohl mechanische Kenndaten, z.B. Kameraabstand, Sichtfeld, etc. als auch Softwarebestandteile, z.B. Funktionen und Schnittstellen, aufgeführt werden. Die in der dynamischen Analyse gewonnenen Ergebnisse geben Aufschluss über den Ablauf und das Interaktionsverhalten des Systems. So kann aus einem detaillierten Kommunikationsdiagramm zum einen der Entwurf der Funktionen für die Kommunikation der Software erstellt werden, zum anderen auch ein für das BVS sinnvolles

Bussystem bzw. die Anbindung an ein der geforderten Funktionalität entsprechendes Bussystem ausgewählt werden.

Die Darstellungen aus unterschiedlichen Sichten auf das Gesamtsystem, wie der Ablauf des Prozesses im Produktionssystem, von der Vorbereitung des Prozesses und der Peripherie oder die Definition des Verhaltens des Objektes bzw. der Szene bei der Digitalisierung, hilft bei der sinnvollen Gestaltung des Anlagenlayouts.

Ausgehend von den Sichten ergibt sich die Möglichkeit, die Bestandteile des Systems in entsprechende Arbeitspakete für die jeweiligen Gewerke aufzuteilen. Eine Zusammenfassung der einzelnen Phasen führt zu einem Entwurf des Systems und hilft bei der Erstellung des Projektplans, da sowohl die Bestandteile aufgeführt werden als auch Abläufe und Abhängigkeiten ersichtlich sind.

Für das in diesem Kapitel verwendete Beispiel ergibt sich der Entwurf, der sich aus den im Folgenden dargestellten Diagrammen zusammensetzt. In Abbildung 4.17 werden die im Rahmen der Analyse betrachteten Objekte des BVS mit ihren Eigenschaften und Schnittstellen dargestellt. Daraus wird deutlich, welche Komponenten für

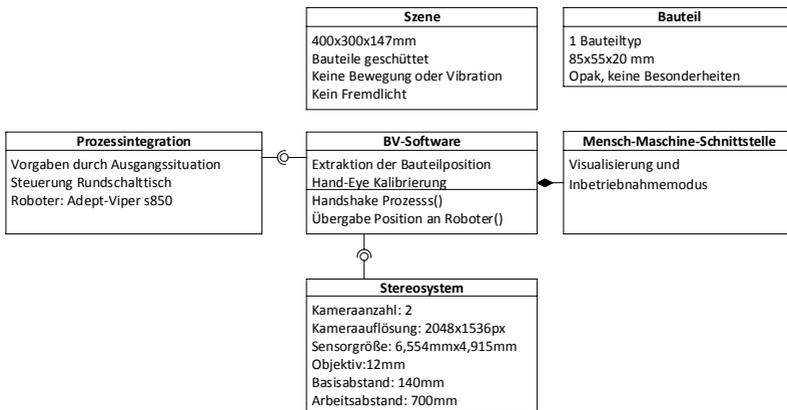


Abb. 4.17: Klassendiagramm exemplarisch für Robot-Vision Anwendung

das System nötig sind und worin ihre Abhängigkeit besteht. Die so erzielte Auflistung gibt Auskunft über nötige Beschaffung von Ressourcen für das Projekt und das weitere Vorgehen in der Entwicklung.

Ausgehend von den definierten Objekten und dem in der dynamischen Analyse definierten Ablauf kann ein Anlagenlayout (Abbildung 4.18) erzeugt und mit der Planung der benötigten Software begonnen werden.

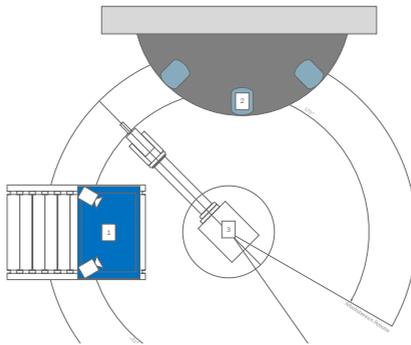


Abb. 4.18: Anlagenlayout exemplarisch für die Planung der Robot-Vision Anwendung 1.) Abholposition mit KLT und darüber positioniertem Stereokamerasystem 2.) Ablageposition im Nest des Rundschalttisches 3.) Sechssachsroboter

Kapitel 5

Bildverarbeitungsszenarien

In diesem Kapitel wird anhand von Beispielapplikationen die Methode zur Projektierung von BVS in der Produktionstechnik beschrieben. Die beschriebenen Projekte wurden realisiert und in Betrieb genommen.

Es werden drei unterschiedlich komplexe Projekte vorgestellt. Es wird sowohl der Fall beschrieben, dass das BVS in eine bereits bestehende Anlage integriert werden musste, als auch die Implementierung des BVS im Rahmen der Neuentwicklung einer Produktionsanlage bzw. eines Anlagenteils.

5.1 Bahnschwellenvermessung

Das erste hier vorgestellte System ist ein BVS zur Vermessung von Spannbetonfertigteilen, das eine Vollprüfung im Produktionsprozess ermöglicht. Im Spannbeton-Fertigteilbau ist die Maßhaltigkeit bei der Produktion und dem Einbau der Fertigteile von grundlegender Bedeutung. Die Beschaffenheit der Fertigteile erlauben kaum nachträgliche Korrekturen und, dort wo sie erfolgen müssen, sind sie mit hohen Kosten verbunden. Daher sind vermessungstechnische Leistungen während des Produktionsprozesses unerlässlich. Mit steigenden Anforderungen an die Einhaltung geringer Maßtoleranzen steigt der Vermessungsaufwand jedoch erheblich, da es z.B. vermehrt zur Forderung nach einer Vollprüfung in der Produktion kommt.

In dem vorgestellten Projekt wird eine Vollprüfung von Bahnschwellen aus Spannbeton realisiert. Eine bestehende Produktionsanlage wird durch dieses System erweitert. Das bedeutet, es muss zunächst ein geeigneter Platz im Ablauf des Produktionsprozesses gefunden werden, an dem die Möglichkeit der Integration besteht.

Der Produktionsablauf gliedert sich in mehrere Arbeitsschritte. Zu Beginn wird die Bewehrung in die Schalung eingelegt, woran sich das Befüllen der Schalung mit Beton anschließt. Danach werden Lufteinschlüsse aus den Schalungen mittels Vibration entfernt. Nach einer Setzzeit wird das Bauteil entschalt und es erfolgt die manuelle Nacharbeit. Anschließend werden die Bauteile in den Trockenprozess überführt. Das bedeutet, es werden die Arbeitsschritte wie folgt abgearbeitet:

- Einlegen der Bewehrung in die Schalung
- Befüllen der Schalung

- Vibration der befüllten Schalung
- Entschalen der Bauteile
- Transfer zur manuellen Bearbeitung
- manuelle Nacharbeit
- Transfer in den Trockenprozess
- Trocknung

Eine Besonderheit des Systems, das hier projiziert wird, ist, dass dieses BVS nachträglich in einen bestehenden Prozess integriert worden ist und daher der Prozess die wesentlichen Randbedingungen vorgab.

5.1.1 Phase 1: Anforderungsanalyse

Im Folgenden werden die Anforderungen, wie im Punkt Anforderungsanalyse 4.2.1 beschrieben, aufgeführt. Die genannten Anforderungen entsprechen zunächst der Systembeschreibung aus Kundensicht, aus denen die Anforderungen für das BVS und seine Funktionen abgeleitet werden.

Prüfobjekt

Bei dem Prüfobjekt handelt es sich um ein Bauteil aus Spannbeton im nassen Zustand, das als Bahnschwelle genutzt wird. In der folgenden Abbildung 5.1 ist das Objekt, eine Bahnschwelle aus Spannbeton, dargestellt. Es müssen zwei unterschiedliche Typen geprüft werden, die sich jedoch lediglich in der Länge des A-Maßes, siehe Abbildung 5.2, unterscheiden.



Abb. 5.1: Prüfobjekt der ersten Beispielapplikation, Bahnschwelle aus Spannbeton

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung aus Kundensicht definiert sich wie folgt: „Automatische Erfassung der relevanten Maße im laufenden Produktionsprozess bei jeder produzierten Einheit.“

Die zu erfassenden Maße des Objektes sind in den folgenden Abbildung 5.2 dargestellt: Einmal der Abstand der äußeren Flanken der beiden Auflager, als B-Maß bezeichnet, und der Abstand der Flanken eines Auflagers, als A-Maß bezeichnet. Vor

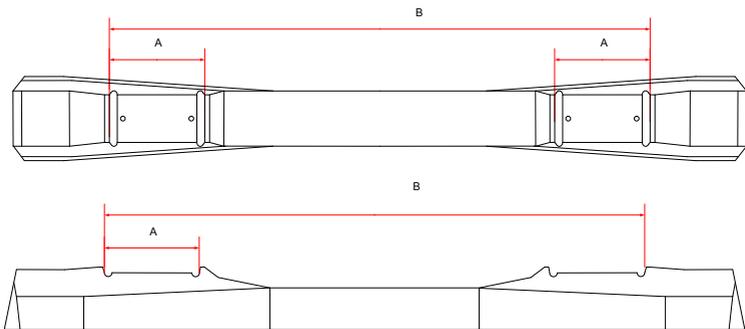


Abb. 5.2: Objekt und zu ermittelnde Maße, A ist das Maß eines Auflagers von Flanke zu Flanke, B ist das Maß zwischen den beiden äußeren Flanken der Auflager

der Umsetzung des Projektes erfolgte die Erfassung der Maße manuell mit einem Messwerkzeug, einer sogenannten „Lehre“, dabei gibt es ein Messwerkzeug für das A-Maß und ein separates für das B-Maß. Für die Messung wird das Messwerkzeug auf das Auflager gelegt und die Flanken des Auflagers angetastet, das Messwerkzeug basiert auf dem Prinzip des Messschiebers und arbeitet taktil.

Die „Lehre“ wird auf dem Auflager positioniert, anschließend werden die Backen der Lehre, in Abbildung 5.3 mit b gekennzeichnet, gegen die Flanken des Auflagers geschoben, an einer Messuhr kann das entsprechende Maß abgelesen werden. Es wird nicht die gesamte Flankenbreite in die Messung miteinbezogen, da die Backen nur ca. 10 mm breit sind. Das Messwerkzeug liegt an nur vier Punkten der Auflagerfläche auf. In Abbildung 5.3 werden die Punkte, an denen die Lehre aufliegt, als a bezeichnet. Die Linie in der Mitte bezeichnet die Achse, an der mittels der „Lehre“ das A-Maß erfasst wird. Die Messung des B-Maßes erfolgt äquivalent, wobei hier jedoch die „Lehre“ auf beide Auflager gelegt wird, um die Länge des B-Maßes zu erfassen.

Diese taktile Messung kann nur an bereits getrockneten Objekten vorgenommen werden, was eine Nacharbeit ausschließt. Außerdem kann bei einem derartigen Aufwand mit zwei unterschiedlichen manuellen Messmitteln nur eine Stichprobenkontrolle durchgeführt werden.

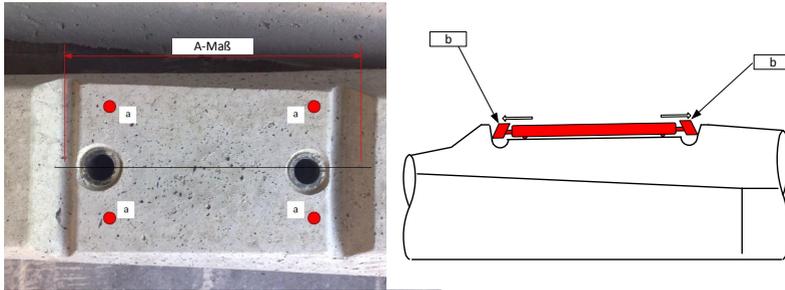


Abb. 5.3: Schematische Darstellung der manuellen Messung, Auflagepunkte a des Messwerkzeugs, Positionierung der Backen b an den Flanken des Auflagers

Szene

Die Szene ist nicht durch den Kunden definiert worden. Die Wahl der Szene wird jedoch durch den Ort, an dem das BVS in den Produktionsprozess eingebracht werden soll, eingeschränkt; mehr dazu ist dem Punkt Prozessintegration zu entnehmen.

Prozessintegration

Einige technische Bestimmungen ergeben sich aus dem späteren Einsatzgebiet des BVS, da die Produktion der Bahnschwellen unter relativ rauen Bedingungen stattfindet. Die Produktionsanlage, ein Betonwerk, ist aufgrund des hohen Gewichts der Produkte (ca. 350 kg) und deren Material sehr massiv ausgeführt und ständiger Verschmutzung ausgesetzt. Dieses Umfeld setzt für das einzusetzende BVS eine gewisse Robustheit voraus: Es sollte zum einen darauf geachtet werden, dass das BVS nicht durch auftretende Erschütterungen beschädigt werden kann. Zum anderen sollte sichergestellt werden, dass das BVS unempfindlich gegen Staub ist bzw. Vorkehrungen getroffen werden, die eine Reinigung des Systems im Fall von Fehlfunktionen, welche durch Verunreinigungen auftreten, erleichtern. Die Messung findet im Durchlauf auf dem kundenseitig vorhandenem Transfersystem statt. Das bedeutet, die Lokalität, an der das System im Produktionsprozess integriert wird, steht bereits fest und kann nicht variiert werden. Das System muss so ausgeführt werden, dass es an einem bereits bestehenden Handarbeitsplatz integriert werden kann, siehe Abbildung 5.4. Aus den hier bekannten Abmessungen und Gegebenheiten ergibt sich der Arbeitsraum, sowie die Abstände des Bildaufnahmesystems zum Objekt und die Größe und Beschaffenheit der Szene.

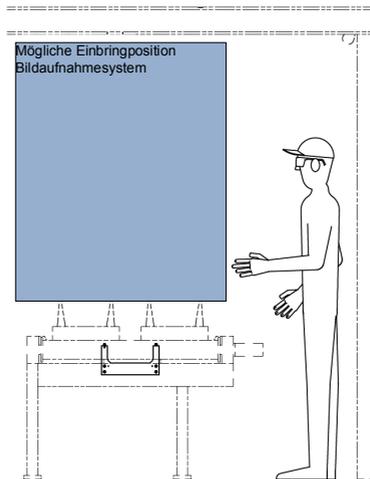


Abb. 5.4: Handarbeitsplatz mit zwei Schwellen, Markierung der möglichen Position des BVS

Mensch-Maschine-Schnittstelle

Der Funktionsumfang der HMI wurde mit nur wenig Funktionen festgelegt, da eine Integration in den teilautomatisierten Ablauf der bestehenden Produktion erfolgt. Die Darstellung der Ergebnisse soll in einer für den Produktionshelfer geeigneten Form geschehen, das bedeutet, es muss eine farbige Visualisierung der Soll – Ist-Werte (grün = IO / rot = NIO) auf dem Anzeigerät des BVS erfolgen. Die Bedienung des BVS über die HMI sollte folgende Funktionen ermöglichen:

- Wiederholungsmessung
- Handmessung
- Not-Halt

Die Wiederholungsmessung soll im Fall eines Softwarefehlers durchgeführt werden. Die Handmessung soll es ermöglichen, unabhängig vom Prozess eine Messung auszulösen. Die Not-Halt Funktion ist selbst klärend und muss nach den allgemeinen Maschinenrichtlinien umgesetzt werden.

Zusammenfassung Anforderungen Es wird auf die Darstellung als Use-Case Diagramm verzichtet, da ausgehend von den Anforderungen nur ein Anwendungsfall

vorliegt. Dieser Anwendungsfall ist das Messen. Der Anwendungsfall wird von dem Akteur Bediener/Produktionshelfer manuell mittels HMI ausgelöst. Die Unterscheidung der Messungen in Standard-, Wiederholungs- oder Handmessung stellt nur eine unterschiedliche Bewertung des Anwendungsfalls dar, sodass es bei den bisher sehr gering gehaltenen Anforderungen nicht nötig ist, ein Use-Case-Diagramm zu erstellen.

5.1.2 Phase 2: Statische Analyse

Objekteigenschaften

Das Objekt besteht, wie bereits erwähnt, aus Spannbeton, die Oberfläche ist einfarbig grau und weist kaum Textur auf. Die Maße können Abbildung 5.5 entnommen werden. Das Oberflächenrelief ist sehr gering, bis auf die beiden „Bohrungen“ im Auflager. Die

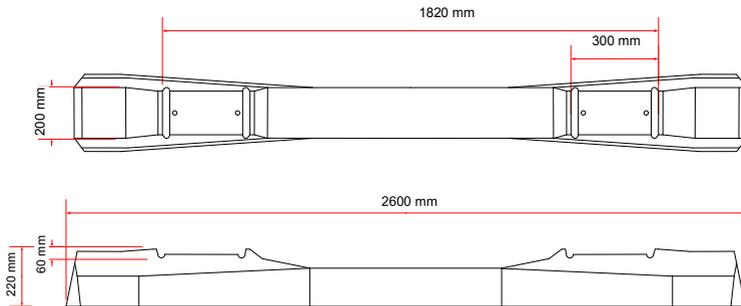


Abb. 5.5: Objekt mit Bemaßung für die Ermittlung des Messraums, geforderte Genauigkeit von $\pm 0,15\text{mm}$ für die Vermessung im Rahmen der Qualitätsprüfung

Flächen sind eben. Für die Vermessung müssen die beiden Auflager und die Flanken der Auflager erfasst werden. Eine Erfassung einer bestimmten Referenz im Raum oder Ähnliches ist nicht nötig. Die Varianz der zu erfassenden Objekte ist sehr gering, da sich die Objekttypen lediglich in den Maßen geringfügig unterscheiden.

Bildaufnahmesystem

An dieser Stelle werden die Kriterien erfasst, die das Bildaufnahmesystem erfüllen muss. Daraus werden, wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, die infrage kommenden Bildaufnahmesysteme ausgewählt.

Sichtfeld bzw. Messraum Ausgehend von der Gesamtlänge von mehr als 2m und der Tatsache, dass sich die zur Erfassung der Maße nötigen Merkmale in den äußeren Bereichen des Objektes befinden, erscheint es sinnvoll, das Objekt nicht im Ganzen zu digitalisieren. Es werden zwei Szenen definiert, welche die Erfassung aller Merkmale ermöglichen. Für die Bestimmung des B-Maßes muss die Geometrie und relative Orientierung beider Szenen bekannt sein. Die relative Orientierung kann als Transformation der Koordinatensysteme der Szenen in ein gemeinsames Koordinatensystem betrachtet werden. Anhand dieser kann das B-Maß aus der Orientierung der Szenen zueinander bestimmt werden. Diese werden wie in Abbildung 5.6 dargestellt festgelegt. Daraus resultieren Szenen von der Größe 300mm mal 200mm, wobei ein Tiefenbereich von ca. 60mm erfasst werden muss.

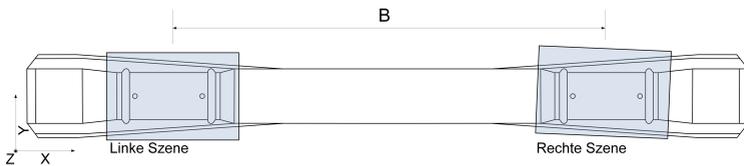


Abb. 5.6: Szenen zur Erfassung der nötigen Merkmale, Abstand B zwischen den Szenen

Laterale Genauigkeit Für die Gewährleistung der geforderten Genauigkeit wird der zuvor festgelegte Messraum in Korrelation mit der Quantisierung eines Bildaufnahme-systems gebracht. Die Beschreibung der Aufgabenstellung ergibt, dass eine Genauigkeit von $\pm 0,15\text{mm}$ bei der Erfassung der Maße verlangt wird. Es wird zunächst die Formel 4.1 aus Kapitel 4.2.2 verwendet, um die nötige laterale Auflösung zu bestimmen, wobei $I_{Faktor} = 0,3$ gewählt wird. Es wird erwartet, dass die zu erfassenden Merkmale über eine ausreichend große Anzahl an Bildpunkten angetastet werden können, sodass Interpolationsverfahren optimal angewendet werden können und eine optimale Verwendung von Subpixelverfahren möglich ist.

Nach den vorgeschlagenen Richtwerten, Tabelle 4.2, wird $p_{an} = 2$ ausgewählt, da die optischen Eigenschaften, eine gleichmäßige Betonoberfläche bei definierten Lichtverhältnissen, einen optimalen Kontrast und geringes Rauschverhalten vermuten lassen. Die Szene hat eine Breite von 300mm, die hier mit einfließt, daraus ergibt sich eine nötige Auflösung in X-Richtung nach Formel 5.1 von:

$$Bildpunktzahl = \frac{(p_{an} \times I_{Faktor} \times Szene)}{Genauigkeit} = \frac{(2 \times 0,3 \times 300\text{mm})}{0,1\text{mm}} = 1200 \quad (5.1)$$

Tiefengenaugigkeit Die geforderte Genauigkeit von $\pm 0,15\text{mm}$ gilt auch für die Tiefeninformation, die gewonnen werden soll. Die Eignung der unterschiedlichen Systeme wird in der Bewertung der Kriterien weiter aufgeschlüsselt.

Bildrate/Taktzeit Die Taktzeit zur Bearbeitung von zwei Schwellen am Handarbeitsplatz beträgt $t_{Takt} = 32s$. Daraus ergibt sich $t_{BVS} = 8s$ bei der sequentiellen Digitalisierung pro Auflager.

Oberflächenrelief Das Oberflächenrelief wird durch die Geometrie des Messobjektes bestimmt. Das festgelegte Sichtfeld erfasst den Auflagerbereich der Bahnschwelle, das Relief entspricht der Geometrie dieses Bereichs der Bahnschwellen und kann wie in Abbildung 5.7 definiert werden. Das Relief ergibt sich wie dargestellt durch die

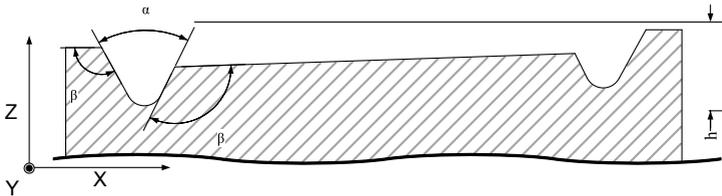


Abb. 5.7: Relief der Szene mit $\alpha = 55^\circ - 60^\circ$ und $\beta = 110^\circ - 120^\circ$ und $h = 60mm$

Änderung der Höhe z über X und über Y konstant.

Textur der Szene Die durch das Sichtfeld festgelegten Bereiche der Oberfläche des Objektes sind opak, der Reflektanzunterschied ist minimal. Die Textur ergibt sich aus dem Unterschied der Oberfläche einerseits, dem Relief und andererseits den Poren in der Betonoberfläche. Abbildung 5.8 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Fremdlicht Es liegen definierte Lichtverhältnisse vor.

Komplexität des Verfahrens An dieser Stelle liegen keine Besonderheiten vor, außer die bereits beschriebene Aufteilung der relevanten Objektbereiche auf zwei zu erfassenden Szenen. Das bedeutet, bei allen Bildaufnahmesystemen müssen geeignete Mechanismen gefunden werden, um die beiden Szenen in den korrekten metrischen Zusammenhang zu bringen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Umsetzungsdauer durch kein Bildaufnahmesystem negativ beeinflusst wird.

Bewertung der Kriterien

Ausgehend von den zuvor festgelegten Kriterien, die in Abbildung 5.9 zusammengefasst werden, wird an dieser Stelle das Bildaufnahmesystem festgelegt. Die mögli-

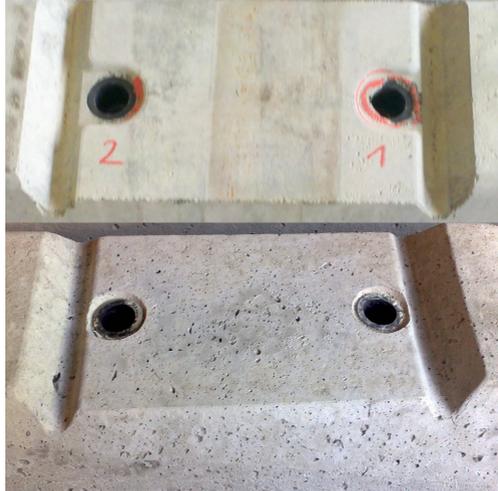


Abb. 5.8: Szenenbereich der zu erfassenden Objekte mit unterschiedlich starker Texturausprägung

chen Bildaufnahmesysteme lassen sich relativ einfach einschränken. Geforderte Genauigkeit von $\pm 0,15$ mm lassen ein Bildaufnahmesystem, bestehend aus einer PMD-Kamera, von vornherein als ungeeignet erscheinen. Des Weiteren muss die Gesamtlänge von mehr als 2 m beachtet werden. Es ergibt sich eine laterale Ausdehnung des kleinsten nötigen Merkmals von ca. 300 mm. Die kaum vorhandene Textur wirkt sich negativ auf die Verwendung eines Stereo-Kamera-Systems aus, da Δz von dem Fehler der Disparität abhängig ist und dieser Fehler durch die Korrespondenzanalyse begünstigt wird. Daraus resultieren als mögliche Bildaufnahmesysteme Lasertriangulation und Streifenlicht-Projektion. Die Erfassung der Merkmale über die Aufnahme von zwei unterschiedlichen Szenen erfordern entweder das mechanische Umsetzen des Bildaufnahmesystems oder den Einsatz von einem Bildaufnahmesystem pro Szene. Die geforderte Taktzeit und der begrenzt zur Verfügung stehende Raum verlangen es, möglichst wenig Aufnahmen in kurzer Zeit zu realisieren. Der entstehende konstruktive Aufwands zum mechanischen Umsetzen eines einzelnen Bildaufnahmesystems wird aufgrund der örtlichen Gegebenheiten der Produktionsanlage als nicht zielführend bewertet, d.h., die Szenen müssen mit zwei Bildaufnahmesystemen digitalisiert werden. Die zur Projektlaufzeit verfügbaren Bildaufnahmesysteme, die sich der Streifenlicht-Projektion bedienen und die Anforderungen an Taktzeit und Genauigkeit erfüllen, waren gegenüber den Bildaufnahmesystemen basierend auf dem Lichtschnittverfahren die wirtschaftlich ungünstigere Variante.

	Stereo-Verfahren	Laser-triangulation	Streifenlicht-Verfahren	ToF-Verfahren	Anforderungen
laterale Auflösung	+	+	+	-	1200 Bildpunkte
tiefen Auflösung	- ^{1.}	+	+	-	± 0,15 mm
Messbereich bzw. Messfeld	+	+	+	+	X=300mm Y=200mm Z=60mm
Bildrate/ Taktzeit	○	○	-	○	$t_{BVS}=8s$ pro Auflager sequentiell
Oberflächen- relief	○	○	○	○	mittlere Reliefausprägung
Textur der Szene	- ^{1.}	○	○	○	kaum vorhanden
Fremdlicht	○	○	○	○	definierte Lichtverhältnisse
Komplexität des Verfahrens					-

 positives Verhalten in diesem Bereich
 neutral
1. Korrespondenzproblem
 negatives Verhalten in diesem Bereich

Abb. 5.9: Bewertungsmatrix zur Auswahl des Bildaufnahmesystems

Daher wurde zunächst ein Bildaufnahmesystem basierend auf dem Lichtschnittverfahren (Lasertriangulation) ausgewählt. Der erste Ansatz wäre es, das gesamte Objekt der Länge nach zu digitalisieren, also das Bildaufnahmesystem in X-Richtung über das Objekt zu führen. Daraus ergeben sich zwei Nachteile: Zum einen ist die Dauer des „Scans“ zu lange. Zum anderen kann sich eine Verdeckung des Beobachtungsstrahlengangs durch das Relief in den Flankenbereichen ergeben, sodass die Laserlinie nicht auf dem Sensor abgebildet wird. Daraus ergibt sich die Verwendung von zwei Bildaufnahmesystemen, die so angeordnet werden, dass sie die beiden Auflager erfassen können. Ein Nachteil hierbei ist, dass eine Kalibrierung der Sensoren zueinander erforderlich ist. Außerdem bietet diese Anordnung den Vorteil, dass die Trajektorie der Sensoren so angeordnet werden kann, dass beide Objekte mit demselben Bildaufnahmesystem erfasst werden können. Damit ergibt sich bei dieser Anordnung und der parallelen Erfassung der beiden Auflager $t_{BVS} = 16s$ pro Bahnschwelle, es steht also genug Zeit zur Verfügung.

Ausgehend von dem Ansatz, dass die beiden Auflager aufgenommen werden und der wirtschaftliche Nachteil von zwei Bildaufnahmesystemen in Kauf genommen werden kann, ist der sensorische Aufbau der Bildaufnahmesysteme wie in Abbildung 5.10 realisiert worden. Der Grundgedanke ist hier, dass die beiden Bildaufnahmesysteme parallel über die Szene geführt werden, sodass diese auch parallel digitalisiert werden. Durch die Führung des Bildaufnahmesystems über das Objekt wird ein 3D-Datensatz

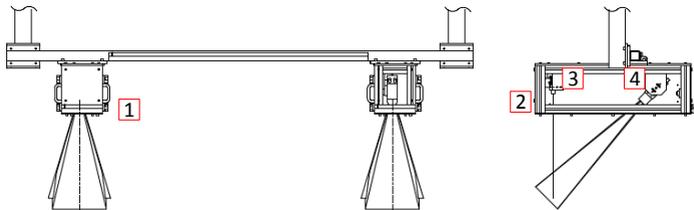


Abb. 5.10: Portal mit parallel angeordneten Bildaufnahmesystemen (1), Seitenansicht (2), Laser zur Projektion der Linie (3), Kamera (4)

erzeugt, der die Höheninformation (Z-Koordinate) und die Lage des Punktes auf dem Profil (Breite, also X-Koordinate) in Abhängigkeit vom Verfahrensweg (Y-Koordinate) des Bildaufnahmesystems enthält. Der Verfahrensweg des Bildaufnahmesystems muss, um die korrekte Zuordnung der einzelnen Profile zu gewährleisten, mit einem inkrementellen Wegsensor gekoppelt werden. Die nötige Tiefenauflösung sollte bei dem Triangulationsverfahren problemlos durch die Wahl eines geeigneten Winkels zwischen Kamera und Laser erreichbar sein. Als Sensor wird nach Vergleich verschiedener Systeme der sich dem Lichtschnittprinzip bedienende Sensor Ranger E50 von Sick ausgewählt. Die Überprüfung der Tiefengenauigkeit erfolgt an dieser Stelle mit den Angaben des Sensorherstellers, da die sensorinternen Mechanismen und Algorithmen nicht hinreichend genau bekannt sind und der Hersteller diese Vorgehen empfiehlt. Die hier verwendete Anordnung übertragen auf die Angaben des Herstellers [74] entspricht der „Reversed Ordinary“, siehe Abbildung 5.11 a.), bei der sich die Höhenauflösung Δz wie folgt ergibt:

$$\Delta z \approx \frac{\Delta x}{\sin(\alpha)} \quad (5.2)$$

mit Δx :

$$\Delta x \approx \frac{FOV}{\text{Sensor resolution}} \quad (5.3)$$

FOV ist das Field of View, also die Szenenbreite, die erfasst wird, hier 300mm. Die Auflösung des Sensors ist mit 1536pix angegeben. Daraus ergibt sich $\Delta x \approx 0,195 \frac{mm}{pix}$ und $\Delta z \approx 0,229 \frac{mm}{pix}$ bei $\alpha = 45^\circ$. In [74] wird darauf hingewiesen, dass die Genauigkeit von Δz sich rein auf die Sensor Pixelzahl bezieht und die Genauigkeit weiter von den Subpixel Level der Sensoralgorithmen abhängig ist.

Prinzipiell ist die vom Hersteller aufgeführte Betrachtung der Tiefengenauigkeit eine starke Vereinfachung der in dieser Arbeit aufgeführten Betrachtung. Bei der Verwendung des sogenannten „Hi3D Algorithmus“ wird eine Methode ähnlich der Schwerpunktbestimmung angewendet, um die Position der Laserlinie auf dem Sensor zu bestimmen, siehe Abbildung 5.11 b.). Außerdem wird vor der Analog-Digitalwandlung

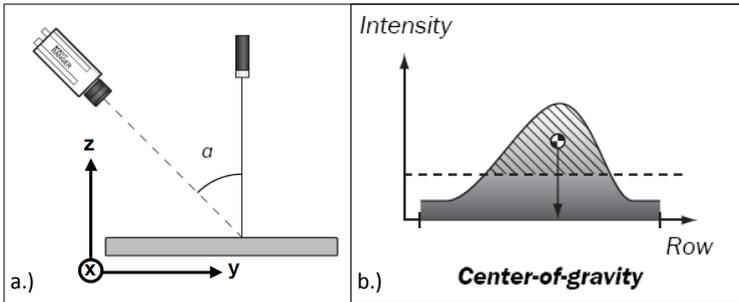


Abb. 5.11: a.) Reversed Ordinary Anordnung von Laser und Kamera. b.) Prinzip der Bestimmung der Position der Laserlinie. Quelle [74]

mittels Schwellwertoperation das Hintergrundrauschen unterdrückt. Die Höhenauflösung liegt bei diesem Verfahren dann theoretisch bei $1/16$ eines Pixels, womit sich eine Genauigkeit inklusive der Subpixel Betrachtung von $0,01434 \frac{mm}{pix}$ ergäbe. Es ist anzunehmen, dass bei einer gesättigten (sehr hellen) Darstellung der Laserlinie nicht die wahre Subpixelgenauigkeit von einem $1/16$ Pixel erreicht wird. Angenommen, es wird nur die Hälfte an Pixeln erreicht, dann wäre $\Delta z \approx 0,0286 \frac{mm}{pix}$ und läge trotz Sicherheitsfaktor im Rahmen der nötigen Genauigkeit.

BV-Strategie

Ausgehend von den ausgewählten Szenen ergibt sich die im Folgenden beschriebene Strategie für die Extraktion der nötigen Merkmale. Für die Ermittlung einer adäquaten Korrelation von Bildmerkmalen und den daraus resultierenden Bildkoordinaten müssen mehrere Schritte der Bildverarbeitung erfolgen. Zuerst muss eine geeignete Bildvorverarbeitung realisiert werden, die dazu beiträgt, dass nur die wichtigen Bildinformationen in die Berechnungen einfließen. Da Bildrauschen, Schmutz und ähnlich kleine Objekte nicht in die Berechnung einfließen sollen, werden diese Störgrößen in der Vorverarbeitung herausgefiltert. Diese Störeinflüsse erscheinen im Bild als hochfrequentes Rauschen, sodass sie mittels einfacher Tiefpassfilterung entfernt werden können.

Für die Extraktion der Maße müssen die geometrischen Merkmale, die zur manuellen Erfassung der Maße gelten, in die Bildverarbeitung übertragen werden. Überführt in eine für das maschinelle Sehen geeignete Form ergibt sich der in Abbildung 5.12 geometrische Zusammenhang. Zur Segmentierung der einzelnen Merkmale, die zur Berechnung der Maße herangezogen werden, dient die Erzeugung von inhaltlich zusammenhängenden Regionen durch Zusammenfassung benachbarter Pixel entsprechend einem bestimmten Homogenitätskriterium. Das bedeutet, es werden Bereiche

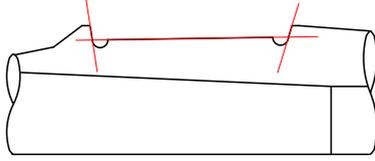


Abb. 5.12: Maß definiert durch die Strecke, die durch die Schnittpunkte der Auflagefläche mit den beiden Flanken gebildet wird

des Bildes zu homogenen Regionen zusammengefasst, welche ähnliche Indikatoren aufweisen, wie z.B. ähnliche Grauwertverteilung oder im Falle dieser Applikation ähnliche Höheninformationen. Als Orientierung und zur Abschätzung der Position der Regionen dienen die sehr einfach zu segmentierenden Bohrungen. Anhand deren Position können alle folgenden Operatoren zur Segmentierungen der einzelnen Flächen vorpositioniert werden. Das benannte Homogenitätskriterium wird so gewählt, dass die Ebenen bestimmt werden, aus deren Schnittgeraden die benannten Maße errechnet werden. Aus den so interpolierten Ebenen werden die Schnittpunkte bestimmt und die geforderten Maße berechnet. Das Prinzip der Berechnung kann Abbildung 5.12 entnommen werden.

Die Koordinaten der entsprechenden Punkte müssen gespeichert werden, sodass auch das Gesamtmaß, B-Maß, mit Hilfe der Kalibrierdaten über beide Szenenbereiche berechnet werden kann. Bei der Kalibrierung wird in gleicher Weise wie bei einer normalen Messung im Prozess ein definierter Kalibrierkörper digitalisiert.

Der Kalibrierkörper entspricht in etwa den Maßen einer Bahnschwelle; an der Position, an der sich die Auflager befinden, sind treppenförmige Blöcke aus Polyoxymethylen. Die Maße des Körpers sind definiert, siehe Abbildung 5.13. Für die Kalibrierung erfolgt manuell die Segmentierung der Merkmale des Kalibrierkörpers in den gewonnenen Bilddaten. Die manuell extrahierten Merkmale und die bekannten Realmaße des Kalibrierkörpers sowie dessen definierte Lage ermöglichen die Kalibrierung der beiden Sensoren zueinander. Die Position und die bekannten geometrischen Merkmale des Kalibrierkörpers und dessen Abbildung in der Szene, die vom Bildaufnahmesystem erfasst worden sind, lassen Rückschlüsse auf die Rotation sowie die Translation der beiden bereits kalibrierten einzelnen Koordinatensysteme der Bildaufnahmesysteme zueinander zu. Es wird bei der Festlegung der Szene die relative Orientierung der Bildaufnahmesysteme zueinander bestimmt, d.h., es wird die Transformation des Koordinatensystems des zweiten Bildaufnahmesystems in das Koordinatensystem des ersten Bildaufnahmesystems durchgeführt.

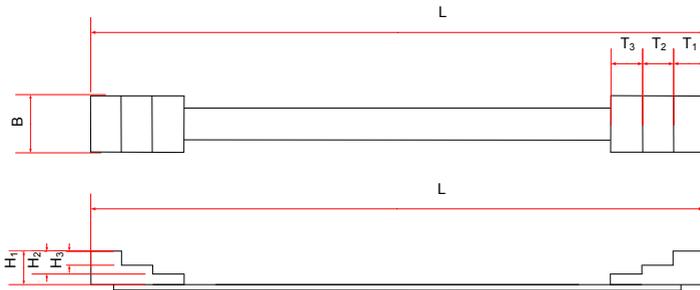


Abb. 5.13: Kalibrierkörper zur Bestimmung der relativen Orientierung der Bildaufnahmesysteme und der Einzel-Kalibrierung

Zusammenfassung Phase 2

Anhand des vorgeschlagenen Vorgehens werden die Kenngrößen bestimmt, die für die definierte Aufgabenstellung von Bedeutung sind. Die festgehaltenen Punkte zur Definition und Projektierung des BVS werden zur Übersicht in einem UML Klassendiagramm dargestellt. Das in Abbildung 5.14 dargestellte Klassendiagramm verdeutlicht die Anforderungen und das erarbeitete Grundkonzept anschaulich.

5.1.3 Phase 3: Dynamische Analyse

Integration in die Prozessumgebung

Die Integration eines BVS in eine bestehende Produktionsanlage und den darin ablaufenden Prozess bedeutet, dass vor allem die mechanische Gegebenheiten des BVS adaptiert werden müssen. Das bedeutet in diesem Fall, dass das BVS mit allen Funktionen an den bestehenden Handarbeitsplatz angepasst werden muss, ohne dass an diesem Änderungen vorgenommen werden müssen. Darüber hinaus muss das System so ausgeführt werden, dass es möglichst wenig von der Verschmutzung im Prozess beeinflusst wird. Bisheriger Ablauf Handarbeitsplatz:

1. Schwellen laufen paarweise in Position
2. manuelle Bearbeitung
3. Ein Handling fährt über die Schwellen und presst Stempel auf die Auflager
4. Rücklauf des Handlings

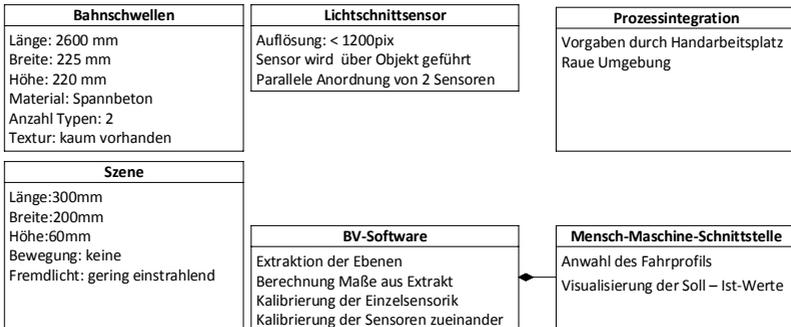


Abb. 5.14: Zusammenfassung der grundlegenden Merkmale des BVS in einem Klassendiagramm

5. Ausschleusen der Schwellen

Nach diesen Arbeitsschritten folgen keine weiteren Arbeitsschritte, die Schwellen sind bis auf das Trocknen fertiggestellt. Für die Integration bietet sich Punkt 4 an, da die Schwellen verarbeitet sind. Es würde sich außerdem anbieten, die Sensorik an das bestehende System zu koppeln, da so dieselbe Kinematik genutzt werden kann, die schon vorhanden ist. Auch die sich daraus ergebende Trajektorie erscheint für das gewählte Bildaufnahmesystem mit Lichtschnitt geeignet.

Verhalten des Objektes im Prozess

Der Prozess und der beschriebene Ablauf zeigen, dass das Objekt auf den Handarbeitsplatz gefördert und dort für die beschriebenen Arbeitsschritte positioniert werden muss. Aufgrund der Masse der Objekte und der soliden Ausführung der Produktionsanlage ist sichergestellt, dass sich die Objekte nicht bewegen. Das bedeutet für die geplante Digitalisierung, dass keine weiteren Maßnahmen für die Stabilisierung getroffen werden müssen.

Digitalisierungsablauf

Der Ablauf der Digitalisierung lässt sich ohne großen Aufwand in den Produktionsablauf integrieren. Es wird, wie festgelegt, ein Bildaufnahmesystem basierend auf dem Lichtschnittverfahren genutzt. Dieses wird über die Objekte geführt, um diese zu digitalisieren. Die Bildauswertung erfolgt direkt nach der Digitalisierung. Die Ergebnisse werden dem Produktionshelfer unmittelbar zur Verfügung gestellt, sodass dieser über

die nachfolgenden Schritte entscheiden kann.

Der Ablauf des Handarbeitsplatzes mit integriertem BVS bleibt im Wesentlichen erhalten, siehe Abbildung 5.15. Die Digitalisierung soll in den Schritt Rückfahrt des Handlings integriert werden. Anschließend müssen dem Produktionshelfer die Ergeb-

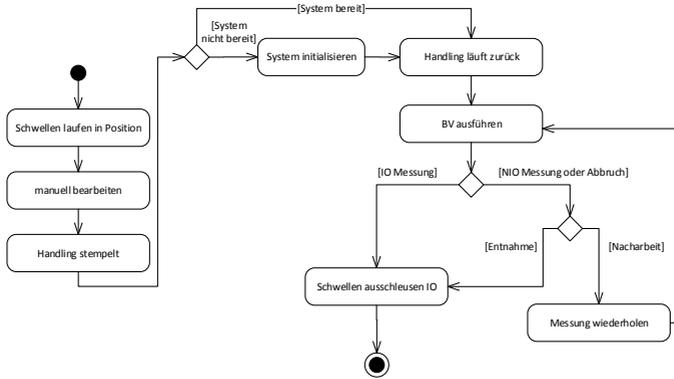


Abb. 5.15: Aktionsdiagramm zum grundlegenden Ablauf der Digitalisierung und der Arbeitsschritte am Handarbeitsplatz

nisse dargestellt werden, daraufhin entscheidet der Produktionshelfer über die nachfolgenden Aktivitäten.

Als Sonderfall wird die Handmessung in den Funktionsumfang aufgenommen, die losgelöst vom Prozess ausgelöst wird. Die Messfahrt kann am HMI gestartet und visualisiert werden, die BV-Software wertet die Messung jedoch nicht weiter aus, d.h., Visualisierung ohne Datenerfassung. Zusätzlich zu der geforderten Funktionalität wird eine Kalibrier- bzw. Kontrollfahrt in das BVS integriert. Die Kalibrierfahrt dient dazu, die beiden Sensoren im Einrichtbetrieb zueinander zu kalibrieren.

Ziel der Kontrollfahrt ist es, sicherzustellen, dass das BVS die Anforderungen an die Genauigkeit für seine beabsichtigte Verwendung erfüllt. Das heißt, im Rahmen der Kontrollfahrt wird geprüft, ob das System noch im Rahmen der Parameter arbeitet, die in der Kalibrierung festgestellt wurden. Dazu wird der Kalibrierkörper vermessen und mit den in der Kalibrierung festgestellten Parametern verglichen. Sind in diesem Bereich Abweichungen festzustellen, muss das BVS neu kalibriert werden. Die Kontrollfahrt wiederum kann außerhalb des Einrichtbetriebs angestoßen werden und dient der Überprüfung der ordnungsgemäßen Funktion des BVS. Bei beiden Sonderfahrten muss ein Kalibrierkörper an entsprechender Position aufgelegt sein bzw. in den Prozess eingeschleust werden.

5.1.4 Phase 4: Entwurf des Systems

Ausgehend von den in der Analyse dokumentierten Gegebenheiten und Restriktionen für das System ergibt sich der im Folgenden dargestellte Entwurf des Gesamtsystems. Als Zusammenfassung der Eigenschaften des Systems ist in Abbildung 5.16 das Klassendiagramm zum beschriebenen Entwurf dargestellt. Das vorgestellte Kon-

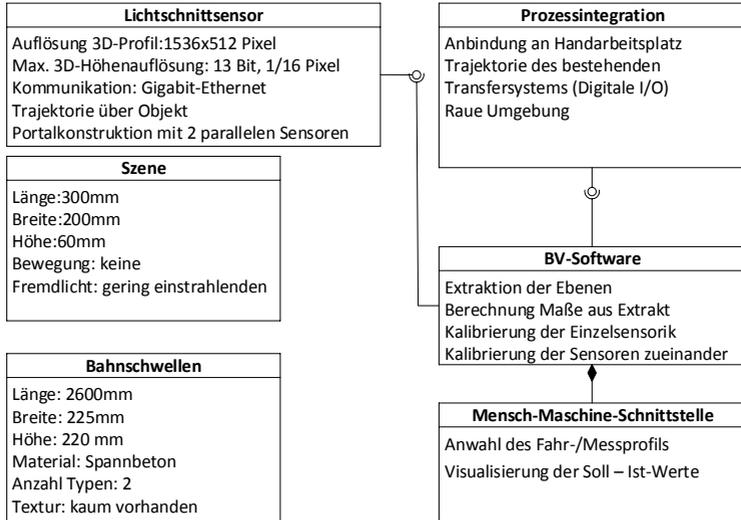


Abb. 5.16: Für den Entwurf verfeinertes Klassendiagramm des BVS zur Bahnschwellenvermessung

zept für ein BVS zur Vermessung der benannten Objekte zeigt sich als in das bestehende System integrierbar. Neben dem eigentlichen Bildaufnahmesystem und der Bildverarbeitungssoftware ist ein gewisser konstruktiver Aufwand der Sensorführung und Adaption in den Produktionsprozess nötig. Im Folgenden wird der Entwurf des Gesamtsystems vorgestellt. Die Führung der Bildaufnahmesysteme wird durch ein solides Stahlportal, welches hängend über den Objekten angebracht ist, realisiert. Dabei wird das Portal mittels einer hochgenauen Schiene, in die ein inkrementeller Weggeber integriert ist, wiederholgenau über zwei parallel liegende Bahnschwellen geführt. Die Bildaufnahmesysteme und deren Aufhängung sind durch Dämpfersysteme weitestgehend vom Linearantrieb entkoppelt, um die Übertragung von etwaig auftretenden Schwingungen zu vermeiden.

Der Aufbau des Gesamtkonzepts ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Die Bildaufnahme-

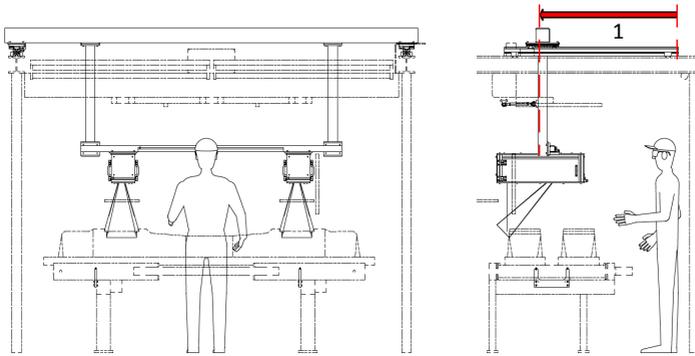


Abb. 5.17: Entwurf Hardwareaufbau des BVS zur Bahnschwellenvermessung (1) Weg des Schlittens über die Szene.

systeme sind in Gehäusen untergebracht, in die gefilterte Umgebungsluft eingeblasen wird, um die Verschmutzung der Bildaufnahmesysteme durch die raue Umgebung zu minimieren.

Ausgehend von der in Phase 2 festgelegten Bildverarbeitungsstrategie wird die Vermessung der benannten Maße mittels Bildverarbeitung wie folgt realisiert: Für die Vermessung des Auflagers wird das Portal mit den Bildaufnahmesystemen über den Bereich des Objektes geführt, in dem sich die wesentlichen geometrischen Merkmale des Auflagers befinden, also die zuvor festgelegten Szenen.

Die Bildaufnahmesysteme sind kalibriert und übergeben der Bildverarbeitungssoftware die digitalisierte Szene als kalibrierten Datensatz. In der Bildverarbeitungssoftware werden die gewonnenen Daten des einzelnen Auflagers dahingehend verarbeitet, dass die für die Vermessung wesentlichen Merkmale extrahiert werden und anhand dieser Merkmale die Maße bestimmt werden. Nach einer Bildvorverarbeitung werden zur Segmentierung der einzelnen Merkmale sowohl kantenbasierende Segmentierungsverfahren als auch regionorientierte Verfahren verwendet. Nach der Segmentierung der einzelnen Merkmale werden deren Ebenen interpoliert, die den segmentierten Flächen des Körpers entsprechen. Aus diesen Ebenen werden die Schnittgeraden ermittelt, mittels derer die Maße bestimmt werden.

Die gewonnenen Koordinaten der Schnittgeraden werden für die Berechnung des Gesamtmaßes verwendet. Aus diesen Koordinaten und den aus der Kalibrierung bestimmten Daten der Lage der Bildaufnahmesysteme zueinander kann ein gemeinsames Koordinatensystem erzeugt werden, sodass trotz nicht überlappender Szenen das Gesamtmaß bestimmt werden kann.

Die Kalibrierung wird, wie in der Beschreibung der Bildverarbeitungsstrategie festgehalten, durchgeführt. Die Ergebnisse der Kalibrierung ergaben nur geringe Abweichungen gegenüber dem mechanischen Kalibriernormal. Es konnte eine Messgenauigkeit von $\pm 0,1 \text{ mm}$ nachgewiesen werden. Mittels der Bedienoberfläche werden die Messergebnisse in einer geeigneten Form visualisiert, siehe Abbildung 5.18. Der Funk-

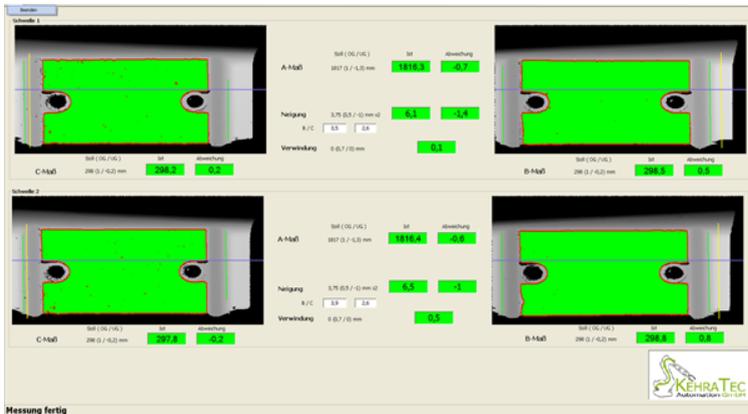


Abb. 5.18: Bedienoberfläche der Bildverarbeitungssoftware mit Visualisierung der Ergebnisse der Vermessung, Bild des rechten und linken Auflagers der sich auf dem Handarbeitsplatz befindlichen Bahnschwellen mit Kennzeichnung der Ergebnisse

tionsumfang entspricht dabei den in der Projektierung festgelegten Parametern. Es wurde außerdem noch eine Visualisierung der Ebenheit der Oberflächen implementiert. Die Oberfläche des Auflagers wird grün dargestellt, wenn sie im Bereich der definierten Grenzen liegt.

5.2 Messergebnisse

An dieser Stelle werden die Messergebnisse des realisierten Systems betrachtet, um die gewonnenen Messwerte des Systems mit der geforderten Genauigkeit und den getätigten Abschätzungen zu vergleichen und bewerten zu können.

Für die Darstellung des vollständigen Messergebnisses wurde ein Referenzobjekt angefertigt, dass die Wiederholbedingungen für eine statistische Auswertung gewährleistet und mögliche systematische Messabweichungen für jeden Messwert gleich bleiben.

Das gefertigte Messobjekt dient als Messnormal und soll die zu erfassenden Maße eindeutig verkörpern und eine gute Reproduzierbarkeit gewährleisten. Die Geometrie

entspricht der Bahnschwelle. Die Auflager sind aus hochfestem Aluminium (AlZnMgCu1.5) gefertigt, sodass sich jeweils ein A-Maß von $298 \pm 0,1\text{mm}$ ergibt. Die Auflager sind so angeordnet, dass sich ein B-Maß von $1814 \pm 1,5\text{mm}$ ergibt. Es wurden $n=42$ Messungen durchgeführt, wobei das Messobjekt das beschriebene Objekt ist. Das Messobjekt wurde unter dem Bildaufnahmesystem vor jeder Messung neu positioniert, um die realen Bedingungen der Produktionsanlage wiederzugeben. Für die Auswertung der Messung wurden die drei genannten Maße erfasst. Aus diesen $n = 42$ Messungen liegen 42 Messwerte x_i für jedes Maß vor, aus denen das arithmetische Mittel:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.4)$$

berechnet wurde. Es ergibt sich die Standardabweichung durch:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.5)$$

Für die Unsicherheit des Mittelwerts gilt dann

$$\Delta\bar{x} = t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.6)$$

Es wird die t-Verteilung verwendet, bei einem Vertrauensniveau von 95% ist der Korrekturfaktor „t=2,01“. Die Messergebnisse verdeutlichen, dass das System in dem

	B	A links	A rechts
Normal	$1814 \pm 1,5\text{mm}$	$298 \pm 0,1\text{mm}$	$298 \pm 0,1\text{mm}$
\bar{x}	1814,039 mm	297,971 mm	298,035 mm
σ	0,072 mm	0,075 mm	0,080 mm
$\Delta\bar{x}$	0,022 mm	0,023 mm	0,025 mm

Tab. 5.1: statistischen Unsicherheit der Messreihe

angegebenen Genauigkeitsbereich arbeitet und die Anforderungen erfüllt.

Die Übereinstimmung der Messwerte mit den Angaben der Fertigungstoleranzen des Messnormal verdeutlichen, dass die Messungen und das Messnormal im selben Toleranzbereich liegen. Es ist davon auszugehen, dass kein bzw. nur ein sehr geringer systematischer Fehler vorhanden ist.

An dieser Stelle sei kurz auf den Sachverhalt hingewiesen, dass die beschriebene Extraktionsstrategie für das A-Maß entsprechend der vorhandenen mechanischen Messmittel gewählt wurde. Bei der Entwicklung der Bildverarbeitung und der Extraktion

der Merkmale wurde zunächst auch eine Methode verwendet, die nicht über die vier Punkte die Fläche des Auflagers interpoliert, sondern die reale Fläche des Auflagers in die Bestimmung des A-Maßes einbezieht. Diese führte zu sehr guten Ergebnissen bei realen Bahnschwellen, deren Auflagerfläche nicht so eben ist wie das angefertigte Messnormal, jedoch zu deutlichen Abweichungen gegenüber dem mechanischen Messmittel. Die scheinbar genauere Messung ohne Interpolation wurde jedoch abgelehnt. Eine weitere Bewertung dieses Sachverhalts wurde nicht durchgeführt, sollte jedoch bei etwaigen Zertifizierungen in Betracht gezogen werden.

5.3 Bahnschwellenvermessung robotergeführt

Im folgenden wird die Entwicklung eines Systems vorgestellt, das die gleiche Messaufgabe wie das erste System erfüllen muss, wobei jedoch unterschiedliche Randbedingungen vom Produktionsprozess vorgegeben sind.

Dieses System dient ebenfalls einer Vollprüfung von Bauteilen aus Spannbeton, Bahnschwellen, in der Produktion.

In dem vorgestellten Projekt wird mit der gleichen Anordnung von Bildaufnahmesystemen, wie aus der ersten Applikation die Bahnschwelle, digitalisiert. Die zu erfassenden Merkmale sind ebenfalls die gleichen wie in der ersten Applikation.

Das System wird in einen bestehenden Prozess integriert, fungiert jedoch als autarke Station in diesem Prozess. Darüber hinaus muss ein Handling für die Bauteile realisiert werden, das die Bauteile handhabt und den einzelnen Positionen innerhalb des BVS zuführt. Das BVS kann also als ein eigenes System mit Anbindung an den Gesamtprozess betrachtet werden.

5.3.1 Phase 1: Anforderungsanalyse

Prüfobjekt

Bei dem Prüfobjekt handelt es sich wie im vorangegangenen Beispiel um eine Bahnschwelle aus Spannbeton. Das BVS muss sechs unterschiedliche Bauteiltypen handhaben und vermessen können.

Aufgabenstellung

Die Bauteile müssen aus einer Querfördereinheit entnommen, vermessen und nach der Vermessung in eine Längsfördereinheit abgelegt werden. Die Querfördereinheit stellt die Bauteile dem BVS mit Handling bereit, die Längsfördereinheit schleust die Bauteile aus der BV-Station aus. Die Messaufgabe entspricht dabei der Messaufgabe des ersten beschriebenen Projektes.

Darüber hinaus muss zusätzlich eine Vermessung bestimmter Merkmale erfolgen, die jedoch mittels 2D-BVS realisiert werden kann und zeitgleich mit der 3D-Messaufgabe geschieht; die 2D-Messaufgabe wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Szene

Die Szene wird nicht durch den Kunden definiert, ergibt sich jedoch aus der ersten Applikation.

Prozessintegration

Die Prozessintegration ist unkompliziert. In der räumlichen Einteilung des Produktionsprozesses wird für das BVS mit Handling Raum nach Bedarf geschaffen. Es müssen lediglich die Positionen der Längs- und Querfördereinheit beachtet werden. Die Vermessung mittels BV und die Handlingsabläufe richten sich an diesen Positionen aus. Darüber hinaus muss die Kommunikation mit dem Gesamtprozess sichergestellt werden.

Mensch-Maschine-Schnittstelle

Für die Bedienung des BVS soll eine Visualisierung auf der Bedienoberfläche des Industrie-PC¹ mit Einstellmöglichkeiten der unteren und oberen Grenzwerte realisiert werden. Es soll eine farbige Visualisierung der Soll- Istwerte (grün = IO / rot = NIO) auf dem IPC nach der Vermessung eines Bauteils erfolgen. Darüber hinaus soll eine Speicherung der Messdaten mit Datum, Zeitstempel und der jeweiligen Schalungsnummer in einer Datenbank erfolgen.

Zusammenfassung Phase 1

Ausgehend von den erfassten Anforderungen lässt sich das System wie in Abbildung 5.19 dargestellt an dieser Stelle zusammen fassen. Das System besteht aus drei Akteuren, dem Prozess, dem Handling zur mechanischen Umsetzung des Bauteils und dem HMI, respektive Einrichter oder Produktionspersonal. Die modellierten Anwendungsfälle sind dabei die Entnahme des Bauteils aus der Bereitstellung, das Ablegen zur Ausschleusung und die eigentliche Vermessung. Parameterverwaltung und die Abfrage des Status sind dabei obligatorischer Funktionsumfang einer solchen Anlage.

5.3.2 Phase 2: Statische Analyse

Die statische Analyse kann bei der Projektierung dieses BVS minimiert werden. Die Objekteigenschaften sind bereits aus der ersten Applikation bekannt, es muss lediglich eine Prüfung erfolgen, ob einer der sechs Bauteiltypen Besonderheiten aufweist, die nicht mit den festgelegten Eigenschaften aus der ersten Applikation vereinbar

¹ Industrie-PC(IPC) ist ein Personal Computer, der für Aufgaben im industriellen Bereich eingesetzt wird und besondere Hardwareanforderungen, gegeben durch die Schutzart, erfüllt.

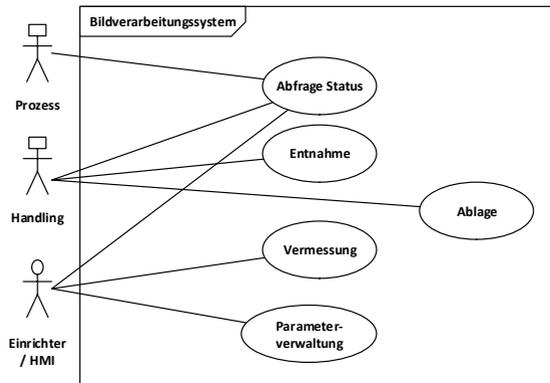


Abb. 5.19: Anforderungen an das System als Use-Case-Diagramm zusammengefasst

sind. Bei gleichen Eigenschaften und gleicher Messaufgabe kann auch das sich bereits etablierte Bildaufnahmesystem beibehalten werden. Daraus ergibt sich auch eine unveränderte Übernahme der BV-Strategie.

Ausgehend von den bereits bekannten Kenngrößen der ersten Applikation und den zusätzlichen Bestimmungen der gegebenen Aufgabenstellung werden die festgehaltenen Punkte zur Übersicht in einem UML-Klassendiagramm dargestellt. Das in Abbildung 5.20 dargestellte Klassendiagramm verdeutlicht die Anforderungen und nötigen Objekte, die in der dynamischen Analyse konkretisiert werden müssen. Ausgehend von diesem Punkt und dem ersten Projekt wird in der dynamischen Analyse geprüft, wie diese Objekte in den Ablauf des Prozesses integriert werden können bzw. welcher Ablauf sich aus dem Zusammenspiel der Objekte und der zusätzlichen Handhabung der Bauteile ergibt.

5.3.3 Phase 3: Dynamische Analyse

Aus der bereits implementierten und sich im Produktionsprozess etablierten ersten Applikation ist bekannt, dass die in der statischen Analyse festgelegten Komponenten und die Softwarestrategie die geforderte Messaufgabe erfüllen. In der dynamischen Analyse muss nun der Ablauf sowie die Handhabungsaufgabe analysiert werden.

Integration in die Prozessumgebung

Die Positionen von Längs- und Querförderer sowie die Taktzeit sind vorgegeben. Das Bauteil muss aus der Querfördereinheit entnommen werden. Die Bauteile werden in

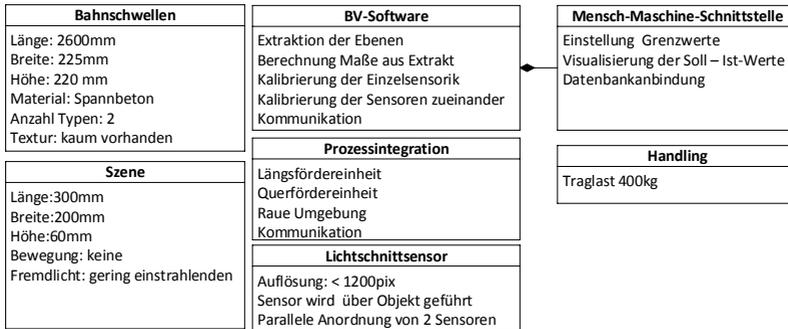


Abb. 5.20: Objekte und Anforderungen, die für das BVS gelten

der Querfördereinheit mit der zu vermessenden Seite nach unten in die Bildverarbeitungsstation eingefördert. In dieser Orientierung ist es nicht möglich, die Bauteile den Anforderungen entsprechend zu vermessen, da eine Digitalisierung der nötigen Oberfläche unausführbar ist. Vor der Digitalisierung müssen die Bauteile in eine Orientierung gebracht werden, in der das Bildaufnahmesystem die Oberfläche erfassen kann.

Nach der erfolgreichen Vermessung muss die Bahnschwelle in die Längsfördereinheit übergeben werden. Daraus ergibt sich eine Interaktion der Bestandteile des Systems, die sich in folgende Schritte aufteilt:

1. Entnahme Querfördereinheit
2. Digitalisierung und Vermessung
3. Übergabe Längsfördereinheit

Die Art der Integration von Messung und Handhabung bleibt dabei dem Integrator überlassen. Eine Zusammenfassung der Interaktion der zuvor beschriebenen Objekte/Akteure wird in Abbildung 5.21 dargestellt. Die dargestellte Antwort „Status“ steht hier für eine Art der synchronen Kommunikation der beteiligten Objekte, um einen sicheren Ablauf der Anlage durch eine Statusabfrage der Elemente zu gewährleisten.

Verhalten des Objektes im Prozess

Das Verhalten des Objektes im Prozess kann durch die Handhabung und Gestaltung des BVS beeinflusst werden. Um das System möglichst dynamisch zu halten und die geforderte Taktzeit zu gewährleisten, darf das Bauteil nicht abgesetzt werden, sondern sollte im Handling verbleiben. Um den Ablauf und das Handling möglichst adaptiv

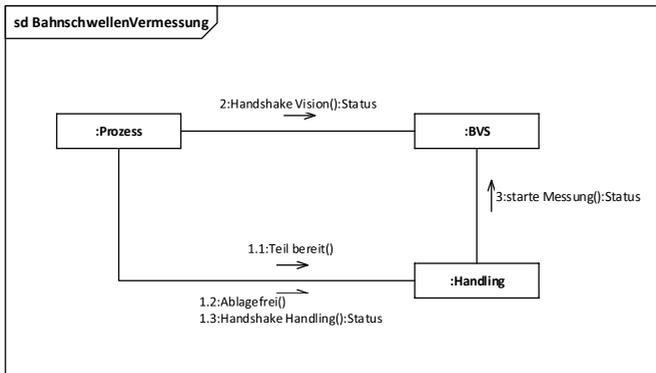


Abb. 5.21: Darstellung des Ablaufs und der Stationen 1.) Querfördereinheit 2.) Bildaufnahmesystem 3.) Längsfördereinheit

zu gestalten, wurde als Handhabungsgerät keine spezielle Kinematik konstruiert, sondern ein Schwerlastroboter genutzt. Das bedeutet, das Verhalten des Objektes wird durch den Roboter und dessen Greiferkinematik definiert, der das Objekt führt. Das bedeutet, das Objekt wird mittels Klemmkraften im Greifer fixiert und kann mit einer Genauigkeit von 0,1 mm geführt werden.

Die präzise Führung und frei definierbare Trajektorie, die die Handhabung mittels Roboter ermöglicht, schaffen die Voraussetzungen dazu, dass bei dem ausgewählten Lichtschnittverfahren nicht das Bildaufnahmesystem über das Bauteil geführt wird, sondern das Bauteil unter dem stationären Bildaufnahmesystem in einer angemessenen Trajektorie geführt werden kann. In Abbildung 5.22 ist das BVS mit Roboter und Peripherie als Station in der Produktionsanlage sowie das Zustandsdiagramm des BVS dargestellt.

Die Darstellung des BVS ist der im Rahmen der Projektierung erstellten Real-Time-Simulation der Station entnommen worden. Die erstellte Simulation diente der Abschätzung der Taktzeit sowie zur Evaluierung des Ansatzes, das Objekt zu führen und nicht das Bildaufnahmesystem. Die Simulation hat gezeigt, dass der gewählte Lösungsansatz geeignet ist, die Anforderungen an das BVS mit Bauteilhandhabung zu erfüllen.

Digitalisierungsablauf

Der Ablauf der Digitalisierung wird in den Handhabungsablauf integriert. Es wird, wie festgelegt, ein Bildaufnahmesystem basierend auf dem Lichtschnittverfahren genutzt, welches stationär in den erreichbaren Bereich des Handlings integriert wird. Das Bauteil wird unter dem Bildaufnahmesystem hergeführt, um dieses zu digitalisieren.

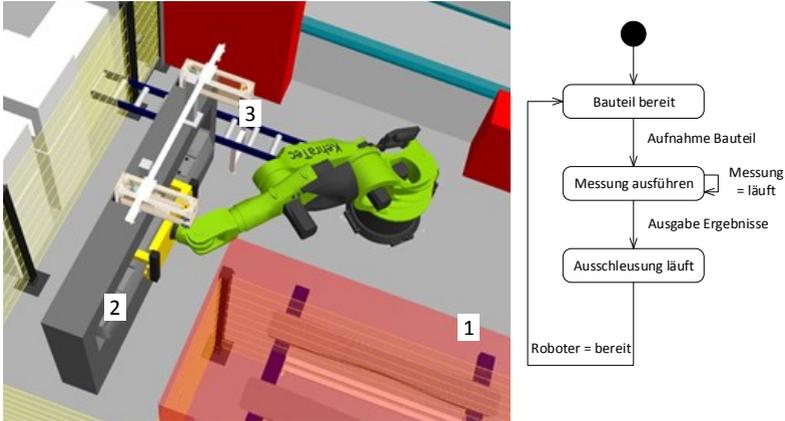


Abb. 5.22: Darstellung des BVS mit den zu bedienenden Positionen 1.) Querförderereinheit 2.) Bildaufnahmesystem 3.) Längsfördereinheit sowie das sich daraus ergebende Zustandsdiagramm des BVS

Die Bildauswertung erfolgt direkt im Anschluss zur Digitalisierung. Die Ergebnisse werden wie in den Anforderungen definiert, in einer entsprechenden Visualisierung auf der Bedienoberfläche des IPCs dargestellt. Der Schwerlastroboter entnimmt mittels einer entsprechenden Greiferkinematik die Bauteile aus der Querförderereinheit und führt sie lagerichtig unter dem Bildaufnahmesystem, siehe Abbildung 5.23, bestehend aus zwei Lichtschnittsensoren, her. Der Gesamtprozess innerhalb der Station BVS unterliegt weiter keinen Bedingungen, Hauptaugenmerk liegt auf der Erfüllung der Automatisierungsaufgabe, Vermessung und Handhabung. Der Digitalisierungsablauf ergibt sich wie oben beschrieben. Der Entwurf des Ablaufs der Handhabung des Bauteils mit Vermessung durch das BVS ist in Abbildung 5.24 dargestellt.

Als Sonderfälle müssen der Kalibriervorgang und manuell angestoßene Messungen betrachtet werden. Dies fällt jedoch dann in den Bereich der Realisierungsphase, in dem auch detailliertere Abläufe erstellt werden. Hinzu kommen noch die Steuerung der Prozessperipherie und Kommunikation mit dem Schwerlastroboter, die von der BV-Software übernommen werden.

5.3.4 Phase 4: Entwurf des Systems

Aus der statischen und dynamischen Analyse ergab sich der im folgenden beschriebene Systementwurf. Für die Handhabung der Bauteile kommt ein Roboter mit 500kg



Abb. 5.23: Darstellung Bauteil in Position unter dem Bildaufnahmesystem 1.) Lichtschnittsensor mit Einhausung 2.) Trajektorie des Objektes bei der Digitalisierung

Tragfähigkeit zum Einsatz.

Die Bahnschwellen werden im Vorlauf mithilfe einer Säge vereinzelt und für den Roboter an der Förderstrecke-Einschleuse, der Querfördereinheit, bereitgestellt. Vor der Aufnahme durch den Roboter wird die tatsächliche Länge der Bahnschwelle von zwei Analogwert-Sensoren ermittelt. Anhand der gemessenen Länge wird die Greifposition des Roboters errechnet.

Der Roboter nimmt die Schwelle an der Einschleuse auf, für die weitere Vermessung muss die Schwelle um 180° gewendet werden. Der Wendevorgang erfolgt im Überkopfbereich des Roboters mit waagerechter Bahnschwellenlage, damit die entstehenden Kräfte auf die Greifermechanik minimiert werden. Anschließend wird bei allen aufgenommen Bahnschwellen die nachfolgend beschriebene Messung durchgeführt, nachdem sie dem Messsystem vom Roboter zugeführt wurden. Nach einer abschließenden Auswertung des Messergebnisses wird die Bahnschwelle entsprechend den Ergebnissen auf dem Rollengang der Längsfördereinheit abgelegt und ausgeschleust.

In Abbildung 5.25 wird eine Zusammenfassung der Eigenschaften des Systems in Form des im Rahmens der Projektierung entstandenen Klassendiagramms dargestellt. Dieses zeigt die Verbindungen, Funktionen und Eigenschaften der Objekte, die für dieses BVS verwendet werden. Neben dem 3D-BVS kommt noch ein Längenmesssystem zur Messung der Schalungslänge mit Hilfe zweier Laseranalogensensoren zum Einsatz. Ein dritter Laseranalogensensor wird zur Ermittlung der Schwellenmitte für das Greifsystem des Roboters genutzt. Das 3D-BVS besteht aus zwei Lichtschnittsensoren, die

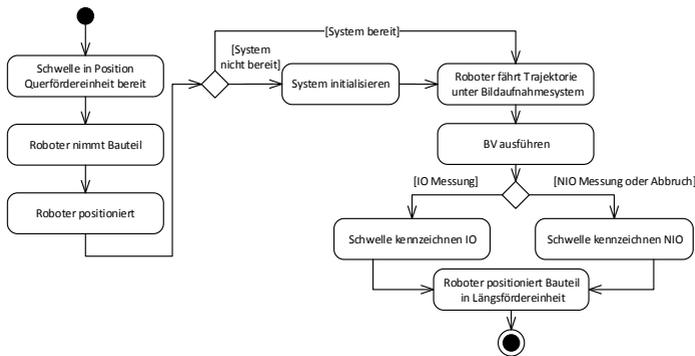


Abb. 5.24: Aktionsdiagramm zum grundlegenden Ablauf der Digitalisierung und der Handhabung

von je einer Kamera und einem Laserlinien-Projektor gebildet werden. Die Sensoren sind in Gehäusen untergebracht, die, um das Eindringen von Staub zu verhindern, mit Lüftern versehen wurden, die durch Einblasen von gefilterter Luft einen leichten Überdruck erzeugen. Über eine integrierte Schnittstelle erhalten die Bildverarbeitungssoftware sowie die Sensoren die Weginformationen von einem linearen Inkrementalgeber am Gestell, um die Längenverhältnisse mit dem Bildaufnahmesystem korrekt darzustellen. Ein 2D-BVS, bestehend aus einer Kamera, erfasst zusätzliche Merkmale für die Qualitätskontrolle, worauf an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll. Darüber hinaus kommen folgende Sensoren zum Einsatz, die im Rahmen der Bildverarbeitungssoftware über den IPC mit erfasst werden:

- Ein Analog- Lasersensor zur Abstandserfassung des Bahnschwellenkopfes von der Kopfkamera
- Sechs Analog- Lasersensoren zur Messung der Schwellenhöhen Links und Rechts, sowie in der Mitte der Schwelle
- Fünf Analog- Lasersensoren und ein Ultraschallsensor zur Messung der Schwellenbreiten sowie in der Mitte der Schwelle

Über einen Ethernet-Feldbusknoten tauscht der IPC Informationen mit der SPS des Antriebes aus. Der Hauptfunktionsumfang der Software und HMI wurde wie folgt festgelegt: Auf dem Hauptbildschirm, siehe Abbildung 5.26, werden die Messergebnisse des letzten Schwellenpaares auf Bildern und in Messwerttabellen angezeigt. Im oberen Teil des Bildes werden die Bilder der beiden 3D-Meßsysteme und die dazugehörigen Messwerte mit ihren Toleranzen dargestellt, im unteren Bereich die Bilder des

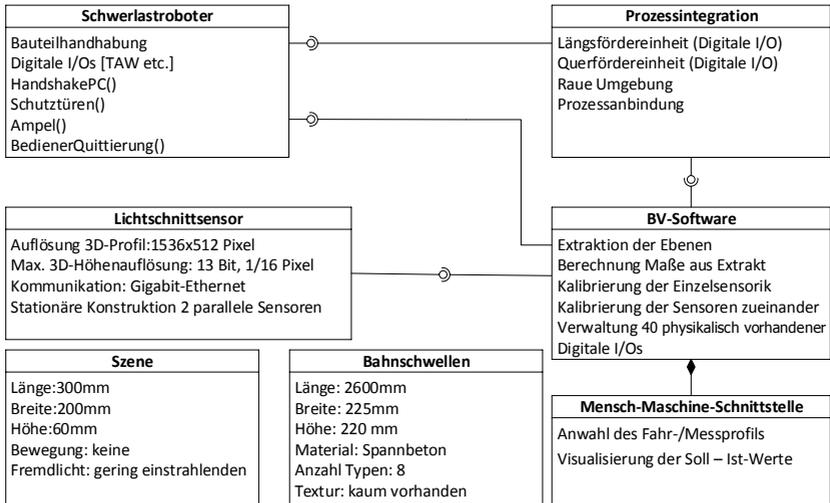


Abb. 5.25: Entwurf des verfeinerten Klassendiagramms des BVS zur Bahschwellenvermessung und Handhabung

2D-Systems mit den Messwerten aus der zusätzlichen Prüfung. Die Ausgabefelder aller Messwerttabellen färben sich nach dem Start einer Messung weiß. Nach Abschluss der Messung werden die Messfelder der Messdifferenzen Grün, wenn der zugehörige Messwert innerhalb der zugehörigen Grenzen liegt, und Rot bei einem NIO-Wert. Zusätzlich werden die aktuell geltenden Grenzwerte für die Schwellentypen angezeigt. In den Bildern werden auch die gefundenen Flankenlinien (grün), Kalibrierlinien (gelb) und definierbare Schäden an der Oberfläche dargestellt, wenn sie eine gewisse Größe bzw. Länge überschreiten. Die Messergebnisse werden in einer Datenbank abgelegt. Die Werte werden mit Datum und Uhrzeit für eine spätere Auswertung versehen. In der Statuszeile wird der Systemzustand angezeigt. Zudem kommen noch diverse Masken für die Einrichtung der Prozesse, Kalibrierung und die Eingabe von Systemdaten. Die folgenden Funktionsmasken stehen zur Verfügung:

- Einrichten
- Prüfplanverwaltung
- Einrichten der Schwellen für 3D Systeme
- Einricht-Hauptfenster
- Regionen einrichten

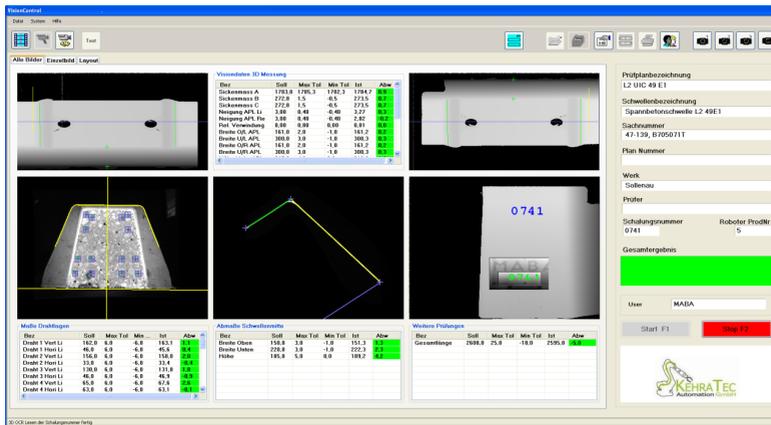


Abb. 5.26: Hauptbildschirm und Bedienoberfläche der Bildverarbeitungssoftware, dargestellt werden die Ergebnisse des 3D-Systems und der zusätzlichen Messungen

- Kalibrieren des 3D Systems
- Einrichten 2D System

Zusätzliche Funktionen, die sich während der Entwicklung und Inbetriebnahme ergeben, sind:

NIO-Bilder speichern für Analysezwecke können je nach Anwahl die NIO - Bilder einer Messung in einem Verzeichnis abgelegt werden.

Kontrollmessung wird am Roboterpanel das Programm “Kontrollmessung“ angewählt, kann der Bediener das Kalibrierwerkzeug auf den Robotergreifer legen und die Zelle verlassen. Nach Starten des Systems durch die Systemhandbedieneinheit greift der Roboter das Werkzeug und fährt mit diesem in das Messsystem. Es erfolgt eine Kontrollmessung, die verifiziert, ob das System in den angegebenen Parametern arbeitet oder neu kalibriert werden muss. Der Roboter beendet die Kontrollmessung, indem er mit dem Werkzeug wieder in seine Grundposition fährt und zur Entnahme des Kalibrierwerkzeuges den Greifer öffnet. Nach Entnahme des Werkzeuges kann die Zelle verlassen werden und nach Anfahren der Grundstellung wieder gestartet werden.

Die Entwicklung und Umsetzung dieser roboterautomatisierten Bildverarbeitungslösung konnte anhand der vorgenommenen Projektierung erfolgreich umgesetzt werden.

Der Entwurf und die Umsetzung des Systems zeigen, dass aus einem relativ einfachen System, wie es in der ersten Applikation beschrieben worden ist, ein sehr umfangreiches BVS mit umfangreicher Funktionalität entstand. Dabei konnten die aus der ersten Projektierung entworfenen Objekte direkt in die Projektierung der Variante übertragen werden. Dies verdeutlicht, dass die Wiederverwertbarkeit und der objektorientierte Gedanke für derartige Systeme geeignet sind.

5.4 Messergebnisse

An dieser Stelle erfolgt keine gesonderte Betrachtung der Messergebnisse. Die beschriebene Anlage wurde in Betrieb genommen und im Rahmen der Abnahme durch den Kunden wurde die Genauigkeit vom Kunden bestätigt. Die Messwerte sind wie bei der ersten beschriebenen Applikation im Bereich der geforderten Genauigkeit und entsprechen den Anforderungen.

5.5 Robot-Vision-Handling

Nachfolgend wird die Projektierung eines Systems beschrieben, bei dem zylindrisch geformte Bauteile aus Förderhilfsmitteln, sogenannten Ladungsträgern, gegriffen und automatisch mittels 6-Achsen-Industrieroboter einer Bearbeitungsstation des Produktionsprozesses zugeführt werden. Dieses System ist nachträglich in den Gesamtprozess integriert worden. Die beschriebene Applikation kann als sogenannter „Griff in die Kiste“ verstanden werden. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die automatisierte Teileentnahme aus Behältern oder das automatische Depalettieren mit Industrierobotern derzeit bei bestimmten Objektgeometrien sowie Oberflächenbeschaffenheiten noch immer eine Herausforderung im Bereich der BVS darstellt.

Im Umfeld der industriellen Produktion wird von Roboterherstellern, Bildverarbeitungsunternehmen oder Integratoren der „Griff in die Kiste“ oft als gelöst vorgestellt. Zu Projektlaufzeit ist keine Lösung bekannt, die den oft beworbenen universellen Charakter erfüllt und nicht besondere Randbedingungen aufstellt.

Die hier beschriebene Applikation stellt ein Konzept für die beschriebene Aufgabenstellung dar und soll vom universellen „Griff in die Kiste“ abgegrenzt werden. Der Fokus liegt auf den beschriebenen Anforderungen und es wird eine Lösung speziell für die beschriebene Problemstellung bzw. Produktionsanlage dargestellt.

5.5.1 Phase 1: Anforderungsanalyse

Bei der Produktion von sogenannten Tragrollen muss einer Bearbeitungsstation eine Achse und ein Rohr, die in Ladungsträgern bereitstehen, zugeführt werden. Die Bereitstellung erfolgt bisher lagerichtig gestapelt in den Förderhilfsmitteln, damit der

Roboter mittels eingelernter Punkte die Depalettierung mit einer festgelegten Reihenfolge durchführen kann (vgl. Abbildung 5.27).

Die Einschränkungen, die durch dieses Vorgehen bestehen, sollen durch die Integration eines BVS beseitigt werden. Es soll erreicht werden, dass die Förderhilfsmittel so beladen werden können, dass ihr Volumen optimal ausgenutzt wird. Dazu muss der Depalettierungsvorgang sensorbasiert mittels BVS ausgeführt werden. Der im Prozess integrierte Roboter, der bisher vordefinierte Punkte für das Teile-Handling anfährt, soll in das BVS mit eingebunden werden, sodass dieser die automatische Depalettierung mittels Bildverarbeitung ausführt.

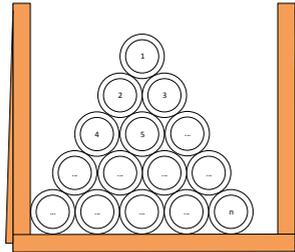


Abb. 5.27: Schematische Darstellung eines Förderhilfsmittels mit Packmuster für die eingelernte Depalettierungsreihenfolge der Objekte

Prüfobjekt

Ein einzelnes Prüfobjekt ist bei dieser Applikation nicht gegeben. Es handelt sich vielmehr um eine Prüfscene, bei der ein Ladungsträger so erfasst werden muss, dass ein möglicher Greifpunkt ermittelt werden kann. In Abbildung 5.28 ist der Ladungsträger mit einer möglichen Anordnung an Objekten dargestellt. Bei den Objekten, die aus den Ladungsträgern mittels Roboter entnommen werden sollen, handelt es sich um Achsen und Rohre, aus denen die Tragrollen montiert werden. Es handelt sich dabei um unterschiedliche Objekttypen, die sich in Durchmesser und Länge unterscheiden.

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung verlangt, dass das BVS den Greifpunkt des nächsten zu greifenden Objektes im Rahmen der Szene ermittelt und diesen in Form von geeigneten Koordinaten an den Roboter übergibt. Der Greifpunkt eines Objektes liegt in der Regel über dem Schwerpunkt des Körpers. Die Handhabung erfolgt mit einem

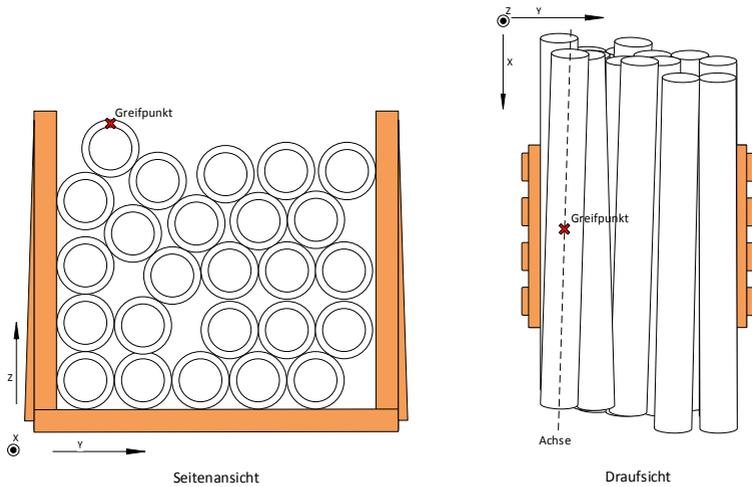


Abb. 5.28: Mögliche Ordnung der Objekte, die mittels des BVS erfasst werden müssen, mit schematischer Darstellung eines Greifpunktes

Magnetgreifer. Der Magnetgreifer ist wird bereits zum Depalettieren mittels der eingelernten Punkte genutzt und es darf keine konstruktive Änderung erfolgen. Die in dieser Applikation zu greifenden Objekte sind symmetrische, zylinderförmige Bauteile mit einheitlicher Massedichte. Das bedeutet, dass der Greifpunkt über dem Mittelpunkt, definiert durch die Länge des Körpers, des Objektes liegt. Die Koordinaten des Greifpunktes müssen in ein für den Roboter verständliches Format überführt werden, was ein gemeinsames Koordinatensystem von Roboter und Bildaufnahmesystem voraussetzt. Das gemeinsame Koordinatensystem wird an dieser Stelle entsprechend dem in Abbildung 5.28 dargestellten System festgelegt.

Prozessintegration

Die Änderungen an bestehenden Anlagenteilen müssen möglichst gering ausfallen, d.h., der mechanische Aufbau, bestehend aus Logistik, Roboter, Greifer und Bildaufnahmesystem sowie Anpassung der Steuerung müssen in die bestehende Anlage gut integrierbar sein. Dies ergibt die Anforderungen und Funktionen, die im Folgenden aufgeführt werden:

1. **Kommunikation:** Die Funktion der Kommunikation zwischen Bildverarbeitungssystem, Leitsystem und Roboter erfolgt über die BV-Software.
2. **gemeinsames Koordinatensystem von BVS und Roboter:** Die Definition eines gemeinsamen Koordinatensystems setzt eine Handaugekalibrierung voraus, die bei Inbetriebnahme des Systems erfolgen muss.
3. **Keine Einschränkung der Erreichbarkeiten durch zusätzliche Aufbauten:** Die für das BVS nötige Peripherie sowie das Bildaufnahmesystem dürfen keine Einschränkungen für den Roboter oder andere kinematische Abläufe ergeben.
4. **Bereitstellung der Depalettierungsstrategie durch das BVS:** Bei der Auswertung der Lage der Objekte muss gleichzeitig auch eine Analyse zur Greifbarkeit sowie bei mehreren greifbaren Objekten eine Rangfolge erstellt werden. Dies bedeutet, die Auswertung, welches Objekt als nächstes gegriffen wird, erfolgt in der Software des BVS; dem Roboter werden nur die entsprechenden Koordinaten in geeigneter Form zur Verfügung gestellt.

Szene

Die Szene wird nicht eindeutig definiert. Die Wahl der Szene ergibt sich aus den Abholpositionen bzw. dem Ort, an dem die Ladungsträger eingeschleust werden und die bisherige Depalettierung stattfindet. Die Randbedingungen sind durch den Ort, an dem das BVS in den Produktionsprozess eingebracht werden soll, eingeschränkt; die genaue Definition der Szene erfolgt im Rahmen der statischen Analyse bei der detaillierten Betrachtung der Objekteigenschaften.

Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die für den Anlagenbediener zugänglichen Funktionen sollen gering gehalten werden. Die möglichen Einstellungen beschränken sich auf die Anpassung bestimmter Grenzwerte und der Visualisierung des laufenden BVS-Prozesses bzw. Darstellung der aktuell digitalisierten Szene.

Daraus folgt, dass das HMI minimal ausfallen kann und neben den genannten Anforderungen für den Bediener Funktionen für die Störungsbeseitigung und Wartungsarbeiten benötigt werden. Der darüber hinaus benötigte Funktionsumfang wird im Rahmen der Softwarestrategie bestimmt.

Zusammenfassung Phase 1

Eine Zusammenfassung der Anforderungen wird in Abbildung 5.29 dargestellt. Das System besteht aus drei Akteuren, dem Prozessleitsystem (einer der Bildverarbeitung übergeordneten Steuerungseinrichtung), dem Roboter, der das Objekt aufnimmt und dem HMI, das durch den Einrichter oder das Produktionspersonal bedient wird.

Ausgehend von diesen Anforderungen ergeben sich die Anwendungsfälle, Kommunikation zugreifen, der von allen Akteuren ausgelöst werden kann, Auswertung starten vom Prozess ausgelöst sowie das Auslösen des Bildanzugs, die Visualisierung und die Parameterverwaltung. Auch bei der Darstellung der Anwendungsfälle wird deut-

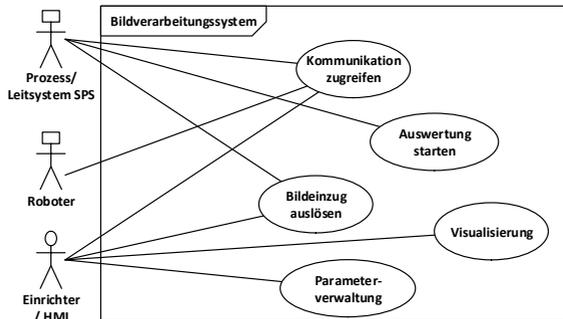


Abb. 5.29: Use-Case-Diagramm als Zusammenfassung der Anforderungsanalyse

lich, dass durch die nachträgliche Einbindung des BVS der Prozess möglichst wenig Änderungen erfahren soll. Dies wird z.B. durch die Ausrichtung des BVS an dem Prozessleitsystem und der ansonsten geringen Beeinflussung des Systems durch die Akteure deutlich.

5.5.2 Phase 2: Statische Analyse

Objekteigenschaften

Wie im Vorfeld dargestellt, handelt es sich bei den Objekten um Komponenten für die Montage von Tragrollen. An der ersten Bereitstellungsposition werden Achsen in einem Ladungsträger in den Prozess eingebracht. Die bestehende Anlage ist fähig, unterschiedliche Bauteiltypen zu verarbeiten. Die dafür nötigen Achsen unterscheiden sich in Länge und Durchmesser. Die Achsen sind gedrehte Stahlbauteile. Deren Oberflächenbeschaffenheit variiert zwischen der unbehandelten Stahloberfläche, leichten Korrosionserscheinungen an der Oberfläche und metallisch glänzender Oberfläche. Das zweite Objekt, das auch in einem Ladungsträger bereitgestellt wird, ist das Rollenelement der Tragrolle. Die Rolle ist ebenfalls ein gedrehtes Stahlbauteil, die Oberflächenbeschaffenheit bewegt sich im Bereich der Achsen, außerdem kommt noch hinzu, dass die Rollen kunststoffbeschichtet oder lackiert sein können. Bei den Rollen ist ebenfalls zu beachten, dass unterschiedliche Bauteiltypen in der Anlage verarbeitet werden.

Das bedeutet, es werden Achsen und Rollen, zusammengefasst als zylinderförmige Bauteile, unterschiedlicher Längen von 300-1800 mm und unterschiedlicher Durchmesser von 40-300 mm verarbeitet, die auch mittels BV erfasst werden müssen. Als besonderes Kriterium fällt die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit auf. Die beschriebenen Objekte werden in Ladungsträgern bereitgestellt. Das bedeutet, eine Szene besteht nicht aus einzelnen Objekten, sondern diese sind in dem benannten Ladungsträger/Förderhilfsmittel gestapelt.

Bildaufnahmesystem

Das Bildaufnahmesystem muss entsprechend dem in den Objekteigenschaften festgelegten Punkten für die Szene bzw. den definierten Messraum ausgewählt werden. Zu diesen Bedingungen kommen noch die Prozessumgebung und die Forderung nach möglichst wenig Eingriff in die bestehende Anlage.

Sichtfeld bzw. Messraum Aus der möglichen Bauteillänge von 1800 mm und der Breite des Ladungsträgers von 1100 mm sowie einer maximalen Stapelhöhe von 730 mm in den Ladungsträgern ergibt sich die zu erfassende Szene. Diese definiert den Messraum, d.h., es muss ein bildgebendes System gewählt werden, das einen Messraum von mindestens 1800 mm × 1100 mm × 730 mm digitalisieren kann. Zusammengefasst heißt das, es ergibt sich eine benötigte Genauigkeit von $\pm 1,5$ mm, bei einer Szenen-Abmessung von 1800 mm × 1100 mm lateral und einer Tiefe von ca. 800 mm.

Laterale Genauigkeit Ausgehend davon, dass die Abmessungen der Szene nicht für alle Objekttypen übereinstimmen, da diese sich in der Länge unterscheiden können, wird an dieser Stelle vorerst nur die konstante laterale Ausdehnung des Messraums betrachtet. Die Betrachtung der Länge des Messraums und die Genauigkeitsbetrachtung hierzu erfolgt dann bei Bedarf nach Bestimmung des Bildaufnahmesystems und Festlegung der Lösungsstrategie.

Zur Bestimmung der lateralen Auflösung wird die Breite von 1100 mm des Ladungsträgers angenommen. Zur Bestimmung der lateralen Auflösung wird zunächst mit Formel 4.1 die nötige laterale Auflösung ermittelt, wobei $I_{Faktor} = 0,6$ gewählt wird. Es wird davon ausgegangen, dass eine Interpolation des Schwerpunktes der Objekte möglich ist. Das bedeutet, es wird mittels Antastung einer großen Anzahl an Bildpunkten bei der Extraktion der Position der Bauteile interpoliert. Die Antastung wird mit $p_{an} = 3$ angenommen, da aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit mit einem gewissen Rauschen und nicht der optimalen Bildgüte gerechnet wird. Die Szene hat eine Breite von 1100 mm, die hier mit einfließt, daraus ergibt sich eine nötige

Auflösung in X-Richtung von:

$$\frac{(3 \times 0,6 \times 1100\text{mm})}{1,5\text{mm}} = 1320 \quad (5.7)$$

Tiefengenaugigkeit Die geforderte Genauigkeit von 1,5mm gilt auch für die Tiefeninformation, der Koordinaten des Bauteils, die extrahiert werden soll. Die Eignung der unterschiedlichen Systeme wird in der Bewertung der Kriterien weiter aufgeschlüsselt.

Bildrate/Taktzeit Die Produktionsanlage hat eine anvisierte Gesamt-Taktzeit von $t_{takt} \approx 60s$. Das bedeutet, nach 60 Sekunden muss eine Tragrolle fertiggestellt und montiert sein. Da der Produktionsablauf aus sehr vielen einzelnen Schritten besteht, kann nicht ohne Weiteres auf t_{BVS} geschlossen werden. Hierzu wurde der Handlungsprozess isoliert betrachtet. Die Zeit, in der der Roboter die Bauteile aufnimmt und in die nachfolgende Station übergibt, ergibt $t_{BVS} = 32s$ bis die Koordinaten des nächsten zu greifenden Bauteils an den Roboter übermittelt werden müssen. Ausgehend davon, dass der Messraum relativ groß ist und daher eine große Datenmenge erwartet wird, wird eine maximale Digitalisierungsdauer von $t_{Dig} = 28s$ angenommen. Auswertzeit t_{Aus} ist mit vier Sekunden ausreichend bemessen. Eine derartige Auswertung liegt üblicher Weise im Bereich kleiner eine Sekunde.

Oberflächenrelief Das Oberflächenrelief der Szene wird im wesentlichen durch die Anordnung der zugreifenden Objekte im Ladungsträger bestimmt, siehe Abbildung 5.30. Für die Lösung des Automatisierungsproblems ist es notwendig, den Ladungsträger und die Objekte zu erfassen. Aufgrund der Geometrie der Objekte ergibt sich immer eine gewisse Zwangslage der Bauteile, sie sind gestapelt. Zur Lösung des Aufgabenstellung ist es nur notwendig, die Koordinaten des nächsten zu greifenden Objektes zu extrahieren.

Das bedeutet, es muss bei der Reliefbetrachtung nicht die gesamte Höhe des Ladungsträgers mit einbezogen werden, sondern nur die oberste Lage der Objekte. Dadurch ergibt sich eine Beschränkung der Höhendifferenz der jeweiligen Szene auf $h \approx 1,5R$. Die Bereich der Szene, die durch spitze Winkel wie β definiert werden, enthalten keine relevanten Informationen für die Extraktion und können vernachlässigt werden. Die relevanten Winkel, in Abbildung 5.30 als α bezeichnet, sind größer als 35° , damit ergibt sich für die relevanten Bereiche der Szene eine mittlere Reliefausprägung. Die Winkel werden definiert über den tiefsten Punkt U und der Tangente der zu erfassenden Objekte. Liegt der Punkt U im Bereich von verdeckten, also nicht greifbaren Objekten, wird die Mitte der Objekte gewählt.

Das Relief ergibt sich wie dargestellt durch die Änderung der Höhe z über y . Die Höhenänderung über x (entlang der Rohre) ist minimal durch die Zwangslage der Objekte und ergibt keine bzw. nur minimale Reliefausprägungen.

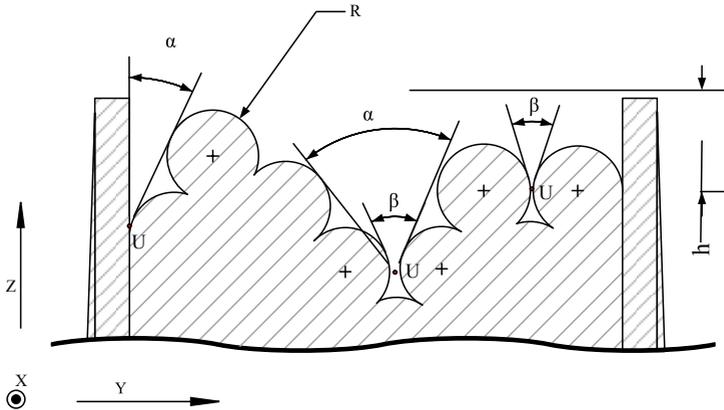


Abb. 5.30: Relief der gestapelten Objekte im Ladungsträger mit $\alpha \geq 35^\circ$ und $\beta \leq 20^\circ$ und $h \approx 1,5R$

Textur der Szene Das Bildaufnahmesystem muss auch fähig sein, das benannte Spektrum an Oberflächenbeschaffenheiten zu erfassen. Die Textur der Szene ergibt sich aus den Objekteigenschaften und differiert von Objekttyp zu Objekttyp. Die Objekt Oberfläche verfügt zum Teil über sehr geringe Reflektanzunterschiede, sodass die Textur durch das Relief der Szene, die Anordnung der Objekte im Ladungsträger, entsteht. Andere Objekt Oberflächen weisen Unterschiede in der Reflektanz durch Korrosionserscheinungen oder Spuren der zerspannenden Bearbeitung im Vorfeld auf.

Fremdlicht Der Standort der Anlage befindet sich in einer Produktionshalle mit Oberlichtern und Fensterfronten. Dies lässt keine eindeutig definierte Beleuchtung ohne massive mechanische Eingriffe zu. Es wird also eine Unempfindlichkeit gegenüber Fremdlicht verlangt und eine sichere Digitalisierung trotz unterschiedlicher Intensitäten in der Oberfläche der Szene.

Komplexität Ein gewisser Grad an Aufwand wird durch die Größe der Szene bestimmt, da diese sehr groß ist und eventuell ein spezielles Vorgehen erfordert. Ein weiterer Gesichtspunkt, der zur Gesamtkomplexität des Systems beiträgt, ist die Tatsache, dass unterschiedliche Bauteiltypen mit demselben System erfasst werden müssen. Dies ist bei der Auswahl des Bildaufnahmesystems ebenso zu beachten wie bei der Definition einer geeigneten Bildverarbeitungsstrategie.

Bewertung der Kriterien

Im Folgenden sind die Kriterien und ihre Bewertung in der Matrix, Abbildung 5.31, dargestellt und die Auswahl des Bildaufnahmesystems begründet. Aufgrund der nicht

	Stereo-Verfahren	Laser-triangulation	Streifenlicht-Verfahren	ToF-Verfahren	Anforderungen
laterale Auflösung	+	+	+	-	1320 Bildpunkte
tiefen Auflösung	- ^{1.}	+	+	-	±1,5 mm
Messbereich bzw. Messfeld	+	+	+	+	X=1800mm Y=1100mm Z=730mm
Bildrate/ Taktzeit	○	○	○	○	t _{BVS} =32s
Oberflächen- relief	○	○	○	○	mittlere Reliefausprägung
Textur der Szene	- ^{1.}	○	○	○	differiert
Fremdlicht	-	○	-	○	wechselnde Lichtverhältnisse
Komplexität des Verfahrens	2.	2.	2.	2.	-

+ positives Verhalten in diesem Bereich ○ neutral
 - negatives Verhalten in diesem Bereich

1. Korrespondenzproblem
 2. großes Messfeld kann Komplexität erhöhen

Abb. 5.31: Bewertungsmatrix zur Auswahl des Bildaufnahmesystems für die Handlungsaufgabe

möglichen Definition einer geeigneten Beleuchtung wurde im Vorfeld ein Stereokamerasystem als bildgebendes Verfahren bzw. Bildaufnahmesystem ausgeschlossen. Auch die differierende Oberflächentextur der Objekttypen sprechen gegen die Verwendung eines Stereokamerasystems aufgrund der Korrespondenzproblematik.

Der relativ große Messraum und die Vielfältigkeit der Oberflächen sowie die geforderte Genauigkeit von ± 1,5 mm ließen aufgrund der relativ geringen lateralen und Tiefenauflösung ToF-Verfahren basierend auf der PMD-Technologie als ungeeignet erscheinen, da zur Projektlaufzeit keine geeigneten Kameras mit den entsprechenden Eigenschaften zur Verfügung standen.

Auch die Projektion von Mustern, wie im Streifenlichtverfahren nötig, ergab aufgrund der unterschiedlichen Intensitäten der Oberfläche sowie den sich ändernden Fremdlichteinflüssen (Oberlicht) kein zufriedenstellendes Ergebnis.

Versuche im Rahmen einer Machbarkeitsstudie haben ergeben, dass die Digitalisierung der Szene (Ladungsträger mit Objekten) mittels Lasertriangulation mit punktueller Abtastung sehr robust ist. Die hohe Intensität des Laserlichtes erwies sich bei

der Szene als geeignetes Mittel zur Erzeugung einer geeigneten Struktur zur Triangulation der Tiefe.

Daraus entwickelte sich der Ansatz, die Szene mittels Lichtschnittverfahren zu digitalisieren. Der Entwurf sah vor, die Szene mit einem Bildaufnahmesystem, basierend auf dem Lichtschnittverfahren zu überfahren, wie in Abbildung 5.32 dargestellt. Es wird eine Anordnung mit zwei Linienprojektoren, Abbildung 5.32, gewählt, um die nötige Breite der Laserlinie zu erreichen, d.h. die Linien sind so überlagert, dass nur eine Linie über die gesamte Szenenbreite abgebildet wird.

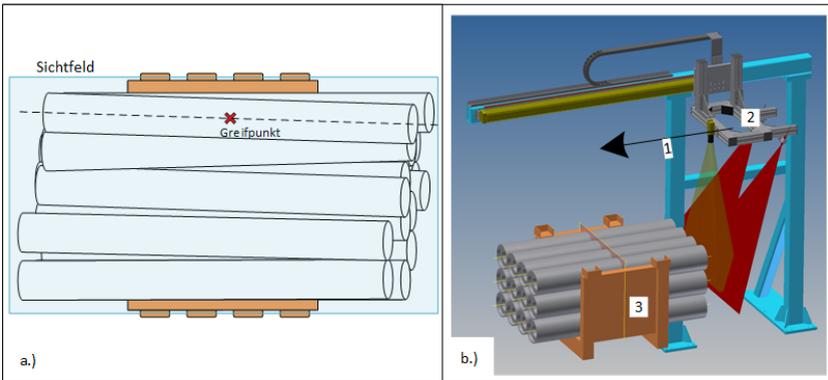


Abb. 5.32: a.) schematische Darstellung der Szene mit Sichtfeld und zu ermittelndem Greifpunkt b.) Entwurf des BVS bestehend aus: dem Schlitten mit Bildaufnahmesystem (2) zur Digitalisierung der Szene (3), Bahn des Lichtschnittsensors entlang (1)

Die nötige Tiefenauflösung ist in dem benannten Messraum problemlos erreichbar, da die Empfindlichkeit des Messprinzips durch Anpassung des Triangulationswinkels verbessert werden kann. Dieser Zusammenhang wurde in den Grundlagen 2.4.1 eingehend erläutert. Der verwendete Lichtschnittsensor liefert vorerst nur ein Höhenprofil der Szene. Dabei erfolgt die Zuordnung der aufgenommenen Punkte dem in Abbildung 5.28 festgelegten Koordinatensystem. Die triangulierte Höheninformation ist die Z-Koordinate, die Lage des Punktes auf dem Profil entspricht der Y-Koordinate. Durch die Aneinanderreihung der Profile ergibt sich die Digitalisierung der Szene. Der Verfahrensweg des Lichtschnittsensors wird an einen inkrementellen Weggeber gekoppelt, sodass die einzelnen Profile der entsprechenden Strecke zugeordnet werden können. Diese entsprechen dann der X-Koordinate zugeordnet im benannten Koordinatensystem.

In der Applikation wird ein Ranger E55 der Firma Sick als Bildaufnahmesystem verwendet. Der Ranger E55 arbeitet basierend auf dem Lichtschnittprinzip und die

Berechnung der 3D-Informationen erfolgt im Bildaufnahmesystem selber, sodass der Bildverarbeitung die 3D-Informationen sofort zugänglich sind.

Die Betrachtung der Genauigkeit der Tiefeninformationen erfolgt an dieser Stelle wie vom Hersteller des Bildaufnahmesystems [74] angegeben. Es wird die sogenannte „Specular Geometry“ Anordnung von Sensor zu Laser angewendet, siehe Abbildung 5.33 a.), bei der sich die Höhenauflösung δz wie folgt ergibt:

$$\Delta z \approx \frac{\Delta y \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (5.8)$$

wenn $\alpha = \beta$

$$\Delta z \approx \frac{\Delta y}{2 \sin(\alpha)} \quad (5.9)$$

mit Δy :

$$\Delta y \approx \frac{FOV}{\text{Sensor resolution}} \quad (5.10)$$

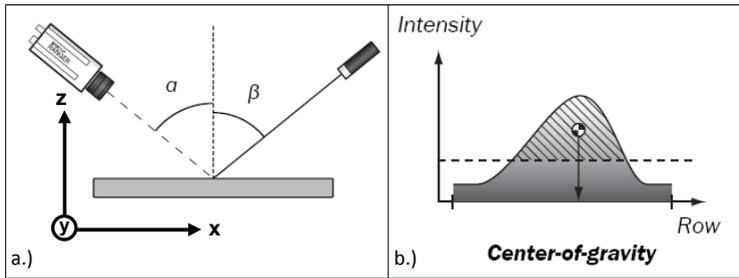


Abb. 5.33: a.) Specular Geometry Anordnung von Laser und Kamera. b.) Prinzip der Bestimmung der Position der Laserlinie. Quelle [74]

FOV ist das Field of View, also die Szenenbreite, die erfasst wird, hier 1100mm. Die Auflösung des Sensors ist mit 1536pix angegeben. Daraus ergibt sich $\Delta y \approx 0,716 \frac{mm}{pix}$ und bei einem Winkel von $\alpha = \beta = 40^\circ$ ein $\Delta z \approx 0,480 \frac{mm}{pix}$. Die verwendeten Zusammenhänge aus [74] sind Näherungswerte und implizieren, dass die entsprechenden Objektive für das angegebene FOV ausgewählt werden und die Abbildung des Lasers mit einer entsprechenden Fokussierung erfolgen kann. Für die Abschätzung und Projektierung sind diese Zusammenhänge jedoch ausreichend. Die beschriebene Anordnung von Projektionslaser zur Kamera hat den Vorteil, dass so nahezu alle Oberflächen von dunkel und matt bis hin zu leicht glänzend erfasst werden können. Bei der Applikation wird zur Verbesserung der Genauigkeit der sensorinterne „Hi3D Algorithmus“ verwendet - eine Methode ähnlich der Schwerpunktbestimmung, um

die Position der Laserlinie auf dem Sensor zu bestimmen, siehe Abbildung 5.11 b.). Die Höhenauflösung liegt bei diesem Verfahren dann theoretisch bei $1/16$ eines Pixels. Eine detailliertere Betrachtung der Genauigkeit erfolgt nicht, da bereits den Vorgaben entsprochen ist, so kann die Subpixelgenauigkeit als Funktionsreserve betrachtet werden. Die so gewählte Anordnung von Bildaufnahmesystem und Trajektorie über die Szene bietet zudem den Vorteil, dass die Bildgröße in X-Richtung exakt an die jeweiligen Objektlängen angepasst werden kann. Die konvexe Form des zylindrischen Objektes mit senkrecht zur Achse stehenden Laserlinie, ist zudem optimal für die optischen Eigenschaften des Bildaufnahmesystems basierend auf dem Lichtschnittverfahren geeignet.

Zudem wurden eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt, inwieweit das Bildaufnahmesystem für die unterschiedlichen Oberflächen geeignet ist. Die Ergebnisse der Digitalisierung unterschiedlicher Bauteiltypen sind in Abbildung 5.34 dargestellt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Belichtung bei dem System nur so angepasst werden muss, dass die Oberflächenstruktur nicht mit abgebildet wird, sondern nur die Laserlinie im Kamerabild sichtbar ist. Dies kann erreicht werden, indem jegliches Fremdlicht mittels Sperrfiltern vor dem Objektiv ausgeschaltet wird.

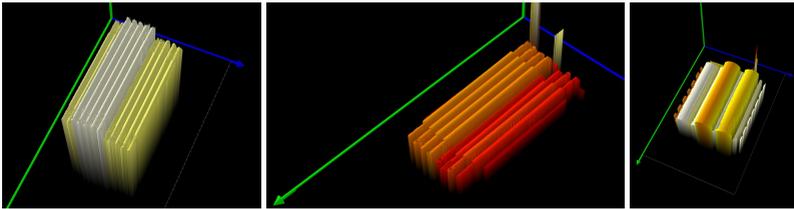


Abb. 5.34: Darstellung der digitalisierten Szene mit unterschiedlichen Bauteiltypen

BV-Strategie

Aus der Beschreibung der Szene und des Bildaufnahmesystems geht hervor, dass die Bildverarbeitungssoftware die Segmentierung der Objekte aus der gesamten Szene vornehmen muss. Das bedeutet, es muss zuerst eine Trennung von zu greifenden Objekten und Störkonturen, wie beispielsweise dem Ladungsträger, erfolgen. Es erfolgt eine erste Filterung der Punktwolke, die Bildrauschen und Fehlinformationen entfernt. Aus der gleichbleibenden Position, an die der Ladungsträger mit den Objekten in den Prozess gefördert wird, resultiert eine relativ gleichbleibende Position des Ladungsträgers in der erfassten Szene. Dieser Zusammenhang ermöglicht, dass mittels einfacher Abgrenzung einer Region of Interest²(ROI) eine Selektion zwischen Förder-

²mit Region of interest, übersetzt "Bereich von Interesse", wird der für die Bildauswertung und Bildanalyse besonders relevanten Bildbereiche bezeichnet

hilfsmittel bzw. Ladungsträger und Objekten erfolgen kann. Es wird mittels ROI der innere Bereich des Ladungsträgers als Suchbereich eingegrenzt.

Ausgehend von dieser Selektion kann mit der Extraktion der zu greifenden Objekte begonnen werden. Mittels eines morphologischen Filters kann im Vorfeld dafür gesorgt werden, dass Bildbereiche, in dem sich die Objekte berühren, eliminiert werden. Für die Selektion der einzelnen Objekte sollen die Z-Koordinaten der Punkte mittels einer Art Region Growing, vgl. [75], verglichen und segmentiert werden. Dazu werden die 3D-Daten in Regionen mit gleichen Z-Koordinaten in Gruppen von 3×3 Punkten gerastert. Ausgehend vom Mittelpunkt dieser Gruppe wird in der Nachbarschaft nach gleichen Punkten mit denselben oder annähernd denselben Z-Koordinaten gesucht. Durch das Hinzufügen dieser gleichen Nachbarschaftspunkte wächst die Region, die ein Objekt darstellt. Der Parameter, der zur Entscheidung führt, ob benachbarte Punkte zur selben Region gehören oder nicht, ergibt sich aus den Durchmessern der Objekte, deren Greifpunkt ermittelt werden soll.

Sind Z_1 und Z_2 zwei zu untersuchende Z-Koordinaten, dann gehören sie zur gleichen Region, falls:

$$|Z_1 - Z_2| < X_{Tolerance} \quad (5.11)$$

Der Wert von $X_{Tolerance}$ wird mittels eines Lookup-Tables anhand des Durchmessers bestimmt. Besteht eine so gebildete Gruppe aus zu wenigen Punkten, wird diese verworfen. Der Durchmesser für die Adaption der Werte wird der Bildverarbeitungssoftware durch das Prozessleitsystem zur Verfügung gestellt. Dieses Vorgehen dient der Segmentierung der einzelnen Objekte der obersten Lage. Anschließend werden von den erkannten Objekten die Mittelpunkte sowie die Scheitellinien für die Berechnung des Greifpunktes bestimmt. Dabei ergibt sich die X-Koordinate des Greifpunktes aus dem Mittelpunkt bezogen auf die ermittelte Länge des Objektes.

Für die Entnahme mittels Roboter ist neben dem eigentlichen Greifpunkt auch die Orientierung des Objektes benötigt, die Orientierung bestimmt den Winkel, mit dem der Robotergreifer geführt werden muss; dies gewährleistet die optimale Verbindung zwischen Magnetgreifer und Objekt. Der Abstand des Magnetgreifers zum Objekt wird Mittels Δg_1 und Δg_2 beschrieben. Δg_1 und Δg_2 sind die Abstände der Flanken des Magnetgreifers zum Bauteil, siehe Abbildung 5.35. Da die Fläche des Greifpunktes, an dem der Greifer das Objekt berührt, parallel zur Scheitellinie des Objektes sein muss, um ein Verkleben oder ein Abreißen der Greifkraft aufgrund von Fehlpозиtionierung zu vermeiden, muss Δg_1 gleich Δg_2 sein, wie in Bild 5.35 dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass der Magnetgreifer richtig orientiert zu der Lage des Objektes (definiert durch die Winkel, die sich aus der Scheitellinie ergeben) positioniert werden muss, da sonst nicht die gesamte Kontaktfläche des Greifers genutzt wird. Die Extraktion der Scheitellinie eines Objektes kann mittels einer einfachen Betrachtung der Z-Koordinaten, der Punkte der zuvor extrahierten Punktregionen, erfolgen, wobei die lokalen Maxima die Scheitellinie bilden. Diese bestimmt die Lage des Objektes im Raum und damit die Winkel, mit dem der Robotergreifer geführt werden muss.

Dieses Vorgehen wird für die gesamte obere Lage der Objekte durchgeführt, um durch

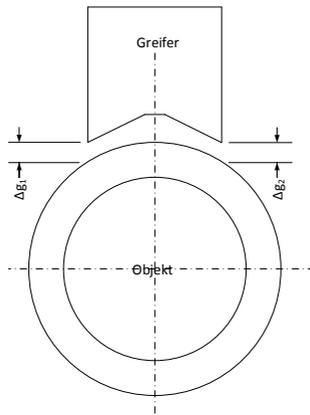


Abb. 5.35: Darstellung der Greiferkontur über einem Objekt.

Auswahl des am günstigsten zu greifenden Objektes eine Strategie für das Greifen zu entwickeln und etwaige Kollisionen zu vermeiden.

Als Strategie bietet es sich an, die Z-Koordinaten der ermittelten Greifpunkte zu untersuchen und das Objekt zu ermitteln, das dem Roboter am Nächsten liegt. Dabei ist R der Punkt des Robotertools in Warteposition und O_n der Mittelpunkt des Objektes n . Als zu greifendes Objekt wird das Objekt n ausgewählt, für das $|R\vec{O}_n|$ am kleinsten ist.

Die Daten werden dann an die Kommunikationsschnittstelle gegeben, welche diese dem Roboter in geeigneter Form zugänglich macht. Bei der hier gewählten Anordnung von Roboter und Bildaufnahmesystem muss, neben der Kalibrierung des Bildaufnahmesystems an sich, auch das Problem der unbekanntenen relativen Lage von Bildaufnahmesystem zu Roboter betrachtet werden. Das bedeutet, es muss eine Beziehung zwischen den Komponenten hergestellt werden, da sich Roboter und Lichtschnittsensor bewegen.

Die Ermittlung dieser relativen Lage der Komponenten zueinander muss auch noch in die Bildverarbeitungssoftware integriert werden. In der Literatur wird dieser Zusammenhang als Hand-Auge-Kalibrierung bezeichnet, vgl. hierzu [76]. Für die beschriebene Applikation kann eine Methode zur Kalibrierung verwendet werden, die mittels eines Kalibrierkörpers einen gemeinsamen Ursprung von Kamera- und Roboterkoordinatensystem festlegt. Das bedeutet im Wesentlichen, den Bildpunkten werden entsprechend dem Roboterkoordinatensystem neue Ortskoordinaten zugewiesen. Die beschriebene Systematik erzeugt dann ein gemeinsames Koordinatensystem, das auch schon in Abbildung 5.28 dargestellt wird.

Zusammenfassung Phase 2

Ausgehend von der Anforderungsanalyse und den Kenngrößen, die für die definierte Aufgabenstellung bestimmt worden sind, lassen sich die Punkte zur Definition und Projektierung des BVS zur Übersicht in dem folgenden UML Klassendiagramm, Abbildung 5.36 festhalten. Das Klassendiagramm verdeutlicht die Anforderungen und das erarbeitete Grundkonzept anschaulich.

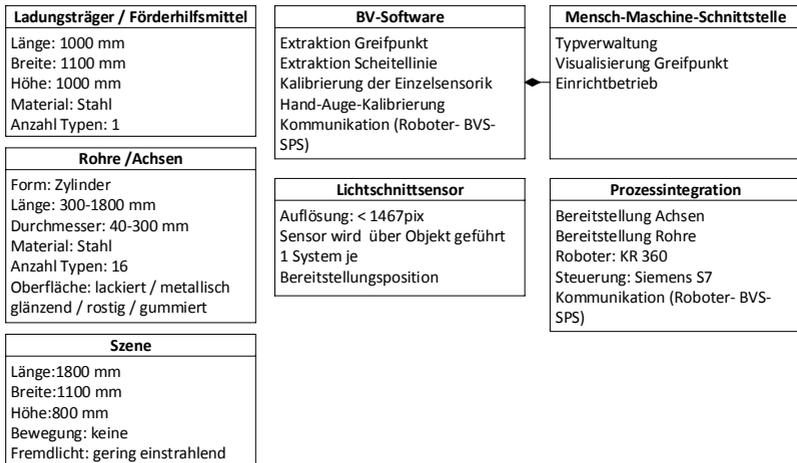


Abb. 5.36: Übersicht der Merkmale des BVS in einem Klassendiagramm

5.5.3 Phase 3: dynamische Analyse

Integration in die Prozessumgebung

Das ausgewählte Bildaufnahmesystem muss über die Szene geführt werden, um diese zu digitalisieren. Hierzu musste zunächst analysiert werden, ob eine solche geführte Sensorik in den bereits bestehenden Prozess integrierbar ist. Für die Analyse dieses Sachverhalts wurde mittels Konstruktionsdaten der bestehenden Anlage und der hinzuzufügenden Komponenten eine Simulation der kinematischen Abläufe der Anlage geschaffen. So können während der Projektierung die kinematischen Abläufe erfasst und die Führung der Sensorik optimal in die bestehende Anlage und Robotertrajektorie integriert werden.

Neben der Evaluierung der konstruktiven Gegebenheiten muss auch die Einbindung und Interaktion des BVS mit dem bestehenden Prozess und dem Roboter betrachtet werden. Für den Entwurf wurde das folgende Kommunikationsdiagramm, Abbildung 5.37, gestaltet. Es werden die Akteure Prozess, BVS, Roboter und die Klasse Bild-

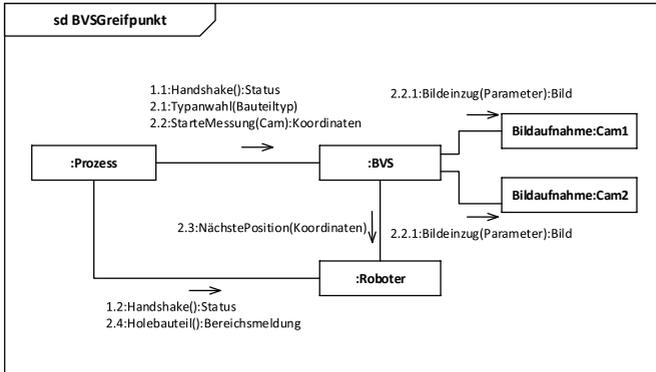


Abb. 5.37: Kommunikationsdiagramm zur Bestimmung der Interaktionen zwischen den Elementen der Anlage

aufnahmesystem 1 und die Klasse Bildaufnahmesystem 2 dargestellt und die nötige Interaktion für die Lösung des Automatisierungsproblems hinzugefügt. Dabei werden Kommunikation und Interaktion so gestaltet, dass möglichst wenig Veränderung in der Struktur der bestehenden Steuerung des Prozess erfolgen muss.

Das bedeutet, die Interaktion wird hauptsächlich vom Prozess ausgelöst. Die Steuerungsstrategie sieht vor, dass die Prozesssteuerung die Koordination des Gesamtablaufs übernimmt, wie es auch vor der Integration des BVS passierte. Die Prozesssteuerung bestimmt also BVS und Roboter, die Kommunikation zwischen Roboter und BVS ist minimal. Dies bietet den Vorteil, dass das BVS in sich geschlossen bleiben kann. Der Ablauf des Systems wird damit von der übergeordneten Steuerung koordiniert.

Verhalten des Objektes im Prozess

Das Verhalten des Objektes im Prozess ist festgelegt. Das bedeutet, die Ladungsträger werden an eine festgelegte Position in den Prozess gefördert. An dieser Position müssen die Ladungsträger mit den Bauteilen digitalisiert werden.

Die Entnahme des Bauteils erfolgt ebenfalls an dieser Stelle. Ist ein Ladungsträger geleert, wird er ausgeschleust und der nächste befüllte Ladungsträger wird eingeschleust. Die Steuerung dieses Ablaufs wird durch die Prozesssteuerung übernommen.

Eine Meldung, dass der Ladungsträger leer ist, muss vom BVS an die Prozesssteuerung übergeben werden. Eine Funktion zur Identifikation des leeren Ladungsträgers oder nicht mehr greifbare Bauteile muss in der BV-Software implementiert werden. Die Ladungsträger werden so befüllt, dass das gesamte Volumen ausgenutzt wird. Daraus ergibt sich eine grobe Orientierung der Bauteile, wie schon in Abbildung 5.28 dargestellt.

Die bestehende Anlage und der darauf ablaufende Prozess gestatten keine Einflussnahme auf das Verhalten des Objektes bzw. der Szene. Die Digitalisierung kann nur erfolgen, wenn die Ladungsträger ordnungsgemäß in Position sind. Mit der Implementierung des BVS und aus dem bestehenden Prozess ergeben sich die folgenden Zustände, Abbildung 5.38 für den Bereich der Abholpositionen mit den Ladungsträgern. Das Zustandsdiagramm gilt für beide Abholpositionen und beide Bildaufnah-

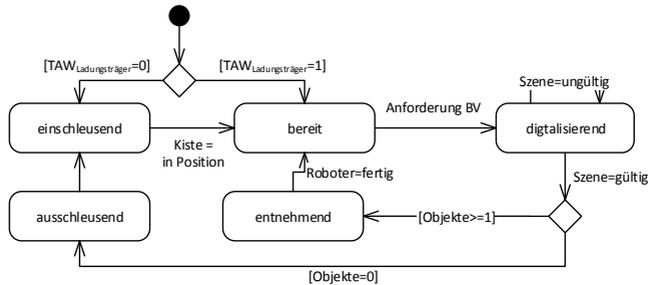


Abb. 5.38: Zustandsdiagramm für die Anlage im Bereich der Szene

mesysteme. Die darin vereinbarten Zustände gelten als Richtlinie für die Steuerung der Anlage und die Implementierung des BVS. Eine detaillierte Darstellung erfolgt nicht, da dies im Aufgabenbereich der Anlagensteuerung liegt, die nicht Teil dieser Arbeit ist.

Digitalisierungsablauf

Der Ablauf der Digitalisierung wird in den Gesamtplan des Prozesses integriert. Es wird, wie festgelegt, ein Bildaufnahmesystem basierend auf dem Lichtschnittverfahren verwendet.

Das System muss zur Digitalisierung über die Szene geführt werden. Die Digitalisierung findet unmittelbar vor dem Greifen des Objektes statt. Nach der Digitalisierung erfolgt die Bildverarbeitung. Diese übergibt die nötigen Parameter an den Roboter, der dann das jeweilige Bauteil greift und dem nachfolgenden Prozessschritt übergibt. Der Ablauf ist in Abbildung 5.39 als Aktivitätsdiagramm dargestellt. Ausgehend von der beschriebenen Bildverarbeitungsstrategie, also Digitalisierung der oberen Lage

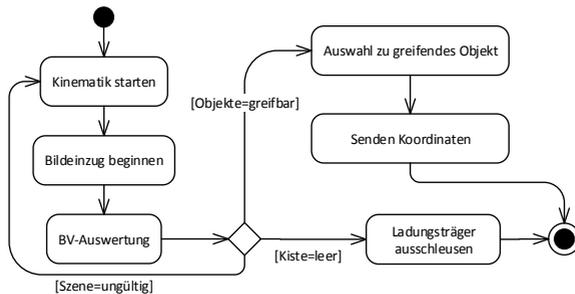


Abb. 5.39: Ablauf der Digitalisierung einer Abholposition

der Objekte und Berechnung aller Greifpunkte, erscheint es möglich, alle greifbaren Objekte abzuräumen. Ein entnommenes Objekt kann durch eine Kollision oder das Tangieren nicht gegriffener Objekte dazu führen, dass sich eine Änderung in der Position des nächsten zu greifenden Bauteils ergibt. Da diese Möglichkeit besteht, muss nach jeder Entnahme eines Objektes neu digitalisiert und wieder nach dem oben beschriebenen Verfahren das zu greifende Objekt bestimmt werden.

Das beschriebene Vorgehen und die einzelne Übergabe der Koordinaten des zu greifenden Objektes bietet den Vorteil, dass die bestehende Grundsystematik des Programmablaufs des Roboters mit geringen Änderungen beibehalten werden kann. Es wird eine Vorposition über dem Ladungsträger angefahren, danach werden die übergebenden Koordinaten anstelle der vorher eingelernten Abholposition angefahren und das Objekt gegriffen.

5.5.4 Phase 4: Entwurf des Systems

Die Implementierung des Systems in die bestehende Produktionsanlage ergibt sich aus den in der Analyse festgehaltenen Punkten. Der Entwurf des BVS sieht das im Folgenden dargestellte Anlagenlayout vor, siehe Abbildung 5.40. Aus dem dargestellten Anlagenlayout und dem beschriebenen Verhalten der Einzelsysteme bei den jeweiligen Abholpositionen ergibt sich der folgende Ablauf für die Produktionsanlage mit integriertem BVS:

1. Digitalisierung Bereitstellungsposition 2
2. Entnahme Bauteil Bereitstellungsposition 2
3. Digitalisierung Bereitstellungsposition 3

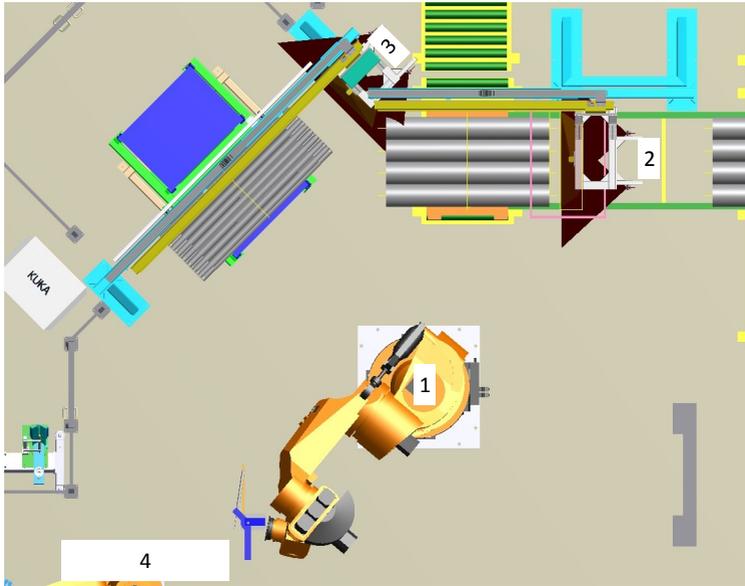


Abb. 5.40: Anlagenlayout 1.) Industrieroboter für das Handling der Objekte 2.) Förderhilfsmittel erste Abholposition (Rohre) und Schlitten mit Bildaufnahmesystem 3.) Förderhilfsmittel zweite Abholposition (Achsen) und Schlitten mit Bildaufnahmesystem 4.) Verarbeitungsstation.

4. Entnahme Bauteil Bereitstellungsposition 3
5. Übergabe der Bauteile in weiteren Prozessschritt 4

Die Kommunikation mit dem Roboter und der Prozessperipherie wird durch die bereits existente speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Produktionsanlage abgewickelt. Das Leitsystem der Anlagensteuerung der Produktion gibt dem Bildverarbeitungssystem den angewählten Objekttyp vor, sodass das Bildverarbeitungssystem anhand von Durchmesser und Länge der Objekte mittels der look up table die jeweiligen Greifpunkte auf den Objekten extrahieren kann, ohne dass ein manueller Eingriff in das Vision-System zur Typenwahl erfolgt. An dem HMI des BVS wird lediglich, wie in den Anforderungen gefordert, eine Visualisierung des aktuellen Prozesses dargestellt. Dabei wird die Digitalisierung der Szene gezeigt, in welche die extrahierten Greifpunkte und deren Priorisierung eingeblendet wird, vgl. Abbildung 5.41.

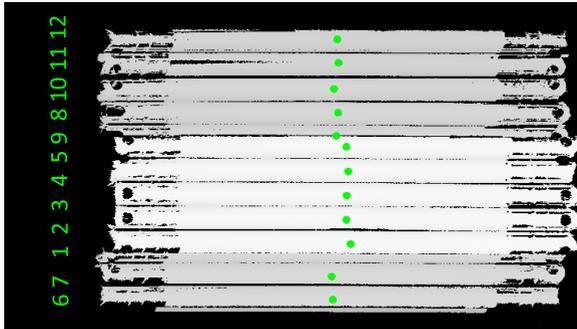


Abb. 5.41: Visualisierung der errechneten Greifpunkte der obersten Lage.

Der Funktionsumfang für Einrichtpersonal ist erweitert. Dieser umfasst die Kalibrierung der Bildaufnahmesysteme und die Parameterverwaltung sowie Kommunikationseinstellungen. Um die Effektivität des Prozesses zusätzlich zu erhöhen, wurden in die Bildverarbeitungssoftware noch zusätzlich Funktionen implementiert, die erkennen, ob alle Objekte aus einem Ladungsträger entnommen wurden bzw. nur noch ein einzelnes Objekt in dem Ladungsträger ist, sodass ohne Zeitverzug ein neuer Ladungsträger bereitgestellt werden kann.

Ausgehend von der statischen und dynamischen Analyse des Systems ergibt sich ein BVS, das sich aus den in Abbildung 5.42 dargestellten Objekten zusammensetzt. Das so projizierte System wird zur Greifpunktbestimmung im Produktionsprozess eingesetzt. Das BVS ermöglicht die Bestimmung der Greifpunkte von den beschriebenen Objekten. Dadurch ist der Roboter nicht mehr an die fest eingelernte Reihenfolge und Ordnung der Objekte gebunden. Die Ladungsträger werden nun so befüllt, dass das gesamte Volumen ausgenutzt wird. Das beschriebene Automatisierungsproblem konnte gelöst werden.

Durch die beschriebene Lösung kommt es zu einer deutlichen Entlastung des Bedienpersonals, da vorher die festgelegte Stapelordnung der Objekte in den Ladungsträgern manuell überwacht und gegebenenfalls hergestellt werden musste. Dies bedeutet die Verringerung des nötigen Personals zur Bedienung und zum Beschicken der Produktionsanlage.

Die Befüllung der Ladungsträger mit mehr Objekten erhöht den Durchsatz der Anlage zusätzlich, da die Zeiten für das Ein- und Ausschleusen von Ladungsträgern verringert werden, welche vorher die Taktzeit erhöht haben. Standzeiten bzw. Ausfallzeiten aufgrund von fehlbestückten Ladungsträgern können sogar vollständig vermieden werden. Insgesamt wird durch die realisierte Automatisierungslösung die Wirtschaftlichkeit der Produktionsanlage deutlich verbessert.

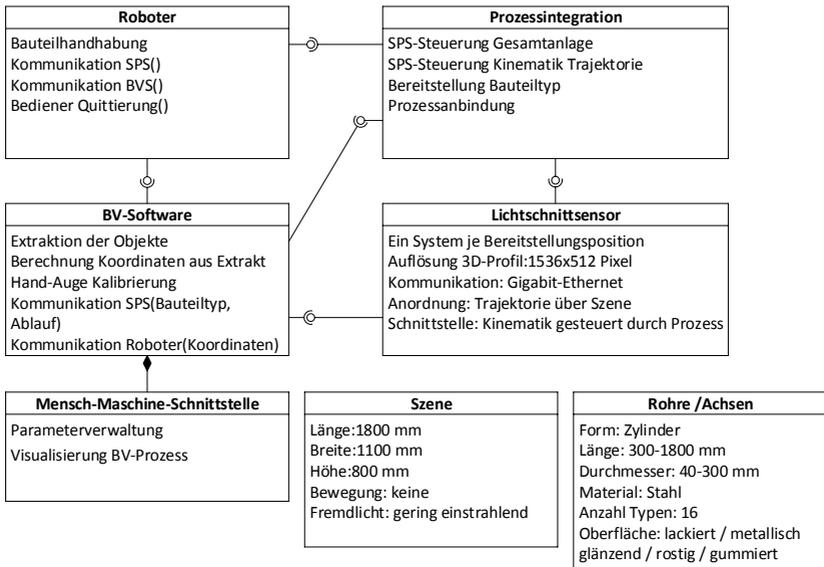


Abb. 5.42: Zusammenfassung der Objekte des BVS als Klassendiagramm

5.6 Messergebnisse

Die Funktionsfähigkeit des BVS wurde im Rahmen der Abnahme des Produktionssystems nachgewiesen. Das heißt, es wurde lediglich nachgewiesen, dass mittels BVS die Koordinaten des nächsten zu greifenden Bauteils ermittelt werden können und eine sichere Handhabung des Objektes im Prozess erfolgt.

Die Gesamtanlage arbeitet innerhalb der geforderten Richtlinien. Die Bildverarbeitung gewährleistet einen sicheren kontinuierlichen Ablauf und die geforderte Verfügbarkeit der Produktionsanlage. Hinsichtlich der Qualität der von dem BVS gelieferten Messergebnisse bedeutet dies, dass mit den extrahierten Koordinaten das Objekt sicher gegriffen und sicher gehandhabt werden kann. In der Anlaufphase und der Produktion konnten keine relevanten Standzeiten basierend auf Störungen des BVS nachgewiesen werden.

An dieser Stelle erfolgt eine kurze Betrachtung der Genauigkeit der durchgeführten Messreihen, die nicht im Rahmen der eigentlichen Abnahme durchgeführt worden ist, sondern zur Vollständigkeit dieser Arbeit beitragen sollen.

Für die Betrachtung der Messwerte wurden Szenen ausgewertet, die im Rahmen des Produktionsprozesses mehrmals digitalisiert wurden. Im Folgenden ist jeweils die Szene und die sich daraus ergebenden Messwertbetrachtung dargestellt. Es handelt sich jeweils um eine Anzahl n Digitalisierungen, bei diesen wurde nach Ermittlung der Koordinaten der Greifprozess abgebrochen, sodass die Szene erneut digitalisiert und ausgewertet werden konnte, ohne dass sich diese verändert.

Als Messergebnisse werden die ermittelten Roboterkoordinaten herangezogen. Es werden jeweils die Koordinaten der Objekte, die dem Roboter am Nächsten liegen, untersucht und dargestellt.

Die statistische Betrachtung der Messergebnisse erfolgt wie in Kapitel 5.2. Im Folgenden, Abbildungen 5.43-5.46, sind die Messreihen dargestellt. Hier ist n die Anzahl der Messergebnisse, aus diesen ergibt sich der Korrekturfaktor t bei einem Vertrauensniveau von 95% der t-Verteilung.

Das arithmetische Mittel \bar{x}_i , die Standardabweichung σ_i und die Unsicherheit der Messwerte $\Delta\bar{x}_i$ für die Koordinaten X, Y, Z werden den ermittelten Objekten i zugeordnet. Außerdem wird die jeweilige Szene mit der Markierung der Position des Objektes i als Projektion auf ein Intensitätsbild der Szene dargestellt.

Die Messergebnisse verdeutlichen, dass das System in dem angegebenen Genauigkeitsbereich arbeitet und die Anforderungen erfüllt.

	X	Y	Z
mit	n=3	t=4,3	
\bar{x}_1	-542,59	502,77	413,09
\bar{x}_2	-466,44	488,69	368,02
σ_1	0,21598	0,14630	0,17049
σ_2	0,19268	0,13303	0,18264
$\Delta\bar{x}_1$	0,5362	0,3632	0,4233
$\Delta\bar{x}_2$	0,4784	0,3303	0,4534

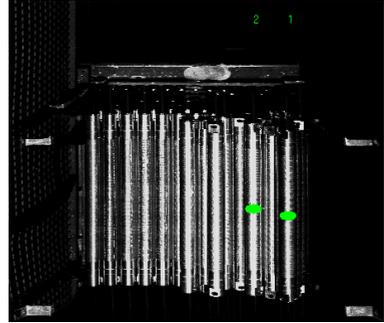


Abb. 5.43: Messreihe 1 Achse Durchmesser $D = 50\text{mm}$ und Länge $l = 975\text{mm}$

	X	Y	Z
mit	n=3	t=4,3	
\bar{x}_1	-442,49	498,03	324,51
\bar{x}_2	-493,63	496,90	325,64
σ_1	0,2200	0,4160	0,0526
σ_2	0,2061	0,4734	0,0233
$\Delta\bar{x}_1$	0,5461	1,0327	0,1305
$\Delta\bar{x}_2$	0,5116	1,1754	0,0579

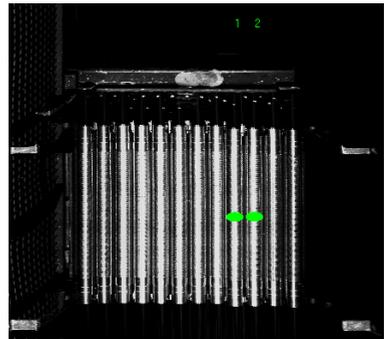


Abb. 5.44: Messreihe 2 Achse Durchmesser $D = 50\text{mm}$ und Länge $l = 975\text{mm}$

	X	Y	Z
mit	n=3	t=4,3	
\bar{x}_1	-760,04	620,07	187,00
σ_1	0,4882	0,4581	0,0165
$\Delta\bar{x}_1$	1,2121	1,1374	0,0410

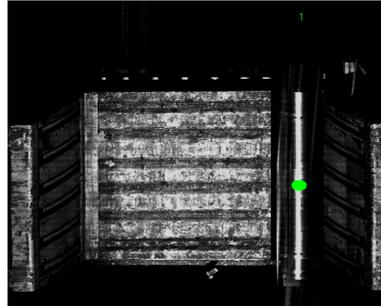


Abb. 5.45: Messreihe Rohr Durchmesser $D = 193\text{mm}$ und Länge $l = 900\text{mm}$

	X	Y	Z
mit	n=6	t=2,57	
\bar{x}_1	-166,04	638,87	452,42
\bar{x}_2	-312,60	641,82	453,58
σ_1	0,2771	0,0045	0,0112
σ_2	0,0553	0,0020	0,0084
$\Delta\bar{x}_1$	0,2907	0,0047	0,0117
$\Delta\bar{x}_2$	0,0580	0,0021	0,0088

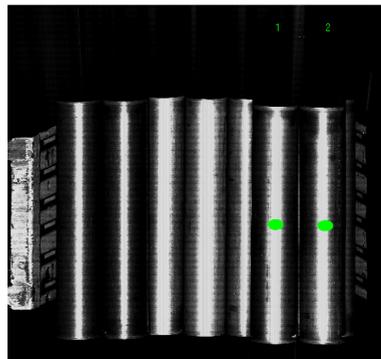


Abb. 5.46: Messreihe Rohr Durchmesser $D = 133\text{mm}$ und Länge $l = 1100\text{mm}$

Kapitel 6

Bewertung der Methodik

In Kapitel 5 wurden mit der vorgestellten Methodik Bildverarbeitungssysteme und deren Anforderungen analysiert und daraus ein Entwurf für die Lösung des Automatisierungsproblems entwickelt.

Es wurde gezeigt, dass die Methodik erfolgreich für die Projektierung von BVS im Rahmen des Sondermaschinenbaus verwendet werden kann. Bei den vorgestellten Applikationen und deren Entwurf konnten alle Anforderungen für die Lösung des Automatisierungsproblems erfasst und übersichtlich dargestellt werden. Die einzelnen Phasen der Methodik sind im Folgenden zusammengefasst.

Die Anforderungsanalyse dient den folgenden Punkten:

- Strukturierung der Anforderungen
- Beschreibung der Beziehungen
- Betonung des Wesentlichen

Zur Modellierung und Erfassung der Anforderungen werden Anwendungsfälle genutzt und in Form von Use-Case-Diagrammen festgehalten.

Die statische Analyse wird in drei Punkte unterteilt,

1. Analyse der Objekteigenschaften
2. Prüfung der Eignung des Bildaufnahmesystems anhand von:
 - Sichtfeld bzw. Messraum
 - laterale Genauigkeit
 - Tiefengenauigkeit
 - Bildrate/Taktzeit
 - Oberflächenrelief
 - Textur der Szene
 - Fremdlicht
 - Komplexität
3. Festlegung der BV-Strategie

Die in der Analyse gewonnenen Parameter werden in Form einer Bewertungsmatrix dargestellt, um eine Übersicht der wesentlichen Kriterien zu geben und eines der Problematik entsprechenden Bildaufnahmesystem auszuwählen. Ausgehend von diesen Punkten werden die wesentlichen Kriterien, wie Objekteigenschaften, Szene und Bildaufnahmesystem des BVS in Form von Klassen festgehalten und in einem Klassendiagramm darstellt.

Die dynamische Analyse ist in drei Punkte unterteilt, welche das System aus unterschiedlichen Sichten betrachten:

1. Integration des BVS in die Prozessumgebung - Kommunikationsdiagramm
2. Definition Verhalten des Objektes in der Prozessumgebung - Zustandsdiagramm
3. Ablauf der Digitalisierung - Aktivitätsdiagramm

Dieses Vorgehen wird genutzt, um damit die nötigen Abläufe und Interaktionen zwischen den beteiligten Objekten darzustellen und zu analysieren, es dient der:

- Schnittstellendefinition
- Bestimmung Kommunikationsablauf
- Ablauf des BVS

Der Entwurf des Systems fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen, daraus lässt sich ein Klassendiagramm entwickeln, das die im Rahmen der Analyse betrachteten Objekte des BVS mit ihren Eigenschaften und Schnittstellen darstellt. Ein Anlagenlayout stellt den mechanischen Aufbau des Systems dar. Dieser Entwurf steuert die Integration des BVS in den Gesamtprozess, so dass dieser ohne Hemmnisse verlaufen kann.

Die Darstellung konstruktiver, sensorischer und softwaretechnischer Elemente des BVS in Form von Objekten bestätigt den interdisziplinären Ansatz der Methodik. Die gewählte Darstellungsform mittels UML erleichtert das Verständnis für alle beteiligten Disziplinen bzw. Abteilungen. Dies wäre mit einem rein software- oder hardwareorientierten Ansatz oder der üblichen konstruktiven Beschreibung einer Automatisierungslösung nicht möglich.

Im Rahmen der Projektierung der BVS unter der zu Hilfenahme der entwickelten Methodik fiel auf, dass es keine deutliche Abgrenzung zwischen Phase 1, der Anforderungsanalyse, und Phase 2, der statischen Analyse, gibt.

In den Anfragen zur Lösung eines Automatisierungsproblems an den Integrator bzw. Sondermaschinenbauer, d.h., bei der Beschreibung der Aufgabenstellung wird oft kein geeignetes Lastenheft definiert. Dies wird in den dargestellten Projekten durch den unterschiedlichen Umfang der kundenseitig gegebenen Anforderungen deutlich. Bei allen drei Applikationen wird in den Anforderungen nur der Kern der Funktionalität gegeben.

Erst bei der statischen Analyse des Problems und der Anforderungen erfolgt durch gezielte Rückfragen zum Prozess oder System die Definition relevanter Aspekte für

die Automatisierungslösung.

Daraus ergibt sich ein fließender Übergang von Anforderungsdefinition und Lösungsentwurf. Dies bestätigt, dass eine gute Kommunikation zwischen Integrator und Kunden essentiell für die Bearbeitung und Lösungsfindung bei solchen komplexen Projekten ist.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit bearbeiteten Projekten fiel auf, dass die für die Kommunikation mit dem Kunden gewählte Darstellungsformen UML und deren Methoden gut geeignet sind. Die Darstellungen sind oft intuitiv verständlich und die Vorstellung bestimmter Lösungsansätze oder die gemeinsame Analyse von vorhandener Peripherie sind effizient durchführbar.

6.1 Besondere Merkmale des vorgestellten Ansatzes

Die vorgestellte Methode stellt einen ganzheitlichen Ansatz zur Betrachtung von BVS im Rahmen der Produktionstechnik dar. In Gegenüberstellung mit den in der Literatur vorgestellten Ansätzen ist die hier entwickelte Methodik wesentlich umfassender und zielt auf die Verbindung der einzelnen Elemente eines BVS mit der Produktionstechnik.

Die Methodik bietet mit den ersten beiden Phasen, Anforderungsanalyse und statische Analyse, die Möglichkeit, das BVS hinsichtlich seiner Aufgabe in der Produktionstechnik genau zu betrachten und die nötigen Spezifikationen festzulegen. Diese beschriebene Möglichkeit, um daraus ein Pflichten- bzw. Lastenheft zu entwickeln, ist bisher nur in der relativ neuen VDI 2632 Richtlinie zu finden. In dieser wird definiert, welche Aspekte zwingend für die Beschreibung eines BVS erforderlich sind. Es wird jedoch nicht auf die konkrete Lösungsfindung hin gearbeitet, sondern eher eine reine Definition von Spezifikationen und Kenngrößen gegeben.

Dies bestätigt den hier verfolgten Ansatz, auch 3D-Bildverarbeitungssysteme zu systematisieren und den Integratoren solcher Systeme über den Ansatz des Lasten- und Pflichtenhefts Methoden zur Umsetzung solcher Systeme zu geben. Gerade dieser umsatzbetonte Ansatz zur effektiven Lösungsfindung im Rahmen der Automatisierungsprojekte ist neuartig und bietet die für die Produktionstechnik wichtige Effektivität und Wirtschaftlichkeit.

Die in der statischen Analyse gewonnenen und festgehaltenen Erkenntnisse spiegeln die in VDI 2632 beschriebenen Kenngrößen eines BVS wieder. Die Methodik bietet jedoch zusätzlich eine Unterstützung zur Auswahl eines adäquaten BVS für 3D-Aufgaben. Die VDI 2632 dient hingegen als Hinweise für die Erstellung eines Lastenhefts bzw. eines Pflichtenhefts und soll damit die Kommunikation zwischen Anbietern von Bildverarbeitungssystemen und Anwendern unterstützen. Zudem zielt diese Richtlinie primär auf die Entwicklung von 2D-BVS und geht kaum auf die Besonderheiten von 3D-BVS ein. Der Schwerpunkt der Literatur, die sich mit Bildverarbeitung für die Produktionstechnik befasst, liegt meist im Bereich der 2D-Bildverarbeitung und behandelt 3D-BV meist als Sonderfall. So auch [14], der den Bereich der 3D-Bildverarbeitung als zunehmend wichtig betrachtet, aber darauf hinweist, dass dieser

von der Vielfalt seiner Erfassungstechniken geprägt ist und daher nur exemplarisch darauf eingeht.

Die Beschreibung der Eignung von 3D-Bildaufnahmesystemen und deren Methoden ist zudem meist nur in der grundlegenden Literatur zu finden. Diese gibt detailliert über die Bildaufnahmesysteme Auskunft und einen Überblick, welche Verfahren existieren. Es werden beispielsweise einzelne Verfahren zur 3D-Datengewinnung betrachtet, aber nicht die Integrationsfähigkeit im Rahmen der Produktionstechnik, was ebenfalls wichtig ist für die Lösung eines Automatisierungsproblems. Als Beispiel ist hier [18] und [17] zu nennen. Diese Werke stellen die theoretischen Hintergründe der Bildverarbeitung wie Algorithmen und Erfassungstechniken bzw. Bildaufnahmesysteme dar, aber gehen nicht auf die konkrete Auswahl oder Anwendung im Produktionsumfeld ein.

Die vorgestellte Methodik gibt darüber hinaus den Ansatz zur Entwicklung einer geeigneten Softwarestrategie. In der Literatur, die sich mit den Algorithmen der BV befasst, wird davon ausgegangen, dass eine geeignete Digitalisierung der Szene vorliegt. Diese Literatur betrachtet im Wesentlichen das Sondergebiet der Informatik, das sogenannte Bildverstehen. In [77] werden beispielsweise Algorithmen und deren Anwendungsmöglichkeiten in Beispielen eingehend erläutert, wobei der Schwerpunkt jedoch auf den anwendbaren Algorithmen liegt und nicht auf dem Gesamtsystem bzw. dessen Integrationsfähigkeit in der Produktionstechnik.

6.1.1 Zusammenfassung statische Analyse

Im Rahmen der statischen Analyse wird nur die Realisierbarkeit betrachtet und noch nicht auf den funktionalen Ablauf des Systems eingegangen. Das bedeutet, es wird betrachtet, was nötig ist, um eine Lösung für das Automatisierungsprojekt zu realisieren. Die im Rahmen der statischen Analyse gemachten Feststellungen können direkt in das Pflichtenheft aufgenommen werden.

Die statische Analyse ist sehr gut geeignet, um die Rahmenbedingungen zu erfassen und eine erste Definition der Leistungen zu ermitteln. Die dargestellten Punkte spiegeln die in der VDI 2632 gegebenen Punkte zur Erstellung eines Pflichtenheftes für BVS wieder.

Die vorangegangenen Projekte haben gezeigt, dass die Punkte Aufgabenstellung, Lösungsbeschreibung eng mit der statischen Analyse verbunden sind. Die Aufgabenstellung wird in der statischen Analyse durch die Definition von Objekt und Szene sowie deren Eigenschaften dargelegt. Zusammengefasst ergibt die statische Analyse, welche Merkmale der Szene extrahiert werden müssen, um die Automatisierungsaufgabe zu lösen.

Die Lösungsbeschreibung ergibt sich aus dem verwendeten Bildaufnahmesystem und der Bildverarbeitungsstrategie.

Im Rahmen der statischen Analyse wird ein statisches Modell des BVS erzeugt, aus dem das Pflichtenheft ableitbar ist. Es werden die Systemeigenschaften als Klassen dargestellt und die zwischen diesen bestehenden Assoziationen betrachtet.

Dies zeigt, dass die vorgestellte Methodik mit den momentan geltenden Richtlinien kompatibel ist und eine sinnvolle Ergänzung zu diesen darstellt.

Es wurde gezeigt, dass die Methode im Rahmen des Anlagen- und Sondermaschinenbaus ein sehr strukturiertes Vorgehen ermöglicht. Eine detailliertere Untersuchung mit Versuchsaufbauten zu den Bildaufnahmesystemen würde eine genauere Verifikation der Fähigkeiten und möglichen Lösungswege gewährleisten. Ein solches Vorgehen ist in der Produktionstechnik jedoch meist nicht praktikabel, da zum einen Ressourcen gebunden werden und zum anderen die Umsetzungsdauer steigt, was beides wirtschaftlich ungünstig ist.

Das vorgestellte Verfahren stellt nicht den exklusiven oder besten Lösungsweg vor, sondern ist vielmehr im Rahmen dieser Projekte der effektivste Weg.

Das in der statischen Analyse beschriebene Verfahren zur Festlegung des Messraums ist sehr gut dazu geeignet, die Randbedingungen für das Bildaufnahmesystem zu erfassen.

Im Rahmen der bearbeiteten Projekte wurde festgestellt, dass die aufgeführten Kriterien zur Auswahl des Bildaufnahmesystems die wichtigsten Aspekte erfassen und so die nötigen Fähigkeiten dargestellt werden. Die Erfassung und Darstellung der Kriterien in Form der Bewertungsmatrix wirkt zweckmäßig und für die beschriebene Problematik passend.

Die dargestellte Form zur Erfassung der Kriterien ist einzigartig und wird in der dargestellten Art noch nicht verwendet. Die Methodik bietet Vorteile zur effizienten Umsetzung von 3D-Bildverarbeitung in der Produktionstechnik.

Bei der Verwendung von durch den Sensorhersteller konfigurierten oder teils parametrisierten Bildaufnahmesystemen muss auf die Diskrepanzen zwischen Literatur und Herstellerangabe geachtet werden, da oft nicht alle Mechanismen des Bildaufnahmesystems durch den Hersteller offen gelegt werden. Das bedeutet, bei diesen besteht aufgrund mangelnder Angaben zu bestimmten Eigenschaften nicht die Möglichkeit, die allgemeingültigen Ansätze zur Ermittlung der Fähigkeiten zu verwenden. Dies hat den Nachteil, dass man an die Vorgaben des Herstellers gebunden ist bzw. die vom Hersteller empfohlene Eignungsfeststellung durchführen muss, siehe Beispiel Applikationen. Hierbei kann im günstigen Fall die Haftung für die Fähigkeiten oder Zusage der Funktion dann in bestimmten Bereichen direkt vom Integrator an den Sensorhersteller übertragen werden.

Diese Bildaufnahmesysteme bieten jedoch den Vorteil, dass sie sehr gut in die Umgebung der Produktionstechnik integrierbar sind. Außerdem ist die Inbetriebnahme oder Teilinbetriebnahme, Anpassung des Bildaufnahmesystems an das Automatisierungsproblem sehr einfach, da Werkzeuge für Konfiguration, Treiber oder sogar Programmierschnittstellen mitgeliefert werden. Dies verkürzt die Entwicklung und Inbetriebnahme, woraus sich oft optimale Umsetzungszeiten ergeben.

6.1.2 Betrachtung der dynamischen Analyse und des Entwurfs

Die als dynamische Analyse bezeichneten drei Punkte, Integration des BVS in die Prozessumgebung, Definition des Verhaltens des Objektes in der Prozessumgebung und

Ablauf der Digitalisierung der vorgestellten Methodik ist in der dargestellten Form nicht bekannt. Es gibt hier eine Reihe von expliziten Beispielen, wie ein produktionstechnisches Problem mittels 3D-BVS gelöst wurde. Diese beziehen sich jedoch auf den individuellen Prozess oder es wird wie in [14] nur rudimentär darauf eingegangen, was im Hinblick auf Schnittstellen und den Gesamtprozess zu beachten ist; zudem beziehen sich bekannte Vorgehensweisen meist auf das Feld der 2D-Bildverarbeitung. [14] beschreibt unter dem Punkt Prozessintegration Feldbusse, Schnittstellen, Steuerungssignale und Datenformate, aber geht nicht auf die konkrete Erfassung bzw. Planung und Analyse zur konkreten Integration eines BVS in die Prozessumgebung einer Produktionsanlage ein.

Der dargestellte Entwurf des BVS ist speziell auf die verwendete Methodik angepasst. Der Entwurf von BVS findet normalerweise nach den Entwurfsmethoden der Informatik statt oder entspricht den allgemeinen Vorgehen und Regeln des industriellen Projektmanagements. Die vorgestellte Methode stellt einen ganzheitlichen Ansatz zur Betrachtung von BVS im Rahmen der Produktionstechnik dar.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass der für die Produktionstechnik wichtige ganzheitliche Ansatz durch den stark interdisziplinären Charakter der Bildverarbeitung in der Literatur bzw. bei anderen Methoden in die einzelnen Disziplinen aufgeteilt wird. Die hier beschriebene Begrenzung auf die genannten Komponenten und Aspekte der Produktionstechnik sowie nicht zu detaillierte Betrachtung der einzelnen Elemente erscheint im Rahmen der integralen Betrachtung sinnvoll, da an dieser Stelle keine Pauschalierung von Expertenwissen stattfinden darf.

Die in Kapitel 5 dargestellten dynamischen Analysen verdeutlichen das funktionale Verhalten des jeweils projektierten BVS. Dabei werden Informationen über den Ablauf, die Interaktion und Kommunikation dargestellt.

Die beschriebenen Projekte und die Darstellung und Analyse des Verhaltens wurden auf das für den Entwurf des Systems Nötigste begrenzt. Das dargestellte Vorgehen bei der dynamischen Analyse und UML bieten die Möglichkeit, die Abläufe, Interaktionen und das dynamische Verhalten des zu projektierenden BVS sehr detailliert zu planen. Bei einem zu hohen Detaillierungsgrad wird das System und der Entwurf schnell unübersichtlich. Dies erschwert das Verständnis und damit den Projektierungsprozess. Das bedeutet, der Anwender sollte die Methodik in einem seinen Ressourcen angepassten Detaillierungsgrad nutzen.

Der Entwurf stellt die Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse dar. Für den Entwurf werden Fakten zusammengefasst und übersichtlich dargestellt. Dies erfolgt in den vorgestellten Projekten in Form des überarbeiteten Klassendiagramms, in das auch Funktionen und Schnittstellen aufgenommen werden.

Neben den Ergebnissen der Analyse in UML-Notation werden die Erkenntnisse aus anderen Mitteln in den Entwurf mit aufgenommen, wie die konstruktive Abbildung der Hardware als CAD-Anlagenlayout, Ergebnisse einer Realtimesimulation oder Abbildung der Ergebnisse der virtuellen Inbetriebnahme.

Anhand der dargestellten Projekte wird deutlich, dass eines der Kernelemente des Entwurfs das entstandene Klassendiagramm ist, welches als Übersicht für die spätere Implementierung des Systems dient.

Die betrachteten Systeme haben gezeigt, dass nur, wenn alle Elemente –bestehend

aus BVS und umgebendem Prozess– der Automatisierungslösung betrachtet und adäquat miteinander vernetzt werden können, sich ein effizientes BVS projektieren und realisieren lässt.

Da auch der Kostendruck auf die Entwicklung solcher Systeme zunimmt, gewinnen dabei Aspekte wie die Wiederverwertbarkeit, Skalierbarkeit und die Durchgängigkeit der Entwicklungsmethode sowie deren Effizienz an Bedeutung.

Die vorgestellte Methodik und deren Anwendung zeigen, dass ein methodisches Vorgehen entwickelt werden konnte, das es ermöglicht, die notwendigen Elemente zur Realisierung eines 3D-Bildverarbeitungssystems im Verbund mit dem Produktionssystem über die Anforderungen zu definieren. Die dargestellte Vorgehensweise geht auf die Eigenschaften jedes Produktionssystems individuell ein.

Die Darstellung des Entwurfs des Bildverarbeitungssystems ist auf die wesentlichen Bestandteile skaliert, die einzelnen Phasen der Analyse ermöglichen die Prüfung der Funktionalität und die Darstellung des Gesamtkonzeptes.

Das zeigt, dass die Zieldefinition aus Kapitel 1 eingehalten werden konnte und die Zielsetzung erreicht worden ist. Es ist bisher keine Methodik bekannt, die auf diesen speziellen Bereich der Bildverarbeitung eingeht und versucht, eine integrale Betrachtung der Elemente eines BVS im Sondermaschinenbau durchzuführen. Die bekannten Methoden beschränken sich auf spezielle Bereiche eines BVS, wie die Bildgebung, die Algorithmen oder aber die BVS als quasi „Blackbox“ im Anlagenbau. Hinzu kommt, dass selten der Bereich der 3D-Bildverarbeitung explizit beschrieben wird, der in der Produktionstechnik vermehrt eingesetzt wird.

Der im Rahmen dieser Methodik beschriebene Weg zur Auswahl eines 3D-Bildaufnahmesystems ist so nicht bekannt. In der Regel werden die Bildaufnahmesysteme einzeln, ohne den direkten Bezug zur Produktionstechnik, beschrieben.

Der Vorteil des vorgeschlagenen Verfahrens für die Projektierung ist, dass die Entwurfs- und Projektierungsdauer verkürzt werden kann und somit die Umsetzung entsprechender Automatisierungsprojekte beschleunigt wird. Dies stellt im Bereich der Produktionstechnik einen großen Vorteil dar.

6.2 Möglichkeiten zur Aufwandsabschätzung

Ausgehend von der vorgestellten Methode zur Auswahl des Bildaufnahmesystems und dem sich daraus ergebenden Softwareentwurf ergibt sich die Möglichkeit einer Aufwandsabschätzung für die Entwicklung und Inbetriebnahme entsprechender 3D-BVS.

Für diese wird ausgehend von der Extraktionsstrategie und dem im Lasten- bzw. Pflichtenheft abgestimmten Funktionsumfang ein Modell des BVS und seiner Funktionalitäten erzeugt.

Das bedeutet, es wird ausgehend von dem Lasten- und Pflichtenheft und den ausgewählten Komponenten ein Modell des BVS entwickelt. Diese Modellbildung erfolgt wie beschrieben in der einheitlichen Modellierungssprache UML.

Ausgehend von dem in den vier Phasen festgelegten Entwurf wird zunächst ein Modell, bestehend aus Use-cases, Aktoren und Klassen, wie beschrieben erstellt. Dieses Systemmodell kann dann für eine Aufwands- und Komplexitätsschätzung als Basis genutzt werden, vgl. hierzu auch [78].

Aus dem Use-Case und den Anforderungen sowie den Bestimmungen, die sich aus dem Prozess ergeben, kann mittels der Methode der Use-Case-Points, wie sie in [79] beschrieben wird, eine Aufwandsabschätzung durchgeführt werden. Eine detaillierte Beschreibung und Anwendung dieses Verfahrens zur Aufwandsabschätzung im Bereich des Entwurfs von 3D-Bildverarbeitungssystemen kann [78] entnommen werden, da eine genaue Aufführung der Systematik zu weit führen würde.

Die Methode beinhaltet Parameter und Umgebungsfaktoren, die es dem entwickelnden Unternehmen ermöglichen, das Projekt entsprechend den unternehmensinternen Strukturen zu skalieren und abzuschätzen. Es wird bewusst auf eine umfangreiche Softwareaufwandsabschätzung verzichtet und ein schlanke Methode vorgestellt, da die einzelnen Verfahren selbst im Bereich des Softwareengineering umstritten sind, vgl. [80]. Das dargestellte Verfahren gibt vielmehr eine Komplexitätsbestimmung und Größenbestimmung des Systems wieder. Die dargestellten Faktoren und Gewichte in der Methode ermöglichen es, das System entsprechend der Qualifikation des Entwicklungspersonals und den unternehmensinternen Faktoren beim Entwickler abzuschätzen und diese Einflüsse mit in die Aufwandsabschätzung einzubeziehen.

Die Betrachtung des Aufwands inkludiert die Inbetriebnahme und Fehlersuche nach Auslieferung der Produktionsanlage bis zum Zeitpunkt der Abnahme durch den Kunden. Die Übertragung der Ergebnisse von dem Entwurf auf eine Methodik zur Aufwandsabschätzung zeigen, dass das beschriebene Verfahren durchaus auch zur Komplexitätsabschätzung im Bereich des Sondermaschinenbaus und der Bildverarbeitung geeignet ist. Es ergibt sich die Möglichkeit, Bildverarbeitungssysteme von Hard- und Softwarebestandteilen, ungeachtet des interdisziplinären Charakters, einheitlich für die beteiligten Gewerke darzustellen und zu projektieren. Gerade Maschinenbauern und Systemintegratoren aus dem Bereich der KMUs wird so ein Überblick über die notwendigen Ressourcen gegeben sowie eine Möglichkeit, diese zielführend einzusetzen.

Kapitel 7

Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine neue Methode für die effektive Projektierung von 3D-BVS in der Produktionstechnik erfolgreich entwickelt und im Rahmen der Umsetzung von realen BVS verifiziert.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf der Untersuchung der Kriterien, die das Bildaufnahmesystem bestimmen. Bei zukünftigen Untersuchungen der Kriterien bietet es sich an, zum einen Wechselwirkungen explizit zu betrachten und zum anderen spezielle Algorithmen der Bildverarbeitung mit in die Betrachtung aufzunehmen.

Ausgehend von einer detaillierteren Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Kriterien kann das Auswahlverfahren zur Bestimmung des Bildaufnahmesystems in seiner Effektivität gesteigert werden. Dies würde bedeuten, dass das Verhalten des Systems detaillierter beschrieben und somit die Projektierung effektiver bei der Vorhersage des Verhaltens würde.

Die zusätzliche Betrachtung von Algorithmen und Verfahren der Bildanalyse, die bei 3D-Systemen anwendbar sind oder diese erweitern, würde die Fähigkeitsbetrachtung der BV-Software erweitern und so mehr Möglichkeiten aufzeigen, Automatisierungsaufgaben mittels 3D-BV zu lösen. Daraus resultiert eine erweiterte Anwendbarkeit für den Integrator von 3D-BVS. Die zusätzliche Integration von Informationen und speziellen Verfahren in die Wissensbasis erhöht jedoch das Fachwissen, welches bei der Anwendung dieser Methode nötig ist.

Des Weiteren bieten sich Untersuchungen zur Performanz der verwendeten Software, Algorithmen und Systeme, die üblicherweise in der Produktionstechnik Anwendung finden, an. Die Performanzanalyse stellt eine sinnvolle Ergänzung für das Kriterium Taktzeit dar und würde dies weiter detaillieren.

Im Rahmen der Definition der einzelnen Kriterien und der Umsetzung der Projekte fiel auf, dass die Erfassung der Textur bzw. der Fremdlichteinflüsse schwierig ist, da keine formale Definition für diese Kriterien besteht. Die Textur einer Szene ergibt sich aufgrund von Reflektanzunterschieden der Oberfläche oder den Intensitätsunterschieden, die sich aufgrund der Beleuchtung des Oberflächenreliefs ergeben. Fremdlicht wird oft nur dann als störend empfunden, wenn sich die Lichtverhältnisse ändern. Die beiden Kriterien haben gemein, dass sie die Intensität des Bildes beeinflussen bzw. sich auf die Abbildung der Szene auf den Sensor auswirken. Daraus ergeben sich die bereits beschriebenen Wechselwirkungen zwischen Empfindlichkeit, Kontrast, Bildqualität, Rauschverhalten, etc.. Die Auswirkungen dieser Einflüsse sind je nach Bildaufnahmesystem unterschiedlich und nur schwer in allgemeine greifbare Größen

zu überführen. An dieser Stelle würde sich eine Untersuchung der Industrie üblichen 3D-Bildaufnahmesysteme anbieten, um dieses Kriterium einheitlich zu definieren und entsprechend zu katalogisieren.

Ein zukünftig relevantes Thema ist die Eingliederung weiterer Bildaufnahmesysteme in diese Methodik. Die Aufnahme weiterer Verfahren zur 3D-Daten Gewinnung machen die Methodik auf ein weiteres Feld von Aufgaben anwendbar. Im Speziellen sollte das relativ junge Feld der kurz beschriebenen Lichtfeldkameras betrachtet werden. Diese Systeme waren zu Projektlaufzeit noch nicht verfügbar bzw. nur in sehr geringem Umfang in industrietauglichen Bildaufnahmesystemen integriert. Der Markt verzeichnet jedoch mittlerweile einen Zuwachs an Systemen dieser Art, die in der Produktionstechnik einsetzbar sind und auch für diesen vertrieben werden.

Die Ergebnisse von weiteren mit dieser Methodik projektierten BVS sollte dokumentiert werden; ausgehend von diesen Systemen könnte ein Katalog der möglichen Anwendungen und dafür nötigen Objekte erzeugt werden. Dies würde die Modularisierung der BVS und deren Komponenten in der Produktionstechnik unterstützen. Daraus ergeben sich Vorteile, da sich das Potential der Bildverarbeitung erst in der einfachen Beherrschbarkeit und Auslegung von entsprechenden Systemen in der Produktionstechnik voll entwickeln kann.

Die Ergebnisse, die im Rahmen dieser Untersuchungen gewonnen werden, können dann gegebenenfalls das Kriterium der Komplexität erweitern und verifizieren. Die Komplexität gibt, wie bereits beschrieben, Ansatzpunkte für eine Aufwandsabschätzung sowie Anhaltspunkte zur Umsetzungsdauer, die durch einen entsprechenden Zuwachs an Daten und Erfahrungen aus Projekten verbessert wird.

Um die Ergebnisse der Arbeit in den KMU und damit den praktischen Anwendern zugänglicher zu machen, ist die Verfügbarkeit einer Softwareumgebung zur Planung und Dokumentation entsprechend dem hier vorgeschlagenen Konzept erforderlich. Aus der Dokumentation und den gesammelten Projekten muss ein Konfigurationssystem geschaffen werden. Bei diesem besteht die Herausforderung darin, das System so flexibel wie möglich zu gestalten, ohne dabei die Möglichkeiten eines individuellen BVS einzuschränken.

Bei der zukünftigen Forschung sollte gleichzeitig darauf geachtet werden, dass die Produktionstechnik von der Bildverarbeitung Modularität, Flexibilität und Effizienz verlangt und dabei für die wirtschaftliche Planung ein methodisches Vorgehen unabdingbar ist, das die unterschiedlichen Disziplinen lenkt.

Literaturverzeichnis

- [1] WÜNSCH, G., *Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme* (Herbert Utz Verlag, s.l, 2008), 1. Aufl. edn.
- [2] LANGMANN, R., *Taschenbuch der Automatisierung* (Hanser, Carl, München, 2010), 2., neu bearbeitete Auflage edn.
- [3] GENESIS-ONLINE, *Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Beschäftigtenklassen, Wirtschaftszweige* (2013).
- [4] NEUMANN, B., *Bildverarbeitung für Einsteiger: Programmbeispiele mit Mathcad* (Springer, Berlin, 2005).
- [5] ERHARDT, A., *Einführung in die Digitale Bildverarbeitung: Grundlagen, Systeme und Anwendungen* (Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage, Wiesbaden, Wiesbaden, 2008), 1. Aufl. edn.
- [6] LAUBER, R. and GÖHNER, P., *Prozessautomatisierung, Prozeßautomatisierung*, vol. 1 (Springer, Berlin and Heidelberg, 1999), 3., völlig neubearb. Aufl. edn.
- [7] VDINDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK, *Industrielle Bildverarbeitung* (2010).
- [8] SPRINGER GABLER VERLAG, *Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Produktionstechnik*.
- [9] HÜTTE - *Das Ingenieurwissen*, SpringerLink : Bücher (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012), 34. Aufl. . aktualisierte edn.
- [10] CZICHOS, H., ed., *Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften; mit 337 Tabellen*, VDI (Springer, Berlin and Heidelberg [u.a.], 2000), 31. neubearb. und erw. Aufl. edn.
- [11] NESTLER, A., *Produktionsautomatisierung unter dem Einfluss der Informationstechnologien: Intelligente Informationsprozesse zum Technologiemanagement in der Fertigung* (Selbstverl. der Techn. Univ., Dresden, 2005).
- [12] FAVRE-BULLE, B., *Automatisierung komplexer Industrieprozesse: Systeme, Verfahren und Informationsmanagement* (Springer, Wien, 2004), 1. Aufl. edn.
- [13] FÜR NORMUNG E.V., D.D.I., *DIN IEC 60050-351 Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch* (Juni 2009).
- [14] DEMANT, C., SPRINGHOFF, A., and STREICHER-ABEL, B., *Industrielle Bildverarbeitung: Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert* (Springer, Heidelberg [u.a.], 2011), 3., aktualisierte Aufl. edn.

- [15] STEGER, C., ULRICH, M., and WEIDEMANN, C., *Machine vision algorithms and applications* (Wiley-VCH, Weinheim, 2008).
- [16] SPINNLER, K., ed., *Leitfaden zur industriellen Bildverarbeitung, Reihe Vision*, vol. 13 (Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2012).
- [17] JÄHNE, B., *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung: Und Bildgewinnung* (Springer Vieweg, Berlin u.a., 2012), 7., neu bearb. Aufl. edn.
- [18] BEYERER, J., FRESE, C., and PUENTE LEON, F., *Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung* (Springer Vieweg, Berlin, 2012).
- [19] LUNZE, J., *Automatisierungstechnik: Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme*, *Automatisierungstechnik* (2008).
- [20] *International electrotechnical vocabulary: Vocabulaire electrotechnique international, International standard Norme internationale*, vol. IEC 60050-351 (International Electrotechnical Commission, Geneva, 2013), ed. 4.0 edn.
- [21] HEHENBERGER, P., *Computerunterstützte Fertigung: Eine kompakte Einführung* (Springer Berlin, Berlin[u.a.], 2011), 1. Aufl. edn.
- [22] BAUM, G., BORCHERDING, H., BROY, M., EIGNER, M., HUBER, A.S., KOHLER, H., RUSSWURM, S., and STÜMPFLE, M., *Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*, Xpert.press (Springer-Vieweg, Berlin, 2013).
- [23] BAUER, N., ed., *Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung: Qualitätssicherung in der Praxis*, *Vision* (Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart, 2007), 1. Aufl. edn.
- [24] DONGES, A. and NOLL, R., *Lasermesstechnik: Grundlagen und Anwendungen, Technische Physik*, vol. Bd. 4 (Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 1993).
- [25] GROTE, A. and SCHWAB, E., *Berührungslose optische Vermessung von Spannbetonfertigteilen / Contact-Free Optical Measurement of Precast Prestressed Concrete Parts*, tm - Technisches Messen, 80 (2013).
- [26] GROTE, A. and SCHWAB, E., *Realisierung einer Robot-Vision-Applikation mit Lichtschnittverfahren für einen bestehenden Prozess*, tm - Technisches Messen, 81 (2014).
- [27] SCHARSTEIN, D., SZELISKI, R., and ZABIH, R., *A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms*, in *Stereo and Multi-Baseline Vision*, 2001. (SMBV 2001). Proceedings. IEEE Workshop on, 131–140 (2001).
- [28] ANDERT, F., *Bildbasierte Umgebungserkennung für autonomes Fliegen: Techn. Univ., Diss.–Braunschweig, 2011, Forschungsbericht / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, vol. 2011,9 (DLR, Köln, 2011), als ms. gedr. edn.
- [29] TSAI, R.Y., *An efficient and accurate camera calibration technique for 3-D machine vision*, Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 364–374 (1986).

- [30] HARTLEY, R. and ZISSERMAN, A., *Multiple view geometry in computer vision* (Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, 2003), 2nd ed edn.
- [31] ZHANG, S., *Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques*, *Optics and Lasers in Engineering*, 48, 149–158 (2010).
- [32] SCHAFFER, M. and GROSSE, *Streifenprojektionsgenauigkeit mit Kinect-Rate: 3D-Sensorik für schnelle, dichte und genaue Formvermessung*, in *Forum Bildverarbeitung 2014*, edited by F. Puente Leon, 285–294 (KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2014).
- [33] LUAN, X., *Experimental investigation of photonic mixer device and development of TOF 3D ranging systems based on PMD technology / presented by Xuming Luan*, Ph.D. thesis, Universität Siegen, Siegen (2001).
- [34] RINGBECK, T., *Untersuchung opto-elektrischer Phasenregelkreise auf Basis von Photomischdetektoren hinsichtlich deren Anwendungspotential für die Photonik, ZESS-Forschungsberichte*, vol. Nr. 16 (Shaker, Aachen, 2002).
- [35] HEINOL, H.G., *Untersuchung und Entwicklung von modulationslaufzeitbasierten 3D-Sichtsystemen* (s.n.), [S.l., 2001).
- [36] LENZEN, F., KIM, K.I., SCHÄFER, H., and NAIR, R., *Denoising Strategies for Time-of-Flight Data*, in *Time-of-Flight and depth imaging*, edited by M. Grzegorzec, *Lecture notes in computer science, state-of-the-art survey*, vol. 8200, 25–44.
- [37] NAIR, R. and RUHL, KAI, LENZEN, FRANK, *A Survey on Time-of-Flight Stereo Fusion*, in *Time-of-Flight and depth imaging*, edited by M. Grzegorzec, *Lecture notes in computer science, state-of-the-art survey*, vol. 8200, 105–127.
- [38] LUHMANN, T., JEPPIING, C., and HERD, B., *Untersuchung zum messtechnischen Genauigkeitspotenzial einer Lichtfeldkamera*, in *DGPF Tagungsband*, vol. 23 / 2014, Beitrag 202 (2014).
- [39] WANNER, S. and GOLDLUECKE, B., *Globally consistent depth labeling of 4D light fields*, in *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 41–48 (2012).
- [40] RUSINKIEWICZ, S. and LEVOY, M., *Efficient variants of the ICP algorithm*, in *Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 145–152 (28 May-1 June 2001).
- [41] LANGMANN, B., HARTMANN, K., and LOFFELD, O., *DEPTH CAMERA TECHNOLOGY COMPARISON AND PERFORMANCE EVALUATION*, in *International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, 438–444 (2012).
- [42] WEISSLER, G.A. and HOLST, K., *Einführung in die industrielle Bildverarbeitung, Elektronik- & Elektrotechnik-Bibliothek*, vol. Bd. 1 (Franzis, Poing, 2007).

- [43] POMBERGER, G. and BLASCHEK, G., *Software-Engineering: Prototyping und objektorientierte Software-Entwicklung* (Hanser, München and Wien, 1996), 2., überarb. Aufl. edn.
- [44] SEIDLMEIER, H., *Prozessmodellierung mit ARIS: Eine beispielorientierte Einführung für Studium und Praxis*, Prozessmodellierung mit ARIS (2010).
- [45] LAUBER, R., *Prozessautomatisierung, Prozessautomatisierung*, vol. / Rudolf Lauber; Peter Göhner ; 2 (Springer, Berlin and Heidelberg and New York and Barcelona and Hongkong and London and Mailand and Paris and Singapur and Tokio, 1999).
- [46] *Graphic notations for concept modelling in terminology work and its relationship with UML – Part 1: Guidelines for using UML notation in terminology work* (2014-10-03).
- [47] BALZERT, H., *Lehrbuch der Objektmodellierung: Analyse und Entwurf mit der UML 2 ; mit e-learning-Online-Kurs*, Lehrbücher der Informatik (Spektrum, Akad. Verl, Heidelberg, 2011), 2. Aufl., nachdr. 2011 edn.
- [48] OESTEREICH, B. and SCHEITHAUER, A., *Analyse und Design mit der UML 2.5: Objektorientierte Softwareentwicklung* (Oldenbourg, München, 2013), 11., umfassend überarb. u. aktual. Aufl. edn.
- [49] SPIEGELBERGER, B., BONETMÜLLER, M., STETTER, R., and KAUSLER, B., *Reifezeugnis für mechatronische Entwicklungsprozesse: Status Quo im Maschinen- und Anlagenbau*, Atp-Edition, 54, 28–35 (2012).
- [50] OESTEREICH, B., WEISS, C., and LEHMANN, O.F., *APM - Agiles Projektmanagement: Erfolgreiches timeboxing für IT-Projekte* (dpunkt-Verl, Heidelberg, 2008).
- [51] *Produktion und Management "Betriebshütte"* (Springer, Berlin [u.a.], 1999), 7. Aufl. edn.
- [52] UWE DOMBROWSKI, SIBYLLE HENNERSDORF, STEFAN SCHMIDT, *Grundlagen Ganzheitlicher Produktionssysteme: Aus der Herkunft für die Zukunft lernen*, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb : ZWF, 101, 172–177 (2006).
- [53] WIENDAHL, H.P., REICHARDT, J., and NYHUIS, P., *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten* (Hanser, München, 2009).
- [54] ENGELN, W., *Methoden der Produktentwicklung*, Skripten Automatisierungstechnik (Oldenbourg Industrieverl., München, 2006).
- [55] ENGELN, W., *Methoden der Produktentwicklung* (Oldenbourg-Industrieverlag, München, 2011), 2. Aufl. edn.
- [56] SCHUH, G., *Innovationsmanagement: Handbuch Produktion und Management 3, Handbuch Produktion und Management*, vol. 3 (Springer Berlin, Berlin, 2012), 2., Aufl. 2012 edn.

- [57] *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme: Design methodology for mechatronic systems : VDI 2206, VDI-Richtlinien*, vol. 2206 (Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004).
- [58] KRÜGER, J., UHLMANN, E., and VERL, A., *Effiziente Methodiken und durchgängige Werkzeuge zur Modellerstellung digitaler Produktionseinrichtungen, Fortschrittberichte VDI / 2*, vol. Nr. 671 (VDI-Verl., Düsseldorf, 2009), als ms. gedr edn.
- [59] EVERSHEIM, W., *Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen: Strategien und Praxisbeispiele zur Rationalisierung in der Einzel- und Kleinserienproduktion* (VDI-Verl., Düsseldorf, 1990).
- [60] BODE, H., *MATLAB-Simulink: Analyse und Simulation dynamischer Systeme* (B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, Wiesbaden, 2006), 2., vollständig überarbeitete aufl edn.
- [61] FRITZ, J.U., *Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der digitalen Fabrik, Schriftenreihe Produktionstechnik*, vol. Bd. 41 (LFT, Univ., Saarbrücken, 2007), [online-ausg.] edn.
- [62] ZÄH, M. and WÜNSCH, G., *Schnelle Inbetriebnahme von Produktionssysteme: Qualitätssicherung von automatisierten Maschinen durch Simulation*, wt Werkstattstechnik online, 95 (2005).
- [63] TARABANIS, K.A., ALLEN, P.K., and TSAI, R.Y., *A survey of sensor planning in computer vision*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 11, 86–104 (1995).
- [64] WENK, M., *Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen: Aufwand-Nutzen, Umsetzungsstrategien, zukünftige Entwicklungen.*, in SPS IPC DRIVES 2008, edited by A. Verl, 531–540 (VDE-Verl., Berlin and Offenbach, 2008).
- [65] KÜPPINGER, S., *Bestvor-Studie deckt Schwachstellen auf.* (2009).
- [66] *DIN 69901-5: Projektmanagement - Projektmanagementsysteme* (Beuth, Berlin, 2009).
- [67] GROTE, A. and SCHWAB, E., *Struktur zur Auswahl und Implementierung von bildverarbeitenden Systemen in der Fertigungsautomation*, in Forum Bildverarbeitung 2014, edited by F. Puente Leon, 15–26 (KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2014).
- [68] SÜSSE, H. and RODNER, E., *Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin*, Lehrbuch (Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014).
- [69] HESSE, S. and SCHNELL, G., *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung*, SpringerLink : Bücher (Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014), 6., korr. und verb. aufl edn.
- [70] SCHUSTER, N., *Messen mit Subpixel-Genauigkeit: Legende und Wirklichkeit*, Optik & Photonik, 2, 49–52 (2007).

- [71] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 1993), 1st ed. 1993 edn.
- [72] WINNER, H., ed., *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort ; mit 45 Tabellen*, ATZ-MTZ-Fachbuch (Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2012, 2012), 2., korr. aufl edn.
- [73] HYPKI, A., *Beitrag zur Simulation industrieller Automatisierungssysteme*, Berichte aus der Automatisierungstechnik (Shaker, Aachen, 2008).
- [74] SICK IVP, *Ranger and Ruler Training Hands -On Workbook* (2007).
- [75] SHU, Y.W. and HIGGINS, W.E., *Symmetric region growing*, Image Processing, IEEE Transactions on, 12, 1007–1015 (2003).
- [76] NAGY, I., *Modellierung des Operationsstus in der robotergestützten minimalinvasiven Herzchirurgie: Techn. Univ., Diss-München, 2009* (2009).
- [77] JÄHNE, B., *Practical handbook on image processing for scientific and technical applications* (CRC Press, Boca Raton [Fla.], 2004), 2nd ed edn.
- [78] GROTE, A. and SCHWAB, E., *Entwurfsmethode für 3D-Bildverarbeitungssysteme in der Anlagenautomatisierung*, tm - Technisches Messen, 82 (2015).
- [79] HUMMEL, O., *Aufwandsschätzungen in der Software- und Systementwicklung kompakt*, IT kompakt (Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Neckar, 2011), 1., aufl edn.
- [80] SNEED, H., SEIDL, R., and BAUMGARTNER, M., *Software in Zahlen: Die Vermessung von Applikationen* (Hanser, München, 2010).



Alexander Grote studierte nach dem Abitur am Gymnasium Hohenlimburg im Jahr 2002 Mechatronik an der Fachhochschule Südwestfalen. Nach Abschluss des Studiums im Jahr 2007 arbeitete er im Sondermaschinenbau und studierte berufsbegleitend Computer Vision and Computational Intelligence an der Fachhochschule Südwestfalen. Seit 2009 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fachhochschule Südwestfalen im Labor für Computerintegrierte Fertigung in der Kunststoffverarbeitung und schloss hier sein Studium mit dem Master of Science 2010 ab. Seine Promotion schloss er 2016 mit seiner Dissertation mit dem Titel „Integrale Betrachtung zur systematischen Definition von 3D Bildgebungssystemen in der Produktionstechnik“ ab.

In der industriellen Produktion sind Bildverarbeitungssysteme bereits in vielen Bereichen etabliert. Zunehmend werden auch 3D - Bildverarbeitungssysteme in der Produktionstechnik für die unterschiedlichsten Problemlösungen eingesetzt. Der Einsatzbereich reicht von einfacher Qualitätskontrolle über Handlungsaufgaben bis hin zu komplexen Sicherheitsfunktionen in einer Produktionsanlage.

Aufgrund der stetigen Entwicklung und der Vielfältigkeit der anwendbaren Verfahren in der industriellen Bildverarbeitung stellt die Projektierung von 3D-Bildverarbeitungssystemen oft eine Herausforderung dar. Die Problematik bei der Integration von 3D-Bildverarbeitungssystemen in der Produktionstechnik besteht oft in der Vielzahl möglicher Ansätze, den Aufgabenstellungen der Produktionsautomation mittels Bildverarbeitung gerecht zu werden.

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung einer Methodik zur effizienten Projektierung und Entwicklung von 3D-Bildverarbeitungssystemen im praxisnahen Umfeld des Sondermaschinenbaus.

Es werden zunächst die auf das System wirkenden Einflussgrößen bestimmt, die sich aus der Aufgabenstellung, dem Produktionsprozess und dessen Peripherie ergeben. Hiervon ausgehend wird ein methodisches Vorgehen definiert, das es einem Entwickler von Produktionsanlagen ermöglicht, die notwendigen Maßnahmen zur Realisierung eines effizienten und effektiven 3D-Bildverarbeitungssystems im Verbund mit dem Produktionssystem zu definieren.

In den entworfenen Ansätzen im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst analytisch betrachtet, welche Formalien zur Auswahl bzw. Eingrenzung von bildgebenden Verfahren genutzt werden und wie damit die weitere Evaluierung der Projektierung des Bildverarbeitungssystems abläuft.