



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts zur automatisierten, echtzeitfähigen Synchronisation von physischem Arbeitsprozess und digitalem Informationsfluss in einer cyber-physischen Montageumgebung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Dipl.-Ing. Gerhard Reisinger

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung,
Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Mathias Nausch, Bsc

0925155 (066-482)

Alser Straße 48/40

1090 Wien

Wien, im August 2018

Mathias, Nausch



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im August 2018

Mathias, Nausch

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei allen bedanken, die mich während meines Studiums begleitet und betreut haben.

Ein ganz besonderer Dank geht an meinen Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Reisinger, der mich sowohl inhaltlich, als auch bei der praktischen Umsetzung meiner Arbeit unterstützt hat und ohne den diese Diplomarbeit nicht realisierbar gewesen wäre.

Des Weiteren danke ich Herrn Julian Kozak, der mich in elektrotechnischen Fragen unterstützt und beraten hat. Außerdem möchte ich Frau Karola Gump für ihre engagierte Art und ihre tatkräftige Unterstützung danken.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meiner Familie, die immer hinter mir gestanden, mich finanziell unterstützt hat und ohne der ein Studium an der TU-Wien nicht möglich gewesen wäre.

Vielen Dank!

Kurzfassung

Die Kundenwünsche haben sich in den letzten Jahrzehnten soweit verändert, dass sehr variantenreiche, qualitativ hochwertige und kostengünstige Produkte am Markt gefordert werden. Auf Grund der Globalisierung und eines daraus resultierenden internationalen Wettbewerbs sind Unternehmen dem Druck zur Entwicklung ausgesetzt, um den Kundenwünschen gerecht zu werden.¹ Bereits in der Produktion müssen Methoden und Konzepte entwickelt werden, um aktuellen Marktanforderungen zu entsprechen.

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Konzept entwickelt, umgesetzt und validiert, mit welchem manueller, physischer Arbeitsprozess in einem Montagesystem durch eingebettete Sensorik automatisiert erfasst und dokumentiert werden kann. Der theoretische Teil beinhaltet eine umfassende Auswahl an Sensoren und Sensorsystemen, welche fortlaufend weiterentwickelt werden. Das entwickelte Auswahlverfahren basiert auf der Unterteilung von Montageschritten in Grundbewegungen, um einen Grad für die Montagefortschrittsabdeckung zu erhalten. Die beschriebenen Sensoren werden, anhand ihrer Möglichkeiten Montagefortschrittsgrößen zu erfassen, Grundbewegungen zugewiesen. In einem zweiten Teil wird das entwickelte Verfahren anhand einer realen Produktionssituation angewandt, um die geeignete Sensorauswahl für eine optimale Montagefortschrittserkennung zu treffen. Zuletzt findet eine praktische Umsetzung der Lösung statt, sie beinhaltet die mechanische, sowie die elektronische Implementierung der ausgewählten Sensoren in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“.

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Synchronisation des Prozessfortschrittes mit den, ihn umgebenden, intelligenten Betriebsmitteln, ohne dass manuelle Eingaben durch den Mitarbeiter erforderlich sind. Weitere wichtige Aspekte sind ein unterbrechungsfreier und zeitlich synchronisierter Arbeitsfluss von Mensch und Maschine in einem gemeinsamen Arbeitssystem, welches eine hohe Produktivität sowie eine hohe Mitarbeiterakzeptanz aufweist.

Das Auswahlverfahren, angewandt auf die Montage in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“, hat ergeben, dass eine Gewichtsmessung des Montagetisches und des darauf befindlichen Montagestückes, unter Berücksichtigung aller Faktoren, eine Montagefortschrittserkennung von 82% ermöglicht. Die Gewichtsmessung wurde als Ergänzung zur Montagefortschrittserkennung getestet und die Auswertung der Ergebnisse lieferte die Erkenntnis, dass sowohl eine zuverlässige Fortschrittserkennung, als auch eine frühzeitige Fehlererkennung in der Montage erzielt wird.

¹ vgl. Lindner, 2005, S. 22

Abstract

Over the last few decades, customer expectations evolved towards highly varied, cost-effective and high-quality products. Moreover, globalization and the international competition add further pressure on manufacturing companies.² In order to fulfill all customer requirements and stay competitive, manufacturing companies have to develop new methods and concepts to adapt their production processes constantly to the given requirements.

In the scope of this thesis, an adaptive concept for monitoring and documenting manual assembly processes with the help of embedded sensor systems is developed. In the first theoretical part, commercially available systems to monitor assembling processes are presented and analyzed. Moreover, a structured procedure to determine the total degree of monitoring of a complex assembly process is proposed. The entire assembling process is formally broken down into simple tasks. Basic motions are associated to each task and it is finally determined if each basic motion is monitored by an appropriate sensor system. In the second part, the proposed procedure is applied to the assembly line of a 3D-printer in “TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0”. The experimental part of this work deals with the implementation of an embedded sensor system suggested by the procedure described in the theoretical part.

The goal of this thesis is to synchronize different intelligent assistant systems with the assembly progress without any manual interaction by the employee. Moreover, the system should operate in real-time and should not interrupt any workflow in order to ensure high productivity and employee acceptance.

The procedure presented in the theoretical part applied to the assembly process of a 3D-printer in “TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0” suggested that adding a weight monitoring system to the assembly line would allow monitoring of 82% of all assembly tasks.

The weight monitoring system was implemented, and the results showed that an accurate weight monitoring system allows reliable assembly progress detection and early assembly error detection.

² vgl. Lindner, 2005, S. 22

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung.....	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1 Einleitung und Begriffserklärungen	1
1.1 Ausgangssituation	2
1.2 Problemstellung.....	3
1.3 Forschungsfragen.....	4
1.4 Ziele der Arbeit	4
1.5 Methodisches Vorgehen und Struktur der Arbeit.....	5
2 Stand der Technik.....	7
2.1 Montage in der heutigen Produktion.....	7
2.1.1 Derzeitige Problemstellungen	8
2.1.2 Sensoreinsatz in der Montage	10
2.2 Sensoren	12
2.2.1 Optische Sensoren	12
2.2.2 Tiefenbildsensoren.....	18
2.2.3 Gewichtssensoren	19
2.2.4 Induktive Sensoren	23
2.2.5 Barcode, QR-Code und RFID	24
2.2.6 Gyroskope und Beschleunigungssensoren.....	25
2.2.7 Pneumatische Sensoren.....	26
2.3 Sensorsysteme.....	28
2.3.1 Kinect V2	28
2.3.2 Sarissa.....	35
2.3.3 Xsens.....	38
2.3.4 Orbbec Persee und Orbbec Astra PRO	41
2.3.5 StereolabsZED.....	44
2.3.6 VicoVR.....	46
2.3.7 Openpose	48

2.3.8	Direkte Gegenüberstellung der bildbasierenden Systeme	49
2.4	Analyse möglicher Anwendungsgebiete	50
3	Bewertungssystem	52
3.1	Das MTM-Verfahren und das MTM-UAS	52
3.2	Zuordnung der Sensoren zu Montagetasks	54
3.3	Faktoren und Einflüsse	58
3.4	Bewertungssystem basierend auf Excel	59
3.5	Vor-/Nachteile des Systems	63
4	TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0	65
4.1	3D-Druckermontage	65
4.1.1	Montageablauf in der „TU-Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“	66
4.1.2	Faktoren und Einflüsse in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“	67
4.2	Anwendung des Sensorauswahlverfahrens	68
4.3	Ergebnisdiskussion	70
5	Implementierung und Evaluierung des Sensorsystems	73
5.1	Wägezellensysteme	73
5.1.1	Leistungsparameter eines Wägesystems	73
5.1.2	Kenndaten der ausgewählten Wägezellen	74
5.2	Technische Umsetzung	75
5.2.1	Mechanischer Aufbau	76
5.2.2	Elektrotechnischer Aufbau	79
5.3	Programmierung der Sensoren	84
5.4	Evaluierung: Durchführung einer Testreihe	88
5.4.1	Versuchsbeschreibung	89
5.4.2	Ergebnisse	90
5.5	Diskussion der Ergebnisse	91
5.6	Conclusio	92
6	Zusammenfassung und allgemeiner Ausblick	94
7	Anhang	97
7.1	Waagenaufbau	97
7.2	Schaltpläne	98
7.3	Bauanleitung der Waage	100

7.4	Programmcode	101
8	Literaturverzeichnis	105
9	Onlineliteratur.....	108
10	Abbildungsverzeichnis	109
11	Formelverzeichnis.....	111
12	Tabellenverzeichnis	112
13	Abkürzungsverzeichnis.....	113

Anmerkung zum Sprachgebrauch:

Im Weiteren erfolgen die allgemeinen Bezeichnungen von Personen aus Gründen der Lesbarkeit und Übersichtlichkeit in konventioneller Sprachform. Mit allen verwendeten Personenbezeichnungen sind stets beide Geschlechter gemeint, außer es wird ausdrücklich auf weibliche oder männliche Personen hingewiesen bzw. geht entsprechendes aus dem Kontext hervor.

1 Einleitung und Begriffserklärungen

Über ein Viertel des Bruttoinlandsproduktes entfällt im Jahr 2017, sowohl in Österreich³ als auch in Deutschland⁴ auf den industriellen Sektor. In den letzten Jahrzehnten hat sich gezeigt, dass die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft unter anderem dem produzierenden Sektor zuzuschreiben ist.⁵ Unternehmen aus diesem Sektor sind bestrebt wirtschaftlich erfolgreich zu agieren und zukünftigen Herausforderungen des Marktes gerecht zu werden. Nachdem sich die Produktion im Laufe der Zeit verändert und auch in Zukunft verändern wird, gilt es konkurrenzfähig zu bleiben.

Laut der Studie „Produktionsarbeit der Zukunft“⁶ ist ein Umschwung der Produktion zu beobachten. Der Mechanisierung, der Industrialisierung und der Automatisierung folgt nun unter dem Begriff Industrie 4.0 die so genannte vierte industrielle Revolution. Termini wie **Komplexität**, **Flexibilität** und **Innovationsfähigkeit** führen zu einem Produktionsumfeld, welches auf die neuen Anforderungen des Marktes reagieren und gleichzeitig qualitative und wirtschaftliche Produkte hervorbringen muss. Am Beispiel der Automobilindustrie kann festgestellt werden, dass sich die Produktion in den letzten hundert Jahren von standardisierten und einheitlichen Fahrzeugen hin zu personalisierten, auf die jeweiligen Verkaufsregionen abgestimmten, Fahrzeugen entwickelt hat und die Produktvielfalt enorm anstieg. Die Losgröße wird gleichzeitig geringer.⁷ Als Losgröße wird die „Menge einer Produktart oder einer Baugruppe, welche in einer Produktionsstufe als geschlossener Posten (Los) ohne Unterbrechung durch die Produktion anderer Produkte oder Baugruppen gefertigt wird“⁸ definiert. Laut der „Globale Digital Operations Studie 2018“⁹ wird, bis 2023 eine Umsatzsteigerung deutscher Unternehmen von 276 Mrd. Euro erwartet. Diese Steigerung ist durch Entwicklung und Investition in digitale Technologien möglich.

Bei oben genannten Begriff der **Komplexität** handelt es sich im Produktionsumfeld vor allem um Variantenkomplexität. Dieser Begriff umfasst den Umgang mit einer Vielzahl unterschiedlicher Produktvarianten im Produktionsprogramm.¹⁰

Flexibilität ist im Bereich der Produktion die Eigenschaft einer Maschine oder eines Fertigungssystems sich an Veränderungen, wie beispielsweise Absatzänderungen, anpassen zu können.¹¹

³ <http://www.statistik.at> Statistik Austria, volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Erstellt am: 30.5.2018

⁴ <https://de.statista.com/> Statista 2018, Statistisches Bundesamt Deutschland

⁵ vgl. Spath, 2013, S. 2

⁶ vgl. Spath, 2013, S. 19–22

⁷ vgl. Bauernhansl, 2014, S. 13

⁸ <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/losgroesse-40747/version-264125>

⁹ vgl. pwc, 2018

¹⁰ vgl. Olbrich & Battenfeld, 2005, S. 161

¹¹ vgl. Adam, 1990, S. 16

Innovationsfähigkeit setzt sich aus der Ideenfindung und der Ideenrealisierung zusammen. Möchte ein produzierendes Unternehmen am Markt bestehen, muss es innovationsfähig sein.¹²

Vernetzte **cyber-physische Systeme** stellen ein zentrales Element künftiger Produktionen dar. Unter diesem Begriff werden kommunizierende, intelligente, sich selbst steuernde Objekte, in einer Mensch-Maschine-Kooperation verstanden. Ein cyber-physischer Montagearbeitsplatz besteht unter anderem aus Sensoren, Aktoren und einem digitalen Netzwerk.¹³

1.1 Ausgangssituation

Die neuen Marktanforderungen führen bei produzierenden Unternehmen zu neuen Herausforderungen. Bedingt durch hohe Automatisierungskosten, einer hohen Anzahl an Varianten und geringen Losgrößen, werden Montagetätigkeiten komplex und benötigen Flexibilität in der Durchführung. Menschliche Arbeitskräfte besitzen sowohl hohe Flexibilität, als auch eine starke Lernfähigkeit, daher werden sie in Produktionsbetrieben vor allem in der Montage von Produkten eingesetzt.¹⁴ Der Mensch wird in einen Produktionsprozess integriert und ist Teil eines Montagesystems.

Das Ziel moderner Montagesysteme ist ein unterbrechungsfreier und zeitlich synchronisierter Arbeitsfluss von Mensch und Maschine in einem gemeinsamen Arbeitssystem, welches eine hohe Produktivität und gleichzeitig eine hohe Mitarbeiterakzeptanz erreicht.¹⁵

Am Standort der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“¹⁶ arbeiten verschiedene Institute der Universität mit diversen Partnerunternehmen zusammen, um Produktionskonzepte, welche den Marktanforderungen der Zukunft entsprechen, zu entwickeln und zu testen. Eines der aktuellen Projekte ist der Aufbau einer Produktionslinie eines 3D-Druckers. Hierzu sollen aktuelle Systeme zur Industrie 4.0 konformen Produktion und Montage getestet werden. Die aktuelle Situation in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ kann folgendermaßen beschrieben werden: Der 3D-Drucker wird auf einem fahrerlosen Transportsystem (FTS) montiert. Der Werker beendet einen Montageabschnitt, anschließend muss er den Montagefortschritt über

¹² vgl. Biermann & Dehr, 1997, S. 79

¹³ vgl. Müller, Speicher & Hörauf, 2014, S. 18

¹⁴ vgl. Bley et al., 2004, S. 1

¹⁵ vgl. Bauernhansl, 2014, S. 535–537

¹⁶ Die „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ ist eine Einrichtung der Technischen Universität Wien zur Untersuchung neuer Systeme und Konzepte in der Produktion. Sie soll auf die neuen Herausforderungen der Industrie 4.0 in der Serienproduktion und Montage mit vielen Varianten reagieren, Lösungen entwickeln und diese testen.

ein Tablet manuell bestätigen, um die Anleitung für den nächsten Montageschritt zu erhalten. Unterstützt wird der Arbeiter durch Informationsbereitstellungen, sowie technische Vorrichtungen, um die Montagetätigkeit zu erleichtern. Auf diesen Punkt wird in der vorliegenden Arbeit noch genauer eingegangen.

1.2 Problemstellung

Die eben angeführte Unterstützung der manuellen Montagetätigkeit soll zu einem sowohl flexiblen, als auch wirtschaftlichen und effizienten Montagesystem führen.

Aktuell beschäftigt sich das Unternehmen Armbruster Engineering mit der Entwicklung und permanenten Verbesserung eines „Elektronischen Linien-Anbindung von Montageanlagen“-Systems (ELAM-System). Dieses System bietet einige Funktionen, darunter *Mitarbeiter informieren und führen, Montage überwachen, sowie Montagevorgänge anzeigen und abfragen*.¹⁷ Die Montageunterstützung erfolgt vernetzt, allerdings benötigt das System Informationen über den aktuellen Fortschritt der Montage, um die richtigen Informationen zur richtigen Zeit anzeigen zu können. In den letzten Jahren hat das Unternehmen begonnen weitere technische Elemente zu integrieren, wie beispielsweise Entnahmefächer für Montageteile mit Tasten oder Sensoren, um die gewonnenen Informationen an das ELAM-System weiterzuleiten.¹⁸ Teilweise kann dadurch auf den Montagefortschritt geschlossen werden, ohne Montagetätigkeiten erheblich zu unterbrechen.

Um eine effiziente Unterstützung zu ermöglichen muss der Montagefortschritt automatisiert erkannt werden, da ansonsten ein Zeitverlust, bedingt durch eine manuelle Eingabe des Montagefortschritts durch den Montagemitarbeiter, entsteht. Mit Hilfe einer automatisierten Fortschrittserkennung können weitere Informationen, Werkzeuge oder Hilfsmittel zum richtigen Zeitpunkt dem Werker zur Verfügung gestellt werden, ohne ihn in seiner Montagetätigkeit durch administrative Tätigkeiten zu unterbrechen. Assistenzabläufe könnten bei Bedarf automatisch eingeleitet werden.

Ein Problem der 3D-Druckerproduktion an der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ besteht darin, dass der Arbeiter bei vielen Montageschritten administrative Handlungen setzen muss (weitschalten der Anleitung durch manuelle Bestätigung des Montagefortschrittes), wodurch der Montagefluss unterbrochen wird. Ein Zeitverlust entsteht und die Wirtschaftlichkeit des Montagesystems wird reduziert.

Es stellt sich die Frage, welche Möglichkeiten bereits bestehen bzw. wie diese eingesetzt werden können, um Montagefortschritt automatisch zu erkennen. Es gilt zu

¹⁷ <http://www.armbruster.de/>

¹⁸ <http://www.armbruster.de/elam-zusatzfunktionen.html>

erörtern, wieviel Prozent der Montagefortschrittserkennung mit diesen Möglichkeiten abgedeckt wird.

Zusammenfassend lassen sich folgende Problemstellungen identifizieren:

- Der richtige Zeitpunkt von Informationsbereitstellung in der Montage ist derzeit nicht eindeutig bekannt da nur bedingt auf den Montagefortschritt geschlossen werden kann.
- Montageunterbrechungen durch administrative Tätigkeiten des Mitarbeiters, wie beispielsweise eine Bestätigung des Montagefortschritts, führt dazu, dass die Effizienz des Montagesystems reduziert wird.
- Aktuell verfügbare Systeme sind nur teilweise für Montagefortschrittserkennung geeignet.
- Eine standardisierte Bewertung von Sensorsystemen für Montagefortschritt ist derzeit nicht verfügbar.

1.3 Forschungsfragen

Folgende Forschungsfragen (FF) werden in dieser Diplomarbeit behandelt:

FF1: Welche Sensorkombinationen eignen sich, um physischen Montagefortschritt automatisiert zu erfassen?

FF2: Wie kann die Synchronisation zwischen physischem Montagefortschritt und digitalem Informationsfluss sichergestellt werden?

1.4 Ziele der Arbeit

Ziele dieser Arbeit sind, einerseits die Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung verschiedener Sensorkombinationen in Bezug auf die Verwendung in der Montagefortschrittserkennung, andererseits soll dieses Verfahren auf die 3D-Druckerproduktion in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ angewandt und die daraus resultierende Sensorkombination in die Produktion implementiert werden. Das umgesetzte System soll den Arbeiter in seiner Montagetätigkeit entlasten und eine automatisierte Fortschrittserkennung im Montageprozess ermöglichen. Die manuelle Bestätigung des Montagefortschrittes durch den Mitarbeiter ist nicht mehr erforderlich.

Weitere Ziele sind eine frühzeitige Fehlererkennung und dadurch eine bessere Qualitätssicherung, sowie die Übermittlung des Montagefortschrittes bzw. des Fehlerprotokolls an beteiligte Systeme. Die in dieser Diplomarbeit umgesetzte Lösung

soll gegenüber der aktuellen Variante, der manuellen Bestätigung des Montagefortschrittes, folgende Eigenschaften besitzen:

- Die Fortschrittserkennung erfolgt automatisch und in Echtzeit.
- Der Montagemitarbeiter wird durch das umgesetzte System nicht in seiner Montagetätigkeit gestört.
- Der mechanische Einbau, sowie die Energieversorgung der Elektronik dürfen den aktuellen Montageablauf nicht verändern oder stören.
- Eine Kommunikation des Systems mit anderen Systemen findet über Python statt.
- Eine wirtschaftliche Umsetzung des geeigneten Systems aufgrund des begrenzten Budgets soll umgesetzt werden.
- Das System soll im Vergleich zu anderen am Markt vorhandenen Systemen günstiger sein.

1.5 Methodisches Vorgehen und Struktur der Arbeit

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Beantwortung der Forschungsfragen. Dazu wird im **Kapitel 1** eine Einleitung in das Thema gegeben: Es werden die Ziele, Forschungsfragen sowie der Aufbau der Arbeit beschrieben. Mit einer vergleichenden Literaturrecherche über Sensoren und deren Anwendungsgebiete in **Kapitel 2** werden anschließend in **Kapitel 3**, in Anlehnung an das MTM-Verfahren¹⁹, allgemeine Montagearbeiten in einzelne, messbare Grundbewegungen aufgegliedert. Ziel dieser Aufteilung ist eine Identifikation messbarer Größen in Montageabläufen.

Folgend wird eine Beurteilung der bereits am Markt vorhandenen Lösungen, Sensoren und Sensorsysteme, in Bezug auf die 3D-Druckerproduktion der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ durchgeführt. Die Auswahl der Sensoren wird mit dem in der Diplomarbeit entwickelten Bewertungsverfahren in **Kapitel 4** erfolgen. In **Kapitel 5** wird anschließend das ausgewählte System vorgestellt und an die Produktionsprozesse der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ angepasst. Dazu wird das System zuerst konstruktiv als 3D-Modell entwickelt und mittels Finite-Elemente-Analyse auf die mechanischen Belastungen geprüft, bevor die benötigten Teile gefertigt werden. Die Umsetzung und Implementierung in den aktuellen

¹⁹ Das MTM-Verfahren ist ein Zeitermittlungsverfahren, welches allen Grundbewegungen Zeiten zuordnet und durch das Aufsummieren dieser Zeiten einen Überblick über die Gesamtzeit gibt. MTM steht für Methods-Time Measurement.

Produktionsprozess der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ bildet den praktischen Teil der Arbeit.

Die Evaluierung des entwickelten Systems wird mittels einer Testreihe analysiert, um die Aussagekraft der Fortschrittserkennung zu bestimmen. Außerdem wird die Genauigkeit, die Zuverlässigkeit und die Fehleranfälligkeit des Systems ermittelt. Des Weiteren wird eine SWOT-Analyse durchgeführt, um das Potential, beziehungsweise die Grenzen der umgesetzten Lösung zu beleuchten.

Im **Kapitel 6** wird ein allgemeiner Ausblick und eine kritische Betrachtung der umgesetzten Lösung erläutert.

Die folgende Tabelle fasst die wesentliche Struktur und das methodische Vorgehen dieser Forschungsarbeit zusammen.

Kapitel	Inhalte	Ziele	Methoden
1	Einleitung in das Thema	Überblick über das Thema geben	Literaturrecherche
2	State of the Art, Vorstellung von Sensorsystemen	Potential für Montagefortschritt identifizieren	Internet- und vergleichende Literaturrecherche
3	Entwicklung eines Bewertungssystems	Verfahren zur Bewertung von Sensorkombinationen entwickeln	MTM-Verfahren, Literaturrecherche
4	Vorstellung der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“, Anwendung des Bewertungssystems	Sensorauswahl für die „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ durchführen	Anwendung des Verfahrens aus Kap. 3, Analyse der Ergebnisse
5	Entwicklung, Implementierung und Evaluierung des Systems	Prototyp entwickeln, Stärken und Schwächen des Prototyps analysieren	Versuchsdurchführungen, Testreihen, Auswertungen der Ergebnisse
6	Zusammenfassung und allgemeiner Ausblick	Zukünftige Verbesserungen und Alternativen aufzeigen	Auswertungen, Recherche

Tabelle 1: Struktur der Arbeit und methodische Vorgehensweise

2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel wird eine Zusammenfassung der aktuellen Produktions- und Montagekonzepte gegeben, um anschließend die aktuellen Anforderungen an ein Produktionsunternehmen und die daraus resultierenden Probleme darzustellen. Zuletzt werden Sensoren und Sensorsysteme vorgestellt, welche eingesetzt werden, um den angeführten Problemen entgegenzuwirken und den zukünftigen Anforderungen an die Produktionsunternehmen zu entsprechen.

2.1 Montage in der heutigen Produktion

In der Literatur werden drei Arten der Montage unterschieden: automatische, halbautomatische und manuelle Montage.²⁰

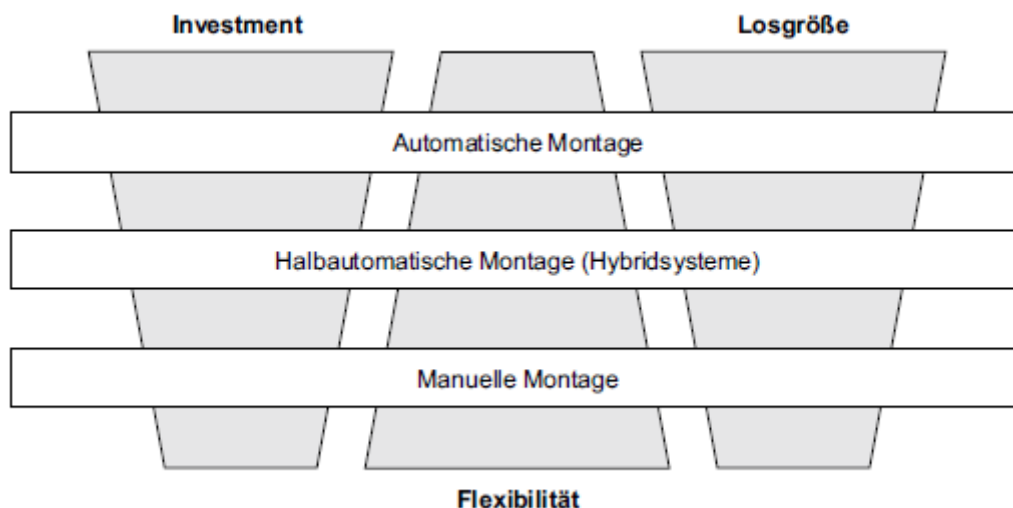


Abbildung 1: Auswahlkriterien für Montagesysteme²¹

In Abbildung 1 sind verschiedene Montagearten hinsichtlich Investment, Flexibilität und Losgröße dargestellt. Eine automatische Montage wird erst bei großen Losgrößen wirtschaftlich. Hohe Investitionskosten bei geringer Flexibilität sind charakteristisch für diese Art der Montage.²² Die automatisierten Vorgänge beziehen sich hauptsächlich auf qualitätsbestimmende Füge- und Prüfvorgänge. Eine halbautomatische Montage besteht aus einer Zusammensetzung von automatischen und manuellen Montagestationen. Diese Art der Montage wird von Hybridsystemen bestimmt. Letztere werden bei Losgrößen, welche zu klein für eine wirtschaftliche Vollautomatisierung und gleichzeitig zu groß für Einzelproduktionen sind, eingesetzt. Sie zeichnen sich durch geringe Investitionskosten gegenüber einer

²⁰ vgl. Lotter, 2012, S. 3

²¹ Lotter, 2012, S. 3

²² vgl. Lotter, 2012, S. 3

Vollautomatisierung, allerdings auch durch eine erhöhte Flexibilität aus. Die manuelle Montage zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität bei geringen Investitionskosten und ebenfalls geringen Losgrößen aus.²³ In der Literatur wird der Begriff der cyber-physischen Montage verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Montagestation, in der manuelle Montage durch mechanische Aktoren unterstützt wird.²⁴ Eingebettete Systeme zur Steuerung und Überwachung physischer Montageaktivitäten mittels Sensoren kommunizieren mit einem globalen, digitalen Netz: dem „Cyberspace“. Dies ermöglicht eine Verbindung zwischen physischen Vorgängen und digitalen Netzen.²⁵

Eine der heutigen Anforderungen an die Produktion ist unter anderem eine hohe Flexibilität bei einem globalen, wirtschaftlichen Wettbewerb. Veränderungen in der Produktion müssen durch technologische Hilfsmittel möglich sein, um beispielsweise auftragsbedingte Schwankungen der Produktionsmenge oder der Produktart ausgleichen zu können. Hierbei kommen einerseits Software- und Datenverarbeitungssysteme zum Einsatz, welche keinen physischen Eingriff in den Fabrikaufbau notwendig machen und andererseits modulare Bauweisen der Produktionsmaschinen, um deren Umbau und Anpassung effizient und wirtschaftlich zu gestalten. Beides sollte gegeben sein, um schnell auf Änderungen der Marktanforderung reagieren zu können und somit die rasche Einführung neuer Produktmodelle und Varianten zu gewährleisten.²⁶

2.1.1 Derzeitige Problemstellungen

Die Herstellung von Produkten mit einem hohen Anteil an manuellen Montageaktivitäten wird aufgrund der steigenden Personalkosten meistens in Länder mit niedrigen Lohnkosten ausgelagert. Bei manchen Produktgruppen, wie Computer oder elektronischen Geräten hat sich allerdings, anders als bei der Automobilindustrie, noch keine Automatisierung durchsetzen können. Aufgrund der heute geforderten Variantenvielfalt und den geringen Losgrößen erscheint eine Vollautomatisierung nicht wirtschaftlich.²⁷ Derzeit fehlen die Interaktions- und Produktionstechnologien, um eine wirtschaftliche Lösung für die Individualisierung und die Variantenvielfalt von komplexen mechatronischen Produkten zu geben.²⁸ Das Ziel einer skalierbaren Automatisierung in der Montage führt zu einer Mensch-Roboter Kollaboration.²⁹

Die „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ ist eine Forschungseinrichtung in Wien, die sich mit neuen Konzepten und Lösungen für eine variantenreiche Serienproduktion befasst. Diese Art der Serienproduktion zeichnet sich vor allem durch eine große Anzahl an

²³ vgl. Lotter, 2012, S. 3, 69

²⁴ vgl. Müller, Speicher & Hörauf, 2014, S. 18

²⁵ vgl. Broy & Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2010

²⁶ vgl. ElMaraghy, 2009, S. 4

²⁷ vgl. Reinhart, 2017, S. 610

²⁸ vgl. Lindemann, Reichwald & Zäh, 2006, S. 16

²⁹ vgl. Björn & Hao, 2013

Varianten und eine daraus resultierende Produkt- und Prozesskomplexität aus.³⁰ Um Mitarbeiter in der zunehmend komplexer werdenden Montagetätigkeit zu unterstützen, werden Assistenzsysteme eingesetzt.³¹ Hierbei werden energetische Assistenzsysteme zur körperlichen Unterstützung (z.B. Motoren) und informatorische Assistenzsysteme zur Informationsübermittlung (z.B. Datenbrillen) unterschieden.³² Um die Konzepte und Lösungen praxisnah zu testen, wurde eine Demonstrationsmontagelinie aufgebaut, in der ein Montagemitarbeiter einerseits durch Roboter, andererseits mit der Bereitstellung elektronischer Informationen in seiner Montagetätigkeit unterstützt wird. Bei diesen Informationen handelt es sich um Montageanleitungen sowie um Rückmeldungen, ob die Montage erfolgreich oder fehlerhaft war. Ein Forschungsgebiet der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ besteht darin, relevante Informationen zu identifizieren und diese dem Montagemitarbeiter mit Hilfe von Assistenzsystemen zu übermitteln. Maschinen werden nicht nur durch den Menschen mit Informationen versorgt, sondern müssen auch selbst zuverlässig Informationen mit Hilfe von Sensoren erfassen. Dem Montagemitarbeiter müssen nicht nur die richtigen Teile, sondern auch die Informationen, wie beispielsweise der nächste Arbeitsschritt, oder welche Fehler bei der Montage aufgetreten sind, zur Verfügung gestellt werden.

Die bereits im ersten Absatz erwähnte Demonstrationsmontagelinie ist so aufgebaut, dass der Mitarbeiter nach Erledigung des Montageschritts manuell den Montagefortschritt auf einem Tablet bestätigt. Aufgrund der Bestätigung des Mitarbeiters werden die nächsten Arbeitsanweisungen auf dem Gerät eingeblendet. Sensoren können Abhilfe schaffen, um fertige Arbeitsschritte automatisch zu erkennen.

Um den Menschen in der Produktion zu unterstützen, wird versucht, dessen Fähigkeiten und Körperaufbau nachzustellen. Das Skelett wird durch Halterungen und die Muskeln durch Aktoren, wie Motoren oder Zylinder, ersetzt. Die Funktion des Gehirns wird durch Steuerungselektronik übernommen und die Programme entscheiden über weitere Aktionen, je nach Eingangsdaten. Diese Daten müssen durch Sensoren gewonnen werden, welche die Sinne des Menschen nachbilden.³³

Die Montage ist komplex und daher agieren Sensoren als zusätzliche Unterstützung des Menschen.³⁴ In der vorliegenden Arbeit werden Sensoren genutzt, um einerseits eine unterstützende Funktion auszuüben, wie beispielsweise die Bereitstellung von Informationen über Montageschritte, andererseits sollen Sensoren eine

³⁰ vgl. Lindemann, Reichwald & Zäh, 2006, S. 10

³¹ vgl. Hinrichsen, Riediger & Unrau, 2017

³² vgl. Reinhart, Shen & Spillner, 2013, S. 543–547

³³ vgl. Eißler, 1996, S. 4

³⁴ vgl. Hinrichsen, Riediger & Unrau, 2017

qualitätssichernde Funktion einnehmen und Fehler in der Montage, oder in der Produktion frühzeitig erfassen und den Montagemitarbeiter informieren.

2.1.2 Sensoreinsatz in der Montage

In Zukunft soll diese Datenbereitstellung automatisiert erfolgen. So genannte Assistenzsysteme sollen den Mitarbeiter mit Daten und Informationen unterstützen und gleichzeitig die Montagetätigkeit so wenig wie möglich stören. Damit dem Mitarbeiter ein Feedback, beziehungsweise die richtige Information zur richtigen Zeit automatisiert zur Verfügung gestellt werden kann, müssen die Maschinen Daten erfassen und Zustände beurteilen können. Neben technischen Aspekten, wie der Umsetzung der Datenbeschaffung, Datenübertragung, Fehlererkennung, Datensicherheit und Datenschutz sind auch soziale Faktoren, wie beispielsweise Ergonomie, Arbeiterschutz und Privatsphäre, zu berücksichtigen.³⁵

Der Begriff **Sensor** ist ein Synonym für einen Messwertaufnehmer. Darunter wird ein Sensorelement und zugehörige Elektronik verstanden. Das Ziel eines Sensors ist „die Erfassung einer Messgröße und ihre Umsetzung in ein elektrisches (bei analogen Schnittstellen) oder logisches (bei digitalen Schnittstellen) Signal, das zur Anzeige und/oder Speicherung und/oder weiteren Verarbeitung, z.B. in Regelstrecken weitergereicht wird“.³⁶

Unter dem Begriff **Sensorsystem** oder **Smart Sensors** wird ein oder mehrere Sensoren verstanden, welche in einem intelligenten System Funktionen wie Selbstabgleich, Selbstüberwachung und eine umfangreiche Signalkonditionierung besitzen. Ein Beispiel für ein derartiges System ist der Beschleunigungsmesser der Firma Bosch. Dieser bringt mehrachsige Beschleunigungssensoren mit einem Drehratensensor und einer dazugehörigen Signalverarbeitung in einem Gehäuse unter.³⁷

Messdaten verschiedener Sensortypen können dieselben Ergebnisse liefern, beziehungsweise ein zusätzlicher Sensor, basierend auf einer anderen physikalischen Größe kann die Montagefortschrittsüberprüfung unter Umständen nicht erhöhen. So ist beispielsweise eine positive Identifizierung einer Schraube am Bauteil durch einen optischen Sensor und einen Gewichtssensor eine doppelte Überprüfung für den Einbau der Schraube. Abhängig von den Schritten, aus welchen sich die Montage zusammensetzt, können verschiedene Sensorkombinationen verwendet werden. In Anlehnung an Hesse und Schnell³⁸, welche die Aufgabengebiete von Sensoren in der

³⁵ vgl. Bechtolf & Zöllner

³⁶ vgl. Sauerer & Schütze, 2013, S. 13

³⁷ vgl. Sauerer & Schütze, 2013, S. 18

³⁸ vgl. Hesse & Schnell, 2011, S. 14–15

Fertigungstechnik beschreiben, können folgende Aufgaben in der Montage unterschieden werden:

- Überprüfung ob ein Teil (Schraube, Rahmen, Mutter etc.) vorhanden ist:
Hier ist festzuhalten, dass es sich um ein einzelnes Objekt handeln kann, oder aber auch um eine Vollständigkeitskontrolle eines kompletten Bauteils. Im Falle der Montage kann sowohl das vorhandene Objekt am Bauteil, als auch dessen Entnahme aus einem Behälter überprüft werden.

- Überprüfung der Identität eines Teils:
Im Montagebereich handelt es sich dabei um die Überprüfung, ob das entsprechende Teil montiert wurde oder ein Fehler in der Montage aufgetreten ist.

- Überprüfung der Position beziehungsweise der Orientierung eines Objekts:
Hier wird vor allem auf die Erkennung der Position eines Objekts gegenüber dem Bauteil, anderen Objekten, oder aber auch gegenüber einem ortsfesten Referenzpunkt, abgezielt.

- Überprüfung der Montageeigenschaften:
Um die Qualität der Montage zu garantieren, ist es weiters wichtig, ob ein bestimmtes Drehmoment beim Eindrehen einer Schraube erreicht wurde, eine Steckverbindung ordentlich verbunden oder eine Klebverbindung ordnungsgemäß durchgeführt wurde.

In den Werken „Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation³⁹“ und „Praktischer Einsatz von berührungslos arbeitenden Sensoren⁴⁰“ beschreiben die Autoren Sensoren als das „Wahrnehmungsvermögen der Maschinen“. Sie ziehen die direkte Parallele zwischen Mensch und Maschine, indem sie, wie in Tabelle 2 ersichtlich, die fünf Sinne des Menschen der Sensorik gegenüberstellen.

³⁹ vgl. Hesse & Schnell, 2011, S. 1

⁴⁰ vgl. Eißler, 1996, S. 1–10

Mensch	Sinn	Organ	Sensorik	Erfassung von
Hören	Gehör	Ohr	Mikrofon	Schall
Sehen	Licht	Auge	Fotozelle, Kamera	Licht, Konturen, Szenen
Fühlen	Temperatur Schwere Kraft Tastsinn	Haut Muskel Nerven	Thermometer Waage Dehnmessstreifen Fühler, Schalter	Wärme Masse Kraft, Drehmoment Form, Lage
Riechen Schmecken	Geruch Geschmack	Nase Zunge/Gaumen	Rauchmelder Künstliche Zunge	Rauch, Gasen Inhaltsstoffen

Tabelle 2: Sinne und Sensoren⁴¹

Weiters wird erwähnt, dass Sensoren neben diesen Messgrößen noch weitere erfassen können, welche den menschlichen Sinnen nicht zugänglich sind. Dazu zählen beispielsweise chemische oder biologische Messgrößen. Das menschliche Wahrnehmungsvermögen besteht aus einer Kombination mehrerer Informationen unterschiedlicher Sinnesorgane. Das Gehirn vernetzt diese Daten und trifft anhand dieser Entscheidungen. Es gilt zu identifizieren, welche der bereits entwickelten Sensoren welche physikalischen Größen erfassen können.

2.2 Sensoren

In diesem Kapitel wird ein Überblick über verschiedene Sensorarten und ihre Funktionsprinzipien gegeben. Aufgrund einer großen Vielfalt an Sensoren wurde, speziell für den Bereich der Montagefortschrittserkennung, eine Auswahl getroffen.

Die gewählten Sensoren und Sensorsysteme bilden in weiterer Folge auch eine Grundlage für das entwickelte Bewertungsverfahren zur automatisierten, sensorgestützten Montagefortschrittserkennung.

2.2.1 Optische Sensoren

Folgendes Kapitel beschreibt in einem ersten Teil die physikalischen Messgrößen optischer Sensoren und deren Funktionsweisen. Anschließend werden verschiedene Sensoren und deren Einsatzgebiete vorgestellt.

Löffler beschreibt in seinem Werk „Optische Sensorik“⁴² den aktuellen Kenntnisstand über Licht mit folgenden drei Eigenschaften:

1. Bei dem Begriff „Licht“ handelt es sich um eine elektromagnetische Strahlung, welche einen Bereich von $\lambda \approx 10^{-14}$ m bis hin zu $\lambda \approx 10^6$ m umfasst. Optische Strahlung wird mit einer Wellenlänge im Bereich $100 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1$

⁴¹ Hesse & Schnell, 2011, S. 1

⁴² vgl. Löffler-Mang, 2012, S. 2–6

mm laut DIN 5031 festgelegt. Der davon sichtbare Bereich reicht von einer Wellenlänge von 380 nm, mit dem Auge als violett wahrzunehmen, bis 780 nm, dunkelrot.

2. Licht breitet sich im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s aus.
3. Licht hat Wellen- und Teilchencharakter.

Vorteile optischer Sensoren sind eine berührungslose Arbeitsweise, ein Einsatzbereich über eine große Distanz, kein Verschleiß und daher eine lange Lebensdauer.⁴³ In den folgenden Absätzen werden Sensoren vorgestellt, welche Lichteinfall erkennen können. Zunächst werden Lichtschranken und Lichttaster vorgestellt, anschließend wird ein Kamerasystem beschrieben, das mit einer bildverarbeitenden Software ausgestattet ist.

In der Fabrikautomatisierung werden unter anderem Lichtschranken und Lichttaster eingesetzt.⁴⁴ Grundsätzlich bestehen sie aus einem Sender und einem Empfänger. Der Sender strahlt Licht aus, wobei es sich in den meisten Fällen um Infrarotlicht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 880$ nm oder $\lambda = 950$ nm handelt. Die Vorteile des Infrarotbereichs sind die maximale Empfindlichkeit des Empfangstransistors bei dieser Wellenlänge, sowie die Unempfindlichkeit gegenüber Fremdlichteinwirkungen und Partikel mit einem kleineren Durchmesser als der Wellenlänge. In manchen Bereichen wird auch Rotlicht mit $\lambda = 660$ nm verwendet. Beim Empfänger handelt es sich um ein lichtempfindliches Element, meistens aus dem Halbleitermaterial Silizium. Bei Lichteinwirkung verbessert sich die Leitfähigkeit des Halbleiters, wodurch erkannt wird, ob ein Lichtstrahl auftrifft oder nicht. Bei diesen optischen Sensoren können zwei verschiedene Zustände erkannt werden: Die An- bzw. Abwesenheit von auftreffenden Lichtstrahlen am Empfänger.

Je nach Aufbau lassen sich verschiedene Lichtschrankenarten unterscheiden:

- Liegen Sender und Empfänger gegenüber, wird von einem **Einweglichtschranken** gesprochen. Diese Art von Lichtschranken besitzt einen Einsatzbereich bis 100 m. Unter dem Begriff „Einsatzbereich“ wird von der Länge der Lichtschranken gesprochen. Im Fall einer Einweglichtschranke handelt es sich um die Distanz zwischen Sender und Empfänger.
- Liegen Sender und Empfänger auf derselben Seite, in einem gemeinsamen Gehäuse, handelt es sich um eine **Reflexlichtschranke**. Das Licht wird von einem Reflektor zurückgeleitet, der Einsatzbereich liegt bei bis zu 4 m.

⁴³ vgl. Hesse & Schnell, 2011, S. 62

⁴⁴ vgl. Hesse & Schnell, 2011, S. 65–66

- Von **Reflexlichttastern** spricht man, wenn das Objekt selbst als Reflektor dient. In diesem Fall liegt der Einsatzbereich zwischen 0,1 und 0,4 m.

Heutzutage werden neben diesen sehr wichtigen binären Schaltern auch wesentlich komplexere optische Messsysteme eingesetzt. Diese Systeme arbeiten mit RGB- und Infrarotkameras. Sie besitzen eine Bildverarbeitungssoftware, welche mittels Pixelvergleiche, sowohl die An- als auch die Abwesenheit von Bauteilen, sowie deren Ausrichtung im Raum erkennen können.

In den folgenden Absätzen wird die amerikanische Cognex Corporation vorgestellt. Das Unternehmen ist der weltweit führende Anbieter von Vision-Systemen.⁴⁵ Die Produkte werden als Bildverarbeitungstechnologie beschrieben, welche zur Qualitätssicherung eingesetzt werden kann. Die Ziele des Unternehmens sind Fehlererkennung, Identifizieren, Sortieren und Rückverfolgen von Teilen sowie das Überwachen von Produktionslinien.

Bei den Produkten handelt es sich vor allem um optische Sensoren, welche mit Hilfe von Bildbearbeitungssoftware Objekte, beziehungsweise deren Zustände, beurteilen. In weiterer Folge wird eines dieser Produkte, die In-Sight 2000, welche in Abbildung 2 dargestellt ist, näher beschrieben. Sie eignet sich für industrielle Anwendungen und besteht aus einer Kamera und einer entsprechenden Bildverarbeitungssoftware.



Abbildung 2: In-Sight® 2000⁴⁶

⁴⁵ <http://www.cognex.com/>

⁴⁶ vgl. cognex, 2016



Abbildung 3: Aufbau der In-Sight® 2000⁴⁷

Der Sensor besteht aus drei Hauptelementen, wie in Abbildung 3 dargestellt. Das optische Modul (1), welches aus einer Linse und einem LED-Ring besteht, gewährleistet eine ausreichende Belichtung des Arbeitsbereichs und ist zuständig für die Lichtaufnahme. Das Hauptmodul (2) besteht aus dem Sensor und dem Prozessor. Das dritte Element ist ein Verbindungsmodul (3), an dem unter anderem ein Ethernet Anschluss angebracht ist, welcher den Datentransfer an die Bildverarbeitungssoftware ermöglicht.

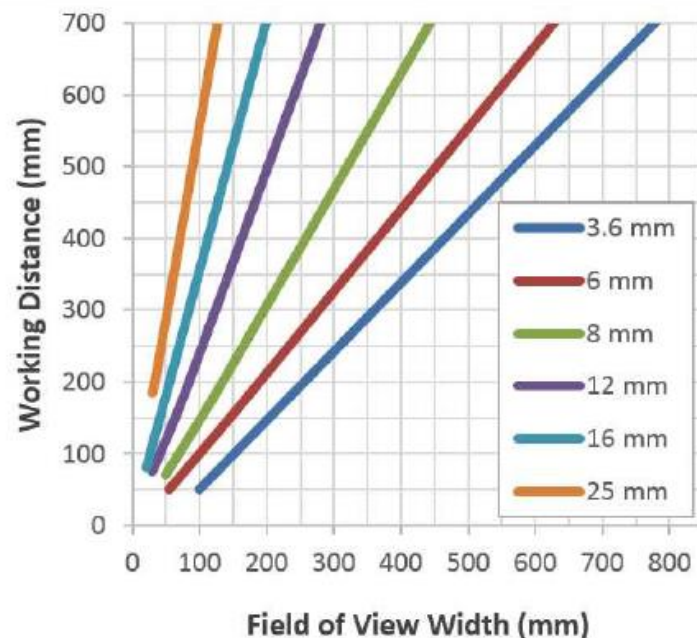


Abbildung 4: Arbeitsbereich und Sichtfeld für In-Sight® 2000 Modelle mit 640x480 Auflösung⁴⁸

In Abbildung 4 sind die Kennlinien der einzelnen Linsen (3,6 bis 25 mm Durchmesser) dargestellt. Als „Working Distance“ wird die Distanz zwischen Linse und dem zu

⁴⁷ vgl. Cognex, 2016, S. 8

⁴⁸ Cognex, 2016, S. 17

beurteilenden Objekt definiert. Das Field of View ist der Bereich, den der Sensor erfassen kann. Bei steigender Distanz, steigt auch der Bereich, den der Sensor erfassen kann, allerdings sinkt dadurch die Genauigkeit erfassbarer Merkmale. Die Auflösung der Kamera ist begrenzt, daher stehen für ein Bild immer dieselbe Anzahl an Pixel zur Verfügung. Werden nun Szenen aus größerer Distanz aufgenommen, steht trotzdem nur eine begrenzte Pixelanzahl zur Verfügung, wodurch Bilder weniger Details aufweisen. Anhand der Kennlinien in Abbildung 4 lässt sich erkennen, dass der Sensor für eine maximale Arbeitsdistanz von bis zu 800 mm ausgelegt ist.

Die Fokussierung des Sensors findet nicht automatisch statt, sondern muss mechanisch mit einer Schraube eingestellt werden. Abstände von zu überprüfenden Oberflächen müssen daher möglichst einheitlich sein. Diese Voraussetzung ist in der industriellen Montageüberprüfung selten gegeben. Beleuchtung sowie Linse, sind leicht austauschbar und können je nach Bedarf, angepasst werden. Farbe bzw. Wellenlänge der eingesetzten Lichtquelle können somit auf die Umgebung abgestimmt werden, um eine optimale Belichtung zu erzielen.

Nachfolgend wird die Software einer In-Sight 2000 vorgestellt. Die Informationen wurden aus dem Demonstrationsvideo⁴⁹ des In-Sight Vision Systems gewonnen. Die Software „In-Sight Explorer“ bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche. Mit Hilfe dieser Software können anhand von Referenzbildern Merkmale eines Objekts erkannt werden. An einem Referenzbild wird ein Prüfbereich definiert, anschließend werden Merkmale auf dem Referenzbild festgelegt. Die Software ist derart konfiguriert, dass sie das aufgenommene Bild auf diese Merkmale untersucht und die Möglichkeit besteht, einen bestimmten Verdrehungsgrad einer Aufnahme zu tolerieren. Weist ein zu überprüfendes Livebild alle Merkmale auf, hat es bestanden und erhält einen grünen Rahmen, ansonsten einen roten. Für zu überprüfende Merkmale können weitere Toleranzen festgelegt werden. Zulässige Abweichungen können mit Hilfe von Verdrehungsgraden oder Pixelabweichungen definiert werden. Die Software kann somit auch Bilder, welche beispielsweise um 180° verdreht sind auf Merkmale untersuchen.

Weitere Funktionen, neben Barcode-, Buchstaben-, Zahlen- und Positionserkennung, sind Abstandsmessungen, sowie logische Abhängigkeiten von Bedingungen. Dazu zählt, dass die Software beispielsweise Merkmale auf einem verdrehten Objekt erkennen kann, auch wenn sich die Rotationsachse nicht direkt beim Merkmal befindet.

Die Cognex Software wurde bereits in der Identifizierung von Flugzeugnummern eingesetzt. Hierzu wurde Bildmaterial vom Helsinki-Malmi Flughafen geprüft und es

⁴⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=dpqOB7kzZAE>

konnten 84,7% der analysierten Flugzeuge korrekt identifiziert werden.⁵⁰ Bei diesen Versuchen wurden vor allem die Buchstaben- und Zahlenlesefunktion getestet.

Vorteile:

- Das System eignet sich für sehr präzise „bestanden“, beziehungsweise „nicht bestanden“ Abfragen, in weiterer Folge auch „Pass/Fail-Abfragen“ genannt.
- Mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware können rotations- und translationsunabhängige Bildvergleiche durchgeführt werden. Merkmale auf beweglichen Plattformen können erkannt werden.
- Das System besitzt eine eigene Beleuchtung, wodurch äußere Lichteinflüsse abgeschwächt werden.
- Stromversorgung und Datenübertragung erfolgen über eine Ethernet-Verbindung, welche eine standardisierte Kabelverbindung ist.
- Das System ist industrietauglich und wurde bereits von zahlreichen Unternehmen, wie beispielsweise BMW, Böhlinger Ingelheim, Bosch, Continental etc. zur Qualitätssicherung, Produktionsüberwachung oder Teileidentifikation eingesetzt.⁵¹
- Zusatzfunktionen, wie beispielsweise Barcode- und Zeichenlesefunktionen können für weitere Anwendungen genutzt werden.

Nachteile:

- Die Kamera muss in einem sehr geringen Abstand zur Prüffläche angebracht werden.
- Überprüfungsgebiete beschränken sich aufgrund des geringen Abstandes zur Prüffläche auf eine relativ kleine Fläche.
- Die vorgestellte Kamera besitzt keine automatische Fokussierung, wodurch nur Merkmale in einem bestimmten Abstand scharf erkannt werden. Befindet sich ein Merkmal in einer wechselnden Entfernung zur Kamera wird die Genauigkeit durch Unschärfe minimiert.

Der Preis des Systems beträgt ca. 2.500 Euro.

⁵⁰ vgl. Mekonnen, S. 32

⁵¹ <https://www.cognex.com/>

2.2.2 Tiefenbildsensoren

Traditionelle RGB Kameras können lediglich zweidimensionale Daten aus einer dreidimensionalen Umgebung gewinnen. Tiefendaten gehen bei der Aufnahme verloren. Menschen besitzen, durch die Anordnung ihrer Augen, eine dreidimensionale Wahrnehmung ihrer Umgebung. Diese wird aus zwei verschiedenen Perspektiven aufgenommen und das Gehirn fügt die Daten zu einem dreidimensionalen Bild zusammen. Es arbeitet weiters mit Schatten, Lichteinfall, Erfahrungswerten und Größenrelationen einzelner Objekte, wodurch ein dreidimensionales Bild der Umgebung erzeugt wird.

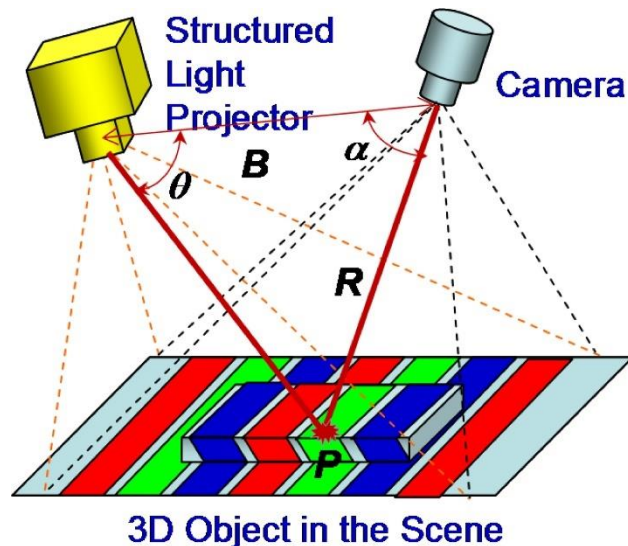
In technischen Entwicklungsabteilungen wird nun versucht, Daten aus einer dreidimensionalen Umgebung zu gewinnen. Um eine derartige räumliche Umgebung zu erfassen, haben sich mehrere Technologien bewährt. Im folgenden Abschnitt werden drei davon vorgestellt: zuerst das Funktionsprinzip einer Stereovision-Technologie anschließend die Structured-Light-Technologie und zuletzt die Time-of-Flight-Technologie (ToF).

Die **Stereovision**-Technologie basiert auf demselben Prinzip, auf welchem auch das menschlichen Augen aufgebaut ist. Es werden zwei, meist idente Kameras auf einer horizontalen Ebene befestigt, wobei der Abstand zwischen beiden bekannt ist. Anhand von Pixelfarbvergleichen werden jene Pixel identifiziert, welche denselben realen Punkt abbilden. Anschließend wird, anhand der Pixelposition am Bild, sowie den Abstand und den Winkel zwischen den Kameras, auf den Abstand zwischen dem Pixel und den Kameras geschlossen. Diese Technologie wurde bereits in der Automobilindustrie getestet, um Fußgänger oder Hindernisse frühzeitig zu erkennen. Allerdings wurden hier nur durchschnittliche Erkennungsraten erzielt.⁵² Aufgrund eines meist relativ geringen Abstandes zwischen beiden Kameras ist die Genauigkeit derartiger Systeme limitiert.

Die **Structured-Light**-Technologie basiert auf einem ähnlichen Prinzip wie die Stereovision-Technologie, mit dem Unterschied, dass nicht zwei Kameras zum Einsatz kommen, sondern ein Projektor und eine Kamera. Ein Muster wird auf die Oberfläche eines Objekts projiziert während die Kamera ein Bild aus einem anderen Winkel aufnimmt. Stellt sich heraus, dass das aufgenommene Bild dasselbe Muster aufweist, dann ist die Oberfläche eben. Wird das Muster wie in Abbildung 5 unterbrochen, ändert sich die Oberflächenstruktur und daher auch die Tiefendaten. Oberflächenänderungen werden mit Hilfe einer Verzerrung des projizierten Musters errechnet, um ein dreidimensionales Bild der Oberfläche zu generieren.⁵³

⁵² vgl. Zhang, 2011

⁵³ vgl. Geng, 2011

Abbildung 5: Structured-Light-Technologie⁵⁴

Die **Time-of-Flight**-Technologie hat sich über die letzten Jahre sehr stark weiterentwickelt. Die ToF Methode setzt als Hardware eine Infrarotkamera und einen Infrarot-Emitter voraus. Das Prinzip besteht darin, ein Infrarotlicht an die Umgebung zu senden und anschließend die Verzögerung des reflektierten IR-Lichtes zu messen. Dabei wird jedem Pixel ein Zeitwert und dementsprechend eine zeitabhängige Farbe zugewiesen. So kann ein dreidimensionales Bild erzeugt werden. Ein limitierender Faktor dieser Technologie ist die begrenzte Intensität des emittierten Infrarotlichts. Eine, von Oberflächenbeschaffenheit und Farbe abhängige Änderung der Amplitude des Infrarotlichtes stellt eine Störgröße in späterer Bildverarbeitung dar.⁵⁵

2.2.3 Gewichtssensoren

Neben optischen Sensoren spielen Sensoren zur Gewichtsermittlung eine wichtige Rolle. Bei den wichtigsten Vertretern dieser Kategorie handelt es sich um Drucklast- und Zuglast-Wägezellen, welche in Abbildung 6 dargestellt sind.

Bei **Drucklast-Wägezellen** wird eine Masse auf eine Wägezelle aufgebracht, wobei sie einer elastischen Druckverformung ausgesetzt wird, die gemessen werden kann. Anwendung findet sie daher häufig in Plattformwaagen. Die **Zuglast-Wägezelle** wird als Zwischenstück in eine Aufhängung eingebaut. Über eine Zugbelastung wird das Gewicht einer angehängten Masse ermittelt.⁵⁶

⁵⁴ vgl. Geng, 2011, S. 131

⁵⁵ vgl. Hansard et al., 2013, S. 2

⁵⁶ vgl. Mettler Toledo Inc., 2010

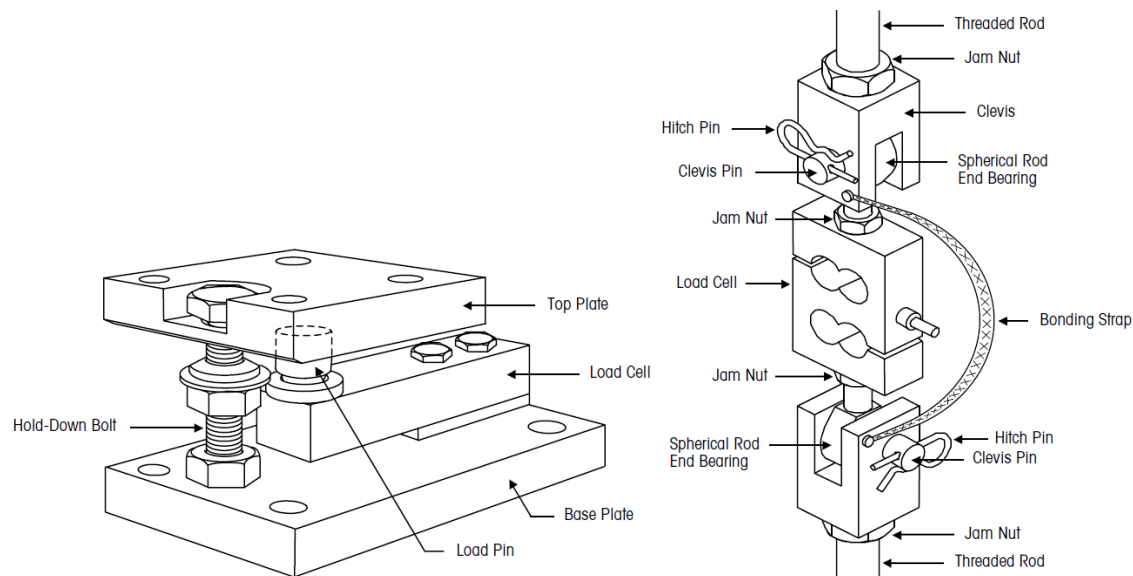


Abbildung 6: Druck- (li.) und Zuglast-Wägezelle (re.)⁵⁷

Das Haupteinsatzgebiet von Wägezellen erstreckt sich über Personen-, Industrie- aber auch Präzisionswaagen. Die „Organisation Internationale de Métrologie Légale“⁵⁸ (OIML) vereinheitlicht Vorschriften und messtechnische Kontrollen. Sie definiert Wägezellen als Kraftaufnehmer, welche unter Berücksichtigung der Erdbeschleunigung und des Auftriebs am Verwendungsort, eine Masse misst. Des Weiteren legt sie auch die wichtigsten Kennwerte einer Wägezelle fest. Einige davon, wie beispielsweise Maximal- und Minimallast, sind in Abbildung 7 dargestellt.

Die Maximallast (E_{\max}) ist die maximale Last, welche auf eine Wägezelle aufgebracht werden darf, ohne einen zulässigen Fehler der Genauigkeitsklasse zu überschreiten.

Die Minimallast (E_{\min}) ist die minimale Last, welche auf eine Wägezelle aufgebracht werden darf, ohne einen zulässigen Fehler zu überschreiten.

Die maximale Last des Messbereichs (D_{\max}) entspricht der größten Masse, welche während der Tests bzw. der Verwendung aufgebracht wird. Um die Funktionsfähigkeit einer Wägezelle nicht zu beeinflussen, muss der Wert von D_{\max} immer kleiner sein als der von E_{\max} .

Das minimale Verifikationsintervall (v_{\min}) gibt Aufschluss über den Mindestteilungswert einer Wägezelle.

Die maximale Anzahl an Teilungen des Verifikationsintervalls (n_{\max}) gibt Aufschluss über die größte Anzahl an Teilungen, für welche eine bestimmte Fehlertoleranz der

⁵⁷ Mettler Toledo Inc., 2010, S. 1-1,1-2

⁵⁸ vgl. OIML R60, 2000

Wägezelle eingehalten wird. Auf den Begriff der Fehlertoleranz wird im Laufe der Arbeit noch genauer eingegangen (siehe Tabelle 3).

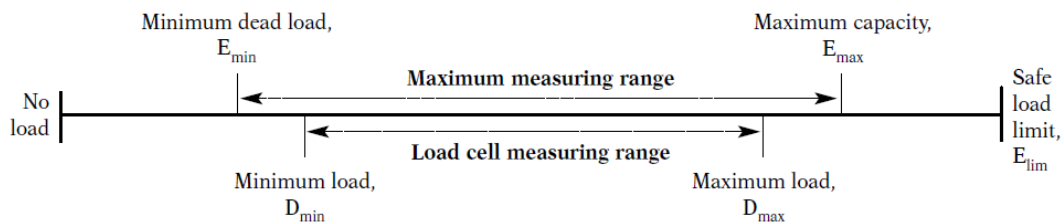


Abbildung 7: Kennwerte einer Wägezelle⁵⁹

Abhängig des Einsatzgebietes einer Wägezelle werden auch zusätzliche Einflussgrößen in der Klassifizierung berücksichtigt. In Abbildung 8 ist ein Beispiel einer derartigen Klassifizierung dargestellt.

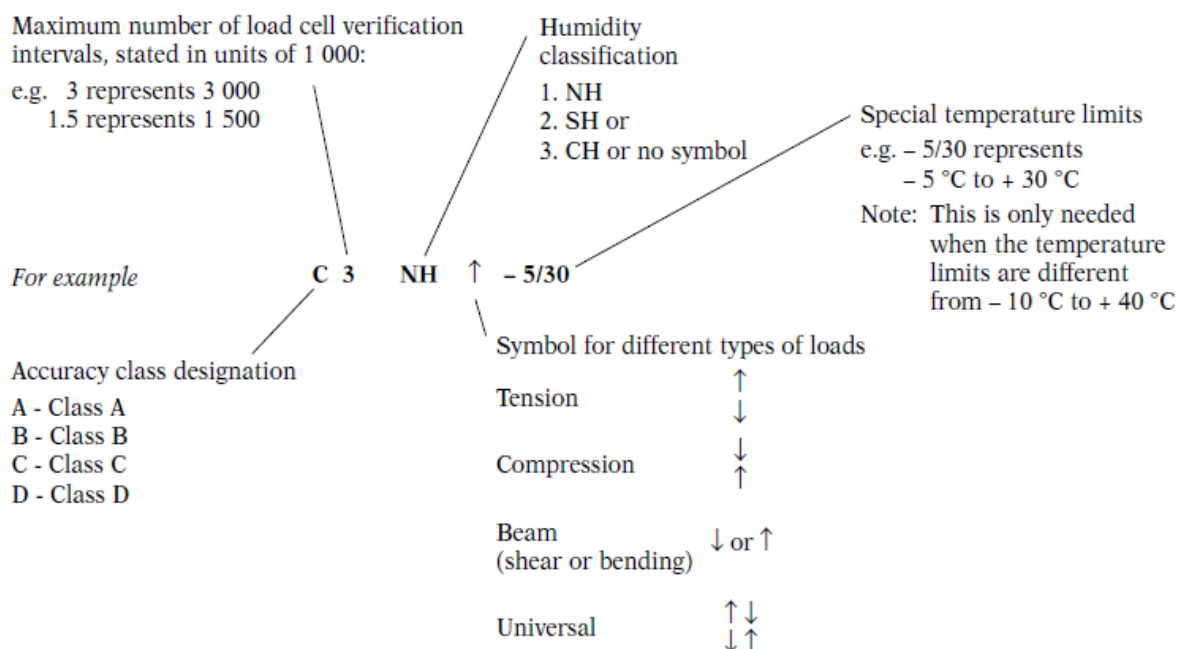


Abbildung 8: Beispiel einer Wägezellen Klassifizierung⁶⁰

Es gibt vier Genauigkeitsklassen A, B, C und D wobei A die höchste Genauigkeit besitzt und D die geringste. Die „3“ im Beispiel steht für die maximale Anzahl an Verifikationsintervallen (n_{max}) und ist mit einem Faktor von 1000 zu multiplizieren. Weitere Informationen aus der Klassifizierung sind: Feuchtigkeitsklasse, Art der Belastung der Wägezelle und zulässiges Temperaturintervall, in welchem die Wägezelle eingesetzt werden darf. In Tabelle 3 sind erlaubte Fehler in den jeweiligen Klassen dargestellt. Der p_{LC} Wert entspricht einem Umlegungsfaktor von 0,7 laut OIML. Bei Wägezellen der Klasse C mit einer maximalen Anzahl von 3000 Teilungsintervallen

⁵⁹ OIML R60, 2000, S. 8

⁶⁰ OIML R60, 2000, S. 9

dürfen beispielsweise Fehler im Bereich von 1,5-mal der Größe eines Verifikationsintervalls auftreten. Der erhaltene Wert muss mit dem p_{LC} Wert multipliziert werden.

mpe	Load, m			
	Class A	Class B	Class C	Class D
$p_{LC} \times 0.5 v$	$0 \leq m \leq 50\,000 v$	$0 \leq m \leq 5\,000 v$	$0 \leq m \leq 500 v$	$0 \leq m \leq 50 v$
$p_{LC} \times 1.0 v$	$50\,000 v < m \leq 200\,000 v$	$5\,000 v < m \leq 20\,000 v$	$500 v < m \leq 2\,000 v$	$50 v < m \leq 200 v$
$p_{LC} \times 1.5 v$	$200\,000 v < m$	$20\,000 v < m \leq 100\,000 v$	$2\,000 v < m \leq 10\,000 v$	$200 v < m \leq 1\,000 v$

Tabelle 3: Fehlertoleranz der jeweiligen Klasse⁶¹

Der Aufbau einer Wägezelle besteht aus einem Metallstück mit einer Querschnittsverjüngung. An der Ober- und Unterseite einer Wägezelle sind Dehnungsmessstreifen (DMS) angebracht, diese dienen der Verformungsmessung, welche im Falle einer Wägezelle durch Einwirkung einer Gewichtskraft erzeugt wird. Das Prinzip eines DMS basiert auf der Querschnitts- und Längenänderung eines Metalldrahtes durch Einwirkung einer Kraft und einer daraus resultierenden Verformung.

Die Verformung eines Drahtes ändert den Widerstand und somit auch die Spannung des elektrischen Aufbaus. Bei Verwendung eines DMS in einer Voll-, Halb- oder Viertelbrückenschaltung kann von einer Änderung der Ausgangsspannung auf die Veränderung der Länge, das heißt somit auch auf eine aufgebrachte Kraft und zuletzt auf die Masse, geschlossen werden. In Abbildung 9 ist ein Schaltkreis einer Wheatstone-Brückenschaltung dargestellt.

⁶¹ OIML R60, 2000, S. 12

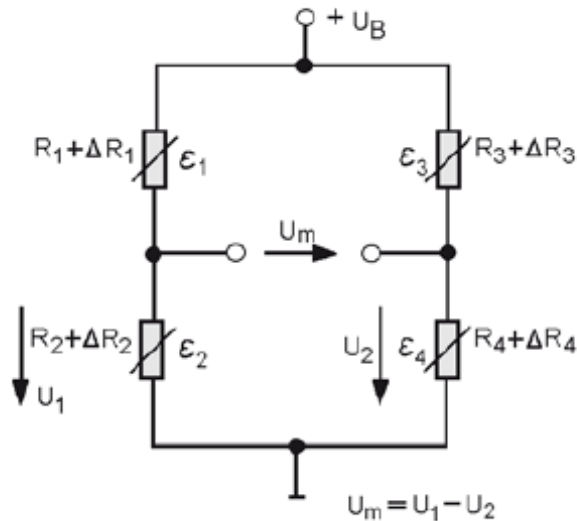


Abbildung 9: Wheatstone-Brücke mit DMS⁶²

Widerstände, hier die DMS, haben einen variablen Anteil (ΔR), welcher sich aufgrund zuvor erwähnter Einflüsse verändert. Ein Vorteil von Vollbrückenschaltungen mit vier DMS ist eine Temperaturkompensation. Dadurch wird ein gemessener Signalunterschied nur mehr durch Gewichtsbelastung und Eingangsspannung hervorgerufen.

Derzeit werden Wägezellen im industriellen Bereich vor allem in Füllstandsmessungen von Silos, Tanks, Trichtern sowie in Gewichtsmessungen von Paketen mittels Förderbandwaagen eingesetzt.⁶³

Im Montagebereich werden an Entnahmebehältern Gewichtssensoren angebracht, um bei Unterschreiten eines bestimmten Gewichts eine automatische Nachbestellungsorder der Teile aus dem Behälter zu veranlassen. An der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ wird aktuell an einer Umsetzung eines derartigen Systems gearbeitet.

2.2.4 Induktive Sensoren

Induktive Näherungssensoren bestehen aus Spulen, welche ein elektromagnetisches Feld erzeugen. Beim Eindringen eines leitenden Materials wird das magnetische Feld gestört, was dazu führt, dass elektromagnetische Schwingungen stark gedämpft werden.⁶⁴ Auf diese Weise kann mit induktiven Sensoren beispielsweise eine Annäherung metallischer Gegenstände erkannt werden.

⁶² Hesse & Schnell, 2011, S. 158

⁶³ vgl. Mettler Toledo Inc., 2010, S. 2–1

⁶⁴ vgl. Hering, 2012, S. 29

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Fehlerüberprüfung von Bauteilen. Das Funktionsprinzip ist dasselbe wie bei einem induktiven Näherungssensor. Durch Veränderung des Signals kann auf Fehler im Bauteil geschlossen werden. Induktive Sensoren können unter anderem eingesetzt werden, um Risse in rotierenden, metallischen Bauteilen zu erkennen.⁶⁵

Nachteile induktiver Sensoren sind, dass einerseits nur metallische bzw. leitenden Objekte erfasst werden können und andererseits, dass das Signal durch, von außen wirkende, Magnetfelder oder Temperaturschwankungen gestört werden kann. Weiters besteht eine Abstandsempfindlichkeit, Risse müssen direkt über dem Sensor liegen, um erkannt zu werden. Wird der Abstand erhöht, lässt auch die Genauigkeit nach.

2.2.5 Barcode, QR-Code und RFID

Barcodes, QR-Codes und RFID-Systeme dienen der Identifizierung von Bauteilen und Produkten.

Barcodes und QR-Codes sind passive Kennzeichnungen von Teilen, Behältern oder Produkten. In Abbildung 10 sind beide Varianten dargestellt. Während ein Barcode eindimensional ist, ist ein QR-Code zweidimensional und kann daher größere Informationsmengen speichern. Durch das Lesen derartiger Codes kann ein Bauteil oder Behälter eindeutig identifiziert werden.⁶⁶

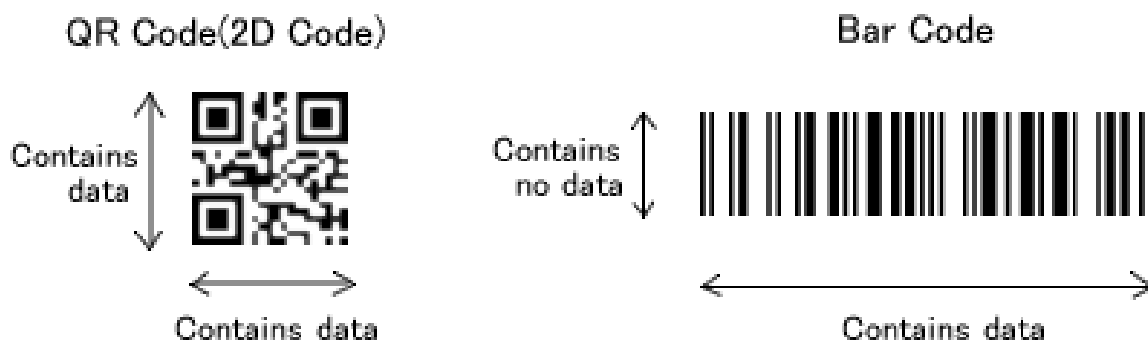


Abbildung 10: QR-Code (li.) und Barcode (re.)⁶⁷

In der Montage werden Materialboxen mit Barcodes oder QR-Codes ausgestattet. Ein Mitarbeiter scannt den Code auf einer Box mit einem Lesegerät bevor er Material entnimmt. Das Lesegerät übermittelt Daten an Montagesysteme oder Datenbanken, wodurch beispielsweise erkannt wird, ob es sich um den richtigen Behälter handelt.⁶⁸

⁶⁵ vgl. Pohl et al., 2013

⁶⁶ vgl. Bauernhansl, 2014, S. 60

⁶⁷ <http://www.denso-wave.com/qrcode/aboutqr-e.html>

⁶⁸ vgl. Bauernhansl, 2014, S. 463

RFID steht für „**R**adio **F**requency **I**dentification“ und ermöglicht eine kontaktlose Datenübertragung mittels elektromagnetischer Felder. RFID-Systeme bestehen aus einem Lesegerät und einem Transponder, wobei zwischen passiven und aktiven Transpondern unterschieden wird. Passive Transponder besitzen keine eigene Energieversorgung, sie werden über elektromagnetische Signale eines Lesegeräts versorgt. Aktive Transponder hingegen besitzen eine eigene Energiequelle, in vielen Fällen handelt es sich dabei um eine Batterie. Einer der größten Vertreter von Transpondern ist der 1-bit-Transponder, welcher nur zwei Zustände kennt: seine An- oder Abwesenheit im Ansprechbereich.⁶⁹ Im den folgenden Absätzen werden einige Einsatzbereiche derartiger RFID-Systeme vorgestellt.

Die RFID-Technologie wird unter anderem für Warensicherungen in Einkaufshäusern sowie in Bibliotheken eingesetzt. Das Prinzip basiert auf der Magnetisierung eines RFID-Metallstreifens, welcher dadurch in Sättigung gehalten wird und das magnetische Wechselfeld einer Sicherungsanlage nicht mehr stört, sie kann passiert werden ohne einen Alarm auszulösen. Bei Entmagnetisierung des Metallstreifens wird dieser Zustand rückgängig gemacht, wodurch das elektromagnetische Feld einer Sicherungsanlage gestört und ein Alarm ausgelöst wird.⁷⁰

Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Überprüfung einer Teileentnahme in der Montage anhand eines tragbaren Lesegeräts. Ein Montagemitarbeiter trägt einen Handschuh, auf welchem ein Lesegerät befestigt ist. Lagerfächer, beziehungsweise Kommissionierbehälter besitzen einen RFID-Transponder. Wird ein Teil aus einem Behälter entnommen, wird der entsprechende Transponder gelesen und identifiziert, dadurch kann Rückschluss auf das entnommene Teil gezogen werden.⁷¹

Montageanleitungen können bereitgestellt werden indem erste Komponenten, wie beispielsweise ein Gehäuseboden, identifiziert werden. Durch eine Kennung (RFID-Transponder) am Gehäuseboden kann auf die Produktkonfiguration geschlossen werden.⁷²

Im forstwirtschaftlichen Sektor werden RFID-Systeme eingesetzt, um Tiere zu kennzeichnen und später eindeutig identifizieren zu können.⁷³

2.2.6 Gyroskope und Beschleunigungssensoren

Im folgenden Abschnitt werden Gyroskope und Beschleunigungssensoren gemeinsam betrachtet. Eine Kombination beider Sensoren führt dazu, dass durch ein Gyroskop Drehung und Neigung und durch einen Beschleunigungssensor translatorische

⁶⁹ vgl. Finkenzeller, 2012, S. 32–41

⁷⁰ vgl. Finkenzeller, 2012, S. 39

⁷¹ vgl. Bauernhansl, 2014, S. 315

⁷² vgl. Hinrichsen, Riediger & Unrau, 2017

⁷³ vgl. Theis et al., 2010

Bewegung erkannt wird. Diese Daten führen zu einer grundlegenden inertialen Messeinheit.⁷⁴ Dies bedeutet, dass eine Position relativ zur ihrer vorherigen Position bestimmt werden kann.

Ein Gyroskop basiert auf dem Prinzip der Drehimpulserhaltung. Ein möglichst reibungsfreier, rotierender Kreisel behält seine Ausrichtung im Raum auch dann, wenn ein Käfig, in dem er sich befindet, geneigt wird. Dieses Phänomen wird genutzt, um Drehungen und Neigungen eines Objekts im Raum festzustellen.⁷⁵

Anwendungsbereiche finden Gyroskope in Ortungen im Inneren von Gebäuden. Durch Abschattungseffekte von Gebäudemauern ist es nicht möglich satellitengestützte Verfahren, wie beispielsweise GPS zu nutzen. Aufgrund verrauschter Daten sind Ortungen mit Beschleunigungssensoren und Gyroskopen verglichen zur Satellitenortung ungenau. Um diesem Problem entgegenzuwirken, können zusätzliche Kontextdaten wie Innenraumkarten miteinbezogen werden. Dadurch wird die Genauigkeit einer Ortung erhöht.⁷⁶

Gyroskope werden beispielsweise in Kompassen oder in der Automobilbranche in Navigationssystemen eingesetzt. Fällt die GPS-Ortung in Tunneln aus, kann mittels Beschleunigungssensoren und Gyroskopen die Position eines Autos trotzdem errechnet werden.

Nachteil dieser Ortungsverfahren ist, dass errechnete Positionen nur relativ zu vorigen Positionen bestimmt werden können. Dies kann zu aufsummierten Fehlern führen, welche im Zuge einer Verwendungszeit ohne Neukalibrierung immer größer werden. Ein weiteres Problem ist das Fehlen eines absoluten Koordinatensystems im Raum. Somit kann beispielsweise ein Schütteneingriff, welcher örtlich festgelegt ist, nur schwer erkannt werden.

2.2.7 Pneumatische Sensoren

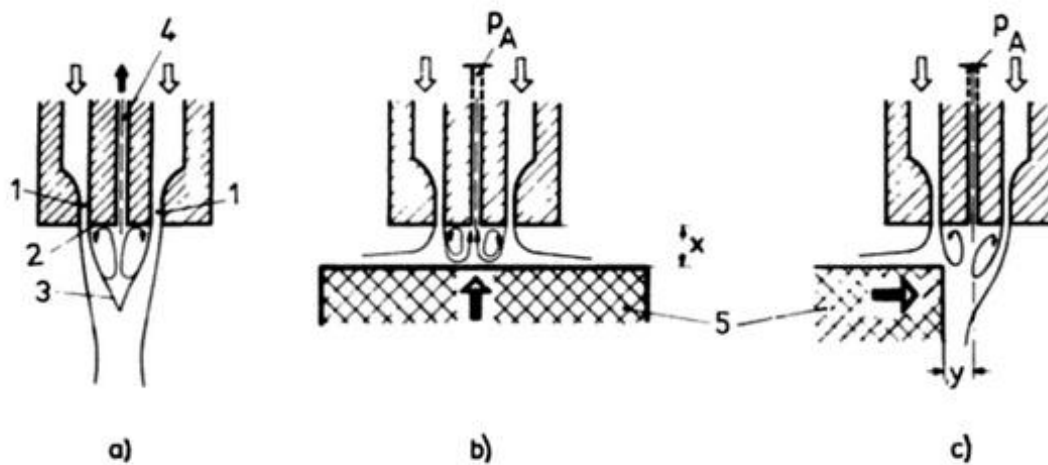
Das Prinzip dieser Sensoren besteht darin, einen Fluidfreistrahler zu erzeugen, welcher durch Unterbrechung oder Ablenkung einen Fluidrückstau erzeugt. Der Staudruck kann gemessen werden, um eine Aussage über die Anwesenheit eines Objekts zu geben. In Abbildung 11 ist ein Aufbau eines pneumatischen Sensors ersichtlich und drei verschiedene Zustände abgebildet. Unter dem Punkt (a) ist ein pneumatischer Sensor ohne Objekt dargestellt, dadurch wird der Fluidstrahl nicht abgelenkt und am Ausgangskanal ist nur ein geringer Druck zu messen. Bei Punkt (b) wird ein Objekt axial an den Sensor angenähert. Der Rückstau des Gases führt dazu, dass sich der Druck am Ausgangskanal erhöht. Bei Punkt (c) wird das Objekt lateral an den Sensor

⁷⁴ vgl. Graichen, Weichold & Bilda, 2017

⁷⁵ vgl. Odendahl, Finn & Wenger, 2009, S. 178

⁷⁶ vgl. Graichen, Weichold & Bilda, 2017, S. 2

herangeführt, wodurch ebenfalls der Staudruck erhöht wird. Je nach gemessenen Rückstaudruck, kann Aufschluss über den Abstand des Objektes zum Sensor gegeben werden.⁷⁷



- | | |
|--|---------------------|
| a) Ohne Objekt | 1 Ringdüse |
| b) Axiale Objektbewegung | 2 Sensorstirnfläche |
| c) Laterale Objektbewegung | 3 Strahlinnenrand |
| | 4 Ausgangskanal |
| | 5 Objekt |
| x Abstand (axiale Objektbewegung) | |
| y Entfernung (laterale Objektbewegung) | |

Abbildung 11: Funktionsweise eines pneumatischen Rückstausensors anhand dreier Zustände (a,b,c)⁷⁸

Die Vorteile pneumatischer Sensoren sind eine kontaktlose Arbeitsweise, eine hohe Zuverlässigkeit und dadurch ein großes Einsatzgebiet bei Fließbandkontrollen. Neben den Vorteilen gibt es jedoch auch einige erhebliche Nachteile. Sensor und Auswertungs-elektronik benötigen neben einer elektrischen Energieversorgung auch eine Druckluftzeugung. Druckluftleitungen sind meist unflexibel und im Raum fest definiert und können somit nur schwer in einem flexiblen Arbeitsbereich integriert werden. Abhilfe würden Druckluftflaschen schaffen, allerdings haben diese den Nachteil, dass sie regelmäßig getauscht werden müssen, wodurch wiederum der Arbeitsfluss beeinträchtigt wird. Weiters wird die Kraft eines pneumatischen Sensors auf ein zu messendes Objekt übertragen. Durch den Fluidfreistrahle wird ein Impuls erzeugt, welcher dazu führt, dass empfindliche Materialien, wie beispielsweise

⁷⁷ vgl. Eißler, 1996, S. 16

⁷⁸ Eißler, 1996, S. 17

feinkörnige Güter, druckempfindliche Platinen oder auch Flüssigkeiten nicht ordentlich abgetastet werden können.⁷⁹

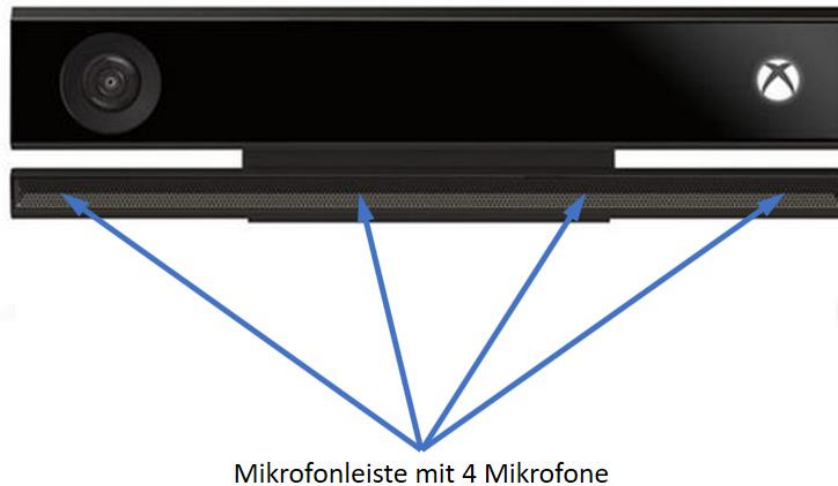
2.3 Sensorsysteme

Verschiedene Hersteller aus dem Produktionsbereich, als auch aus der Spieleindustrie haben es sich zur Aufgabe gemacht, Sensorsysteme zu entwickeln. Sie zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass eine, meist mitgelieferte, Software zusätzliche Informationen generiert, welche erst durch Kombination einzelner Sensoren und einer Analyse deren Daten ermöglicht wird. Ähnlich wie das menschliche Gehirn werden hier Daten vernetzt, um zusätzliche Aussagen treffen zu können. In den folgenden Abschnitten werden das Kinect V2 Sensorsystem, Sarissa, Xsens, Orbec Persee, Stereolabs ZED, VicoVR und die Bildverarbeitungssoftware Openpose vorgestellt. Diese Systeme sind darauf ausgelegt in einer dreidimensionalen Umgebung Menschen, Gesten oder Umgebungen zu erkennen. Der Unterschied zu Sensoren aus Abschnitt 2.2 besteht darin, dass gewonnene Informationen nicht binäre Antworten sind oder aus einer schwankenden Ausgangsspannung bestehen, sondern komplexe Datenanalysen durchgeführt, Ergebnisse interpretiert und für den Benutzer aufbereitet werden.

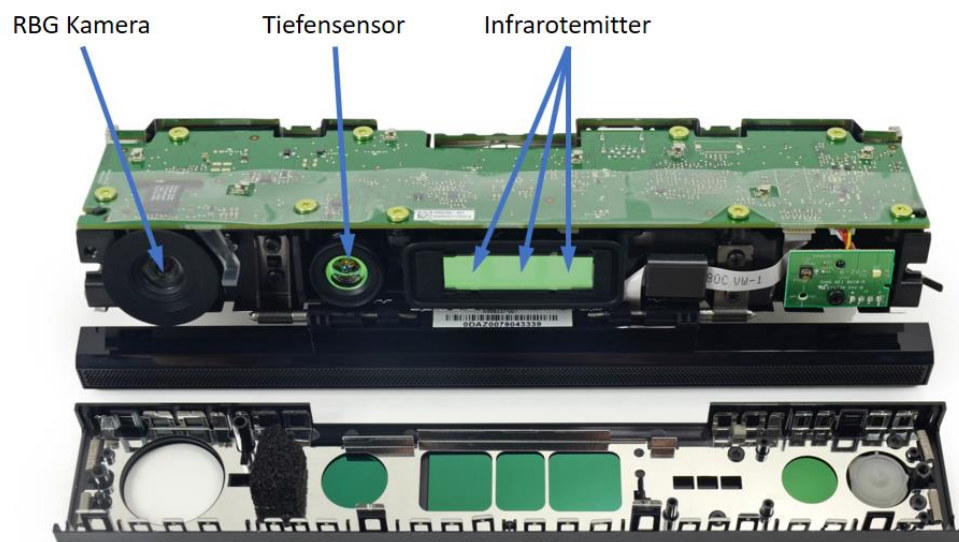
2.3.1 Kinect V2

Die Kinect-Sensorleiste wurde ursprünglich für die Spielekonsole Xbox 360 von Microsoft entwickelt. In Abbildung 12 ist eine aktuelle Version der Sensorleiste abgebildet. Sie wurde im November 2013 auf den Markt gebracht und ist der Nachfolger der Kinect V1. Produktion und Verkauf der Kinect wurden 2017 eingestellt, wobei ein Software Development Kit (SDK) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurde. Dadurch wird jedem Hobbyprogrammierer die Möglichkeit gegeben, die Kinect für seine Zwecke umzuprogrammieren, Applikationen zu entwickeln und diese wiederum selbst zu veröffentlichen. Obwohl der Preis einer Sensorleiste für die Spieleindustrie sehr hoch war und dadurch nur einen minimalen wirtschaftlichen Erfolg brachte, ist er nun auch in anderen Sektoren einsetzbar und bietet eine günstige Alternative zu anderen, teuren industriellen Lösungen.

⁷⁹ vgl. Eißler, 1996, S. 17



Mikrofonleiste mit 4 Mikrofone

Abbildung 12: Kinect V2⁸⁰Abbildung 13: Kinect V2 ohne Gehäuse⁸¹

Der Sensor selbst wurde in zwei verschiedenen Varianten produziert. Zunächst war der „Kinect for Xbox One“-Sensor erhältlich und in späterer Folge der „Kinect for Windows v2“-Sensor, für den Gebrauch am PC. Die Produktionen wurden eingestellt, mit Hilfe eines Adapters kann jedoch auch der „Kinect for Xbox One“-Sensor am PC unter Windows genutzt werden. Der Sensor, unabhängig der Version, wird über einen USB 3.0 Anschluss mit dem PC verbunden und kann mit einem Software Development Kitt (SDK) v2 unter Windows verwendet werden.

⁸⁰ vgl.: https://de.ifixit.com/Device/Xbox_One_Kinect

⁸¹ vgl.: https://de.ifixit.com/Device/Xbox_One_Kinect

Der Preis beträgt ca. 100 Euro für den Adapter⁸² und weitere 100 Euro für einen Kinect für Xbox One-Sensor.

Der Einsatz eines Kinect-Sensors eignet sich für eine Distanz zwischen 0,5 und 8 m.

Folgende Daten können aus dem Kinect Sensor gewonnen werden:⁸³



Abbildung 14: Daten aus dem Kinect Sensor

Die Bilder in Abbildung 14 zeigen ein und dieselbe Szene: zwei Personen befinden sich in verschiedenen Haltungen in einem Raum, eine hält einen Hund im Arm, die andere winkt.

Die drei Bilder in der oberen Hälfte zeigen lediglich die aufgenommenen Daten der einzelnen Sensoren, die unteren Bilder generieren Darstellungen aus den Daten mehrerer Sensoren.

Das Farbbild unter der Beschriftung „Color“ in Abbildung 14 besitzt eine 1920x1080 Pixel Auflösung und wurde mit einer HD Farbkamera aufgenommen. Sie besitzt eine Bildfrequenz von 30 Bildern pro Sekunde (BpS).

Das Infrarotbild unter der Beschriftung „Infrared“ wird aus den drei Infrarotsensoren gewonnen. Auf das Funktionsprinzip eines Infrarotsensors wurde bereits im Abschnitt

⁸² <https://de.aliexpress.com>

⁸³ <https://www.youtube.com/watch?v=GPjS0SBtHwY>

2.2.1 eingegangen. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es relativ unempfindlich auf Lichteinstrahlung aus der Umgebung reagiert.

Der Tiefensensor ordnet allen Punkten x , y und z Koordinaten zu, wodurch ein Tiefenbild generiert wird (Abbildung 14, unter der Beschriftung „Depth“). Das Funktionsprinzip besteht darin, die Zeit zu messen, welche benötigt wird, um den Weg bis zu einem ersten Hindernis zurückzulegen (ToF). Anhand dieser Daten wird jedem ausgegebenen Bildpunkt ein bestimmter Grauwert zugewiesen.

Einer der Vorteile der Kinect liegt in ihrer Software. Sie ermöglicht es nicht nur, Informationen und Daten einzelner Sensoren zu visualisieren, sondern mittels Algorithmen zusätzliche Annahmen zu treffen, die über Daten der einzelnen Sensoren hinausgehen. Im folgenden Abschnitt werden einige dieser Datenbearbeitungen vorgestellt.

In Abbildung 14 sind unter der Beschriftung „BodyIndex“ die Silhouetten zweier Personen abgebildet. Die Kinect kann somit, durch Kombination und Auswertung verschiedener Sensoren Personen von der Umgebung unterscheiden, wobei eine Zuordnung des Tisches zur rosafarbenen Person eine Fehlinterpretation der Software ist. Anhand dieses Fehlers lässt sich erkennen, dass komplexe Analysen und Interpretationen derartiger Daten auch Fehlerpotential aufweisen.

Bei dem Bild zur Rechten betitelt mit „Body“ handelt es sich um eine Darstellung der Personen mit Gelenkpunkten, in der Literatur auch „joints“ genannt und deren Verbindungslinien. Letztere werden in unterschiedlichen Dicken dargestellt, um einen Grad für die Zuverlässigkeit zu geben. Sind zum Beispiel Beine einer Person von einem Objekt verdeckt, liefert die Software trotzdem Daten der vermuteten Position, allerdings mit dünneren Verbindungslinien, um darauf hinzuweisen, dass diese Daten aufgrund von mathematischen Interpolationen sowie Referenzwerten erzeugt wurden. Eine sorgfältige Prüfung der Daten kann erforderlich sein. Mit Hilfe der Sensoren und der Software in der Kinect ist es möglich Bewegungen von Personen zu erkennen, ohne zusätzliche technische Vorrichtungen an den Personen anzubringen. Es müssen weder Sender noch Farbpunkte an den Gelenken angebracht werden, um ein menschliches „Skelett“ abzubilden.

Jede Person besteht aus 25 Punkten, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Hände gelegt wurde. Beide Hände werden mit jeweils vier Punkten dargestellt, Daumen und Handspitze bilden die zwei Extremitäten. Um diese vier Punkte ist ein runder Bereich eingezeichnet, welcher vier verschiedene Farben annehmen kann. Jede Farbe steht für unterschiedliche Positionen der Hände. Die Farbe Grün wird einer offenen Hand zugeordnet, Rot bedeutet die Hand ist geschlossen, beziehungsweise umgreift einen Gegenstand und wenn zwei Finger in die Höhe gestreckt werden, wird der Kreis blau. Für alle anderen Zustände bleibt der Kreis grau. Die Kinect V2 kann bis zu sechs

Personen erkennen und ihnen Skelette zuordnen. Eine weitere Darstellung ermöglicht, dass neben Bewegungen der Extremitäten auch Rotationen einzelner Verbindungen dargestellt werden können. Hierfür werden die Verbindungslinien als Blöcke dargestellt. Diese Funktion spielt eine wichtige Rolle im Bereich der Spieleentwicklung, um animierten Figuren menschlich wirkende Bewegungen zu verleihen.

Der Kinectsensor besitzt zusätzlich ein Vier-Elemente-Mikrofon. Dabei handelt es sich um vier Mikrophone, welche horizontal nebeneinander angeordnet sind (siehe Abbildung 12). Die Anzahl und Anordnung sind erforderlich, um zusätzlich zur Spracherkennung und Sprachsteuerung die Position einer sprechenden Person zu ermitteln. Neben der Aufnahme der Audiodaten werden die Mikrophone daher auch zur Personenortung verwendet. Da die Audiodaten in diesem Fall nicht grafisch dargestellt werden können, wurden sie vollständigshalber in der Übersicht in Abbildung 14 erwähnt.

Die Einsatzgebiete des Kinect-Sensorsystems außerhalb der Spieleindustrie sind sehr zahlreich und vielseitig. In medizinischen Bereichen, wie der Rehabilitationstechnik wird der 3D Sensor der Kinect getestet, um das Verhalten von Patienten zu erkennen.⁸⁴ Ein weiteres aktuelles Thema in der Industrie 4.0 ist eine Sprach- und Gestensteuerung von Roboterarmen mit der Kinect V2. Sie findet auch in diesem Bereich ihren Einsatz. So wurde nachgewiesen, dass sie als Kommunikationsgerät für eine Interaktion mit einem Roboterarm geeignet ist.⁸⁵

Die Kinect besitzt ebenfalls ein Einsatzgebiet in der Montage. Im folgenden Abschnitt wird ein Versuchsaufbau zur Erkennung von Schütteneingriffen beschrieben. Hierfür wird der Tiefensensor der Kinect 1,4 m über der Arbeitsfläche montiert (siehe Abbildung 15).⁸⁶

⁸⁴ vgl. Pöhlmann et al., 2016

⁸⁵ vgl. Kleborn, S. 54

⁸⁶ vgl. Funk, Mayer & Schmidt, 2015

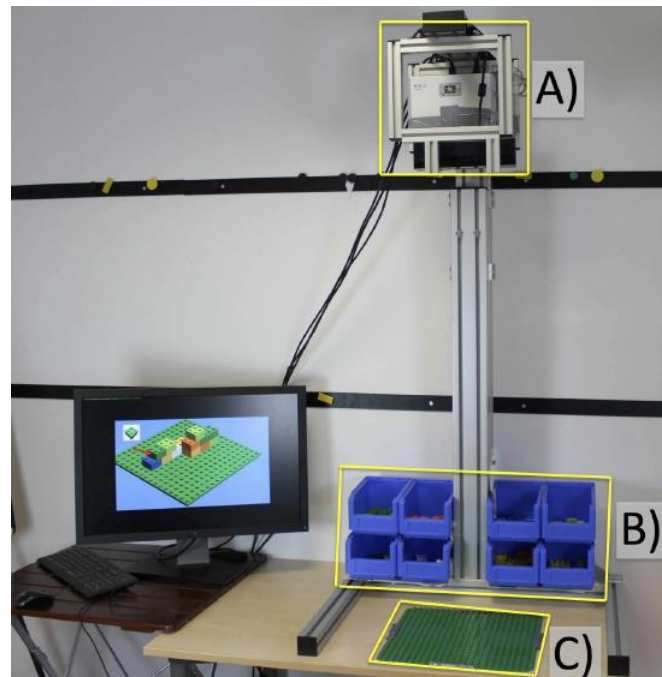


Abbildung 15: Versuchsaufbau mit einer Kinect V2⁸⁷

Hinter einer Arbeitsfläche (C) befinden sich mehrere Behälter (B) mit unterschiedlichen Teilen. Der Tiefensensor der Kinect (A) erkennt einerseits aus welchem Behälter ein Arbeiter ein Teil entnimmt (Abbildung 16), andererseits an welchen Ort das Teil im Arbeitsbereich positioniert wurde.

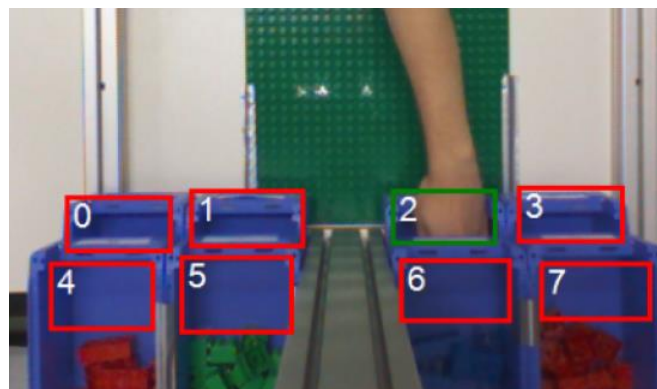


Abbildung 16: Schütteneingriff aufgenommen mit einer Kinect V2⁸⁸

Mit Hilfe eines Abgleichs hinterlegter und gemessener Daten, kann Rückschluss auf eine korrekte Montage gezogen werden.

Anschließend werden Vor- und Nachteile der Kinect im Hinblick auf eine Verwendung für Montagefortschrittserkennung, angeführt.

⁸⁷ Funk, Mayer & Schmidt, 2015, S. 3

⁸⁸ Funk, Mayer & Schmidt, 2015, S. 3

Vorteile:

- Die Kombination aus vier verschiedenen Sensorarten ermöglicht eine Ermittlung komplexer Informationen.
- Gesichts- und Spracherkennung sind in dem System integriert.
- Das System bietet eine großflächige, räumliche Abdeckung eines Arbeitsbereichs.
- Es besteht die Möglichkeit Rohdaten der Sensoren auszulesen, aber auch die Software umzuprogrammieren, um individuelle Informationen zu gewinnen.
- Das Sensorsystem ist mit 200 Euro vergleichbar kostengünstig in der Anschaffung.
- Durch die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und die Möglichkeit individuelle Adaptierungen an der Software vorzunehmen, ist eine große Onlinecommunity entstanden, welche angepasste Programmierungen der Öffentlichkeit zur Verfügung stellt.

Nachteile:

- Das System ist darauf ausgelegt grobmotorische Bewegungen zu erkennen und besitzt keinen Referenzpunkt im Raum. Dieser Umstand bedeutet auch, dass Koordinaten einzelner Gelenkspunkte im Raum nicht ermittelt werden können, da kein räumlich fixiertes Koordinatensystem vorhanden ist.
- Für den Einsatz einer Kinect in der Fehlererkennung bei Montagetätigkeiten gibt es derzeit keine entsprechende Verarbeitungssoftware. Die Programmierung einer solchen ist sehr aufwendig und benötigt Erfahrung in diesem Bereich.
- Ein Hauptproblem ist, dass die Kinect V2 nicht mehr produziert wird. Durch den Auflauf der Produktion wird nicht weiter an dem System gearbeitet und daher auch nichts verbessert. Beim Kauf eines Geräts gibt es außerdem weder eine Herstellergarantie noch einen Hardware Support.
- Die Kinect V2 benötigt einen Computer zur Datenverarbeitung, was dazu führt, dass die Kosten einer Implementierung in ein Montagesystem zusätzlich erhöht werden.
- Für eine großflächige Arbeitsplatzabdeckung müssen mehrere Kinect-Systeme eingebaut werden, da ein Sensor die Bewegung einer Person nur von vorne erkennt.

- Die Kinect V2 Software funktioniert ausschließlich auf PCs mit einem Windows Betriebssystem.

2.3.2 Sarissa

Sarissa GmbH⁸⁹ ist ein deutsches Unternehmen, welches Sensor- und Softwaresysteme entwickelt. Ein Hauptziel des Unternehmens ist die Entwicklung von Qualitätssicherungssystemen für eine Null-Fehler Produktion. Das Sarissa Assistenzsystem besteht aus drei Elementen: dem Local Positioning System kurz LPS, dem „QualityAssist“ und der „PositionBox“.

Mit Hilfe des LPS können Schrauber, Werkzeugträger, sowie Handgelenke von Montagemitarbeitern millimetergenau geortet und identifiziert werden. Ein Transmitter als Handgelenkssensor, wie in Abbildung 17 dargestellt, wird an verschiedenen Positionen angebracht und sendet Ultraschallsignale in eine Arbeitsumgebung. Anschließend berechnet eine Empfängereinheit (siehe Abbildung 18), mit drei in einem Dreieck angeordneten Empfängern, die Zeiten bis das Signal ankommt, wodurch eine exakte Position der einzelnen Sender bestimmt werden kann. Die Sender sind je nach Anwendungsgebiet unterschiedlich aufgebaut. Es gibt Handgelenkssender, Handschuhe und Werkzeugsender, wobei jeder einzelne Vorteile für seinen bestimmten Anwendungsfall besitzt.



Abbildung 17: Sarissa Handgelenkssensor⁹⁰



Abbildung 18: Sarissa Empfängereinheit⁹¹

⁸⁹ vgl.: <https://www.sarissa.de/>

⁹⁰ <https://www.sarissa.de/>

⁹¹ <https://www.sarissa.de/>

Ein Handgelenkssensor wird mit einem elastischen Band am Handgelenk fixiert. Eine Ortung der Hand ermöglicht zum Beispiel Schütteneingriffe zu erkennen und somit auf eine Teileentnahme zu schließen. Ein Werkzeugsender wird starr mit einem Werkzeug verbunden und hat drei Sendequellen, sodass nicht nur die Werkzeugposition, sondern auch die Lage im Raum bestimmt werden kann. Bei Schrauben kann die Spitze genau ermittelt werden und dadurch auf die Position einer montierten Schraube geschlossen werden. Der Handschuh ist eine Weiterführung des Werkzeugsenders. Er besitzt einen Sender am Handrücken und zwei weitere Sender an Daumen und Zeigefinger. Dadurch können nicht nur Bewegungen der Hand, sondern auch Greifbewegungen, sowie Rotationen erkannt werden. In einem Demonstrationsvideo auf der Firmenhomepage⁹² wird gezeigt, wie mit Hilfe eines derartigen Handschuhs ein Roboterarm gesteuert wird. Es können Objekte mit unterschiedlichen Größen und Gewichten alleine durch Nachbildung einer Handbewegung bewegt werden.

Beim „QualityAssist“ handelt es sich um eine Softwarelösung zur Verarbeitung der Raumkoordinaten. Das User-Interface bietet die Möglichkeit Arbeitsanweisungen wie beispielsweise Montageanleitungen bereitzustellen, sowie dem Werker Rückmeldung über Positionen zu geben.

Die „PositionBox“ ist für die Datenübermittlung über eine Ethernet-Verbindung an den PC zuständig. Somit bildet sie eine Schnittstelle zu anderen Geräten, während der „QualityAssist“ eine Schnittstelle zum Menschen darstellt.

Anwendung findet das Sarissa-System unter anderem im Montagebereich (siehe Abbildung 19), sodass beispielsweise mehrere Werkzeuge und Sensoren exakt geortet werden können.

⁹² <https://www.sarissa.de/>

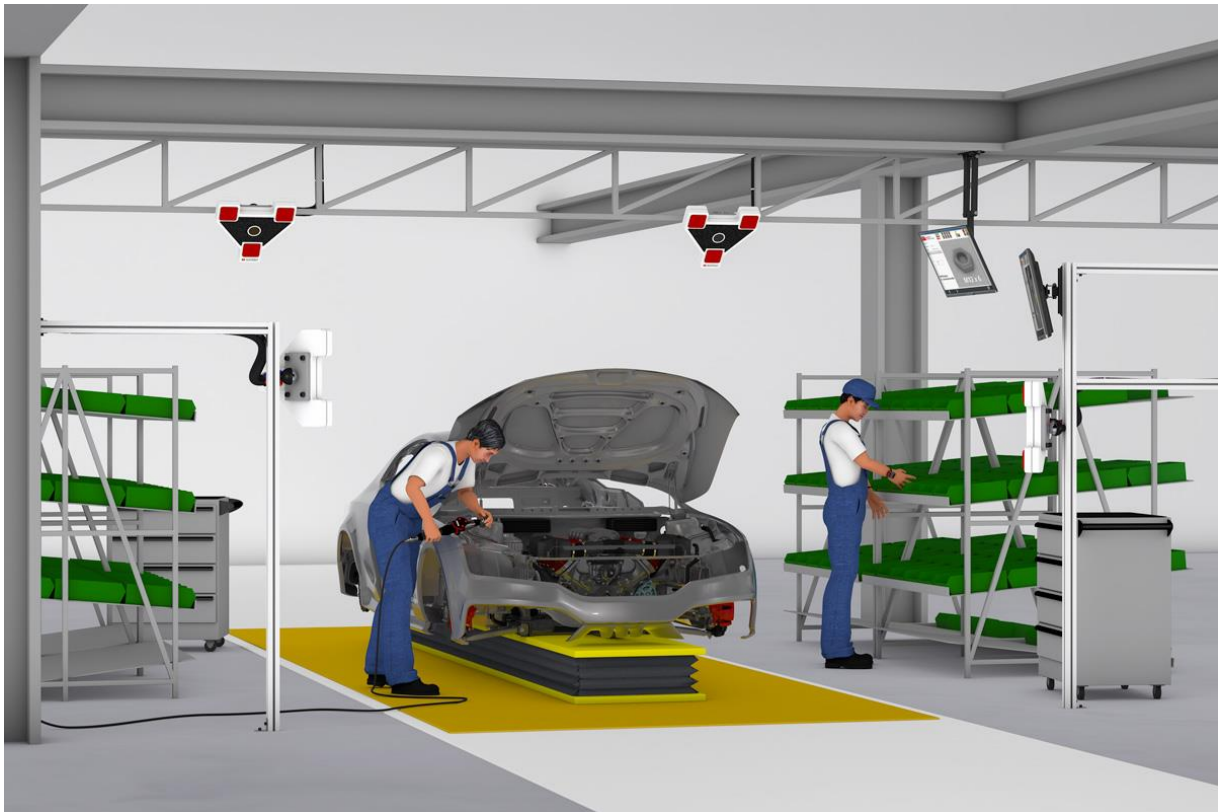


Abbildung 19: Beispiel einer Umsetzung des Sarissa-Systems⁹³

Vorteile:

- Das System eignet sich für eine genaue Ortung einzelner Punkte.
- Ein gleichzeitiger Einsatz mehrerer Sensoren ist möglich.
- Die Frequenzen im Ultraschallbereich sind vergleichsweise unempfindlich auf Störeinflüsse aus der Montageumgebung.
- Es sind viele Anwendungsbereiche in der Montagefortschrittserkennung möglich, wie zum Beispiel Erkennen eines Schütteneingriffs, oder die Positionsüberprüfung von Werkzeugen.
- Stromversorgung und Datenübertragung finden über Ethernet statt.
- Eine genaue Ortung ist auch bei großen Distanzen zwischen Sender- und Empfängereinheit möglich.
- Das System ist beliebig mit zusätzlichen Sensoren erweiterbar.

⁹³ <https://www.sarissa.de/applikationen/>

- Schnittstellen für einzelne Werkzeugsensoren, wie beispielsweise ein Drehmomentsensor für einen Schrauber, sind bereits vorhanden.
- Ein Einsatz ist, bei Verwendung mehrerer Empfängereinheiten, bis 83 m möglich.

Nachteile:

- Die Sender sind direkt an der Person angebracht, wodurch diese mehr oder weniger in den Arbeitsschritten beeinträchtigt ist.
- Zu Beginn einer Montagetätigkeit ist eine Vorbereitungszeit nötig, da zunächst die Sender an der Person angebracht werden müssen.

2.3.3 Xsens

Xsens Technologies B.V. ist ein niederländisches Unternehmen, welches sich auf 3D-Bewegungsverfolgung spezialisiert hat⁹⁴. Das Unternehmen entwickelt Systeme für den Spiele- und Filmsektor, 3D-Animationen, Sportanalysen, für Virtual Reality (VR) Trainings, Simulationen und den Rehabilitationssektor. Mit diversen, kompatiblen Zusatzprogrammen können grafisch gestaltete Figuren mit menschlichen Bewegungen in Echtzeit ausgestattet werden.

In den folgenden Absätzen wurden sämtliche Informationen dem Benutzerhandbuch des Xsens MVN⁹⁵ entnommen. Zwei Xsens Produkte sind auf Erkennen und Aufnehmen von menschlichen Bewegungen spezialisiert. Zum einen handelt es sich um das MVN Link System, zum anderen um das MVN Awinda System. Beim MVN Link System werden Sensoren mittels Kabeln an einem sogenannten Body Pack und dies wiederum an eine Batterie angeschlossen. Das zweite System, MVN Awinda, besitzt dieselben Sensoren, in Abbildung 20 ersichtlich, allerdings mit einer integrierten Batterie. Es wird allgemein keine Verkabelung benötigt, da auch die Datenübertragung mittels einer kabellosen Verbindung stattfindet. Bei diesen Sensorsystemen handelt es sich um eine Kombination verschiedener Sensoren, darunter lineare 3D-Beschleunigungsmesser, Sensoren, welche auf dem Gyroskop Prinzip basieren, Magnetometer und einem Barometer zur Messung des atmosphärischen Drucks. In Kombination ermöglichen die Sensoren eine Erfassung von Bewegungen.

⁹⁴ vgl.: <https://www.xsens.com/>

⁹⁵ vgl. Xsens Technologies, 2016



Abbildung 20: Xsens Bewegungssensor⁹⁶

Abhängig davon welches der beiden Systeme gewählt wird, stellt der Hersteller einen Ganzkörperanzug oder Bänder zur Verfügung, um die einzelnen Sensoren am Körper anzubringen. Mit Sensoren ausgestattete Kleidung, wie Kopfbänder, Handschuhe und Sohlen, ist außerdem in beiden Systemen inkludiert. Insgesamt sind bei beiden Systemen 17 Sensoren vorgesehen.

Die Sensoren des MVN Link Systems senden ihre Daten über eine Kabelverbindung an das Body Pack. Dieses leitet Daten über eine Wireless Verbindung an den Access Point weiter, welcher wiederum mit einem PC verbunden ist. Die zweite Möglichkeit der Datenübertragung ist mit einem Ethernet-Kabel. Die Akkulaufzeit der Batterie, welche an das Body Pack angeschlossen wird beträgt 10 Stunden, wenn eine Wireless-Übertragung gewählt wird. Die Ladezeit, bis die Batterie vollständig aufgeladen ist, beträgt drei Stunden.

Zur Energieversorgung der Sensoren des MVN Awinda Systems werden LiPo Batterie mit einer Arbeitszeit von 6 Stunden und einer Stand-by Zeit von 90 Stunden eingesetzt. Die Reichweite der Sensordatenübertragung beträgt 20 m in einer Halle und 50 m im Freiraum.

Ähnlich den bereits beschriebenen Systemen, stellt auch hier der Hersteller eine Software zur Verfügung. Sie funktioniert unter Windows 7 und Windows 10, Daten der einzelnen Sensoren werden auf einem benutzerfreundlichen Interface wiedergegeben. Einerseits können Rohdaten, wie Beschleunigungen oder Positionen im Raum ausgelesen werden, andererseits kann ein kompletter Körper mit seinen Bewegungen in Echtzeit abgebildet werden.

Einsatz findet das Xsens-System in der Filmindustrie, wie beispielsweise in „Marvel's Guardian of the Galaxy“ und in „Ted 2“.⁹⁷ Hier wurden Bewegungen von digitalen Charakteren mit Hilfe von menschlichen Bewegungen erzeugt.

⁹⁶ Xsens Technologies, 2016, S. 15

⁹⁷ <https://www.xsens.com/customer-cases/>

Weitere Einsatzgebiete sind Analysen von Bewegungen im Sportbereich. Im Skispringen, Rudern und im Wrestling wird das Sensorsystem eingesetzt, um Extrembelastungen zu identifizieren oder Bewegungen zu perfektionieren.

Auch in industriellen Fertigungsbereichen und der Montage findet das System einen Einsatz. So wurde in Kooperation mit RIF, dem deutschen Institut für Forschung und Transfer, das Xsens-System verwendet, um manuelle Arbeitsschritte zu analysieren (siehe Abbildung 21), sowie eine Mensch-Maschinen-Interaktion mittels Gestensteuerung zu erzielen.



Abbildung 21: Xsens in der Montage⁹⁸

Vorteile:

- Das System wird bereits in Bereichen, wie der Arbeitsplatzgestaltung und der Ergonomie eingesetzt.
- Es ermöglicht auch in geschlossenen Räumen eine sehr präzise Ortung, da keine Abschirmungseffekte von Gebäudewänden Einfluss auf die Ortung nehmen.

⁹⁸ RIF Institut für Forschung und Transfer

Nachteile:

- Die Sender sind direkt an der Person angebracht, wodurch diese mehr oder weniger in ihren Arbeitsschritten beeinträchtigt ist.
- Zu Beginn der Arbeitstätigkeit ist eine Vorbereitungszeit nötig, da die Person zuerst die Sensoren anbringen und verschiedene Positionen einnehmen muss, damit sich die Sensoren kalibrieren können.
- Die Positionserkennung errechnet die aktuelle Position aus der vorherigen. Es wird kein absolutes Koordinatensystem verwendet, wodurch Positionsdaten der einzelnen Sensoren nicht raumbezogen sind.
- Der Preis eines Sensors beläuft sich auf 800-1400 Euro je nach Ausführung.⁹⁹ Das gesamte System kostet ca. 10.000 Euro und ist daher vergleichsweise teuer.

2.3.4 Orbbec Persee und Orbbec Astra PRO

Orbbec ist ein internationales Unternehmen und wurde 2013 gegründet. Es entwickelt 3D-Kamerasysteme, unter den beiden bekanntesten befindet sich das Orbbec Persee- und das Orbbec Astra PRO-System. Beide besitzen dieselben Sensoren, allerdings hat die Orbbec Persee einen integrierten Computer und ist daher ohne zusätzliche Verkabelung an einem externen PC einsatzfähig. In der Abbildung 22 ist ein Orbbec Persee System mit eingebauten Sensoren dargestellt. Bei diesen handelt es sich um ein Mikrofon, einen Tiefensensor, einen Näherungssensor, eine RGB Kamera sowie einen Infrarotsensor. Der gesamte Orbbec-Persee-Sensor besitzt lediglich eine Abmessung von 172 x 63 x 56 mm (Breite x Höhe x Tiefe) und wiegt 0,8 kg. Der Tiefensensor besitzt einen Arbeitsbereich von bis zu 8 m Reichweite. Der Näherungssensor dient lediglich der Sicherheit, dass bei zu nahem Herantreten an den Sensor der Laserprojektor ausschaltet wird, um Schäden an Augen zu verhindern.¹⁰⁰

⁹⁹ <https://www.xsens.com/>

¹⁰⁰ <https://orbbec3d.com/>



Abbildung 22: Orbbec Persee¹⁰¹

Auch dieses Sensorsystem besitzt eine Personenerkennungssoftware ähnlich jener der Kinect. Anhand der Sensordaten wird ein Skelett der Person erstellt. Wie in Abbildung 23 ersichtlich werden dazu 19 relevante Punkte ermittelt.

¹⁰¹ <https://orbbec3d.com/product-persee/>

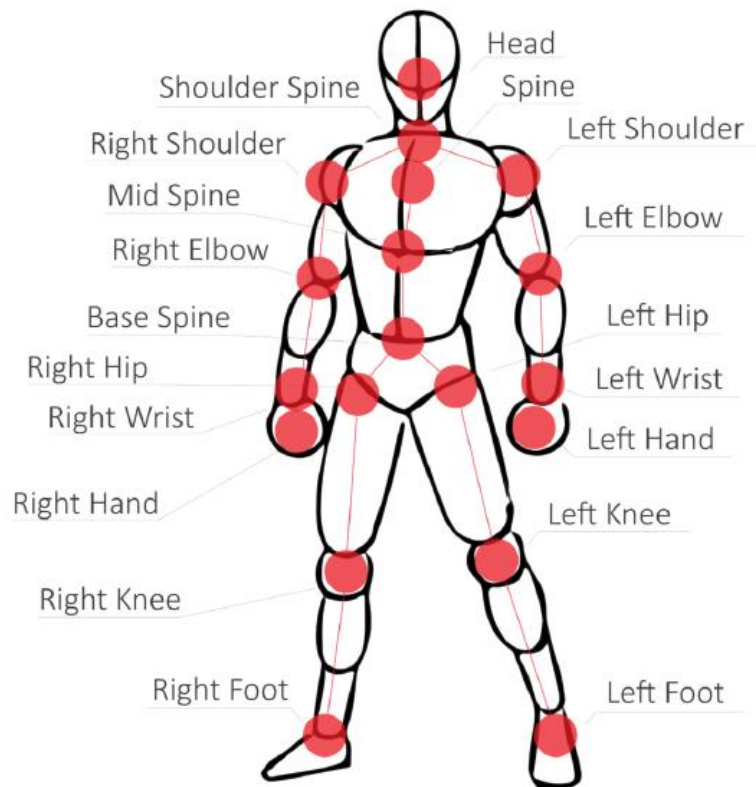


Abbildung 23: Personenerkennung der Orbbec¹⁰²

Um die Einsatzgebiete des Orbbec-Astra-System zu beschreiben kann die Arbeit von Karsten¹⁰³ herangezogen werden. Sie beschäftigt sich mit der Erkennung verschiedener Objekte mit Hilfe der Orbbec-Astra. Nimmt das Orbbec-Sensorsystem einen Arbeitsbereich aus einer Draufsicht auf, können Objekte mit einer Größe von ca. 4 cm Durchmesser erkannt werden. Ein limitierender Faktor ist, bedingt durch die Auflösung der eingebauten RGB Kamera und des Tiefensensors, die Größe der identifizierbaren Objekte. Des Weiteren ist es gelungen einen Roboterarm mit Hilfe von Daten des Orbbec-Sensorsystems derart zu programmieren, dass er Objekte erkennen, aufnehmen und in einen Behälter ablegen kann.

Vorteile:

- Das System bietet eine großflächige, räumliche Abdeckung eines Arbeitsbereichs.
- Es besteht die Möglichkeit Rohdaten einzelner Sensoren auszulesen, aber auch die Software umzuprogrammieren, um individuelle Informationen zu gewinnen.

¹⁰² <https://orbbec3d.com/product-persee/>

¹⁰³ vgl. Karsten, 2018, S. 41–42

- Das Sensorsystem ist mit 120 Euro vergleichbar kostengünstig in der Anschaffung.
- Das Orbbec-Persee-System ist ein eigenständiges Wireless-System und benötigt daher keine Computerverbindung.
- Abmessungen und Gewicht sind, mit 165 x 30 x 40 mm und 0,3 kg sehr klein, wodurch ein Einbau in engen Montagebereichen ermöglicht wird.
- Es werden keine zusätzliche Verkabelung zu einem PC benötigt, wodurch das System leicht in eine bestehende Arbeitsumgebung integriert werden kann.

Nachteile:

- Das System ist darauf ausgelegt grobmotorische Bewegungen zu erkennen und besitzt keine Referenzpunkte im Raum. Dieser Umstand bedeutet auch, dass Koordinaten einzelner Gelenkspunkte im Raum nicht ermittelt werden können, da kein räumlich fixiertes Koordinatensystem vorhanden ist.
- Für den Einsatz einer Orbbec in der Fehlererkennung bei Montagetätigkeiten gibt es derzeit keine entsprechende Verarbeitungssoftware für den Tiefensensor. Die Programmierung einer solchen ist sehr aufwendig und benötigt Erfahrung in diesem Bereich.
- Für eine großflächige Arbeitsplatzabdeckung müssen mehrere Orbbec-Systeme eingebaut werden, da ein Sensorsystem Bewegungen einer Person nur frontal erkennt.
- Mit nur einem Skelettpunkt pro Hand ist eine Maschinensteuerung per Handzeichen mit Hilfe der beigelegten Körpertrackingsoftware nicht möglich.

2.3.5 StereolabsZED



Abbildung 24: StereolabsZED

Bei dem StereolabsZED Sensorsystem (siehe Abbildung 24) handelt es sich um einen Tiefensensor, welcher auf dem Prinzip der Stereovision (siehe Abschnitt 2.2.2) basiert. Zwei RGB-Kameras sind in einem Abstand von 120 mm voneinander, horizontal angebracht. Bei 30 BpS beträgt die Auflösung beider Kameras 3840 x 1080 Pixel. Die

maximale Objektdistanz zum Sensor beträgt laut Hersteller 20 m.¹⁰⁴ Eine Darstellung der verarbeiteten Sensordaten ist in Abbildung 25 dargestellt. Weiters stellt der Hersteller ein ZED Software-Development-Kit zur Verfügung, um verschiedene bereits programmierte Anwendungen zu testen, beziehungsweise neue zu entwickeln. Bei diesem System sind Position und Bewegung des Sensors durch ein Ortungssystem bekannt. Aufgenommene Bilder werden mit Daten der Kameras verknüpft und somit können dreidimensionale Objekte kontinuierlich aus verschiedenen Positionen aufgenommen werden und ein Modell des Objekts wird virtuell erzeugt. Dieses Verfahren ist als 3D-Rekonstruktion bekannt und neben dem Generieren eines 3D-Bildes ein weiteres Einsatzgebiet der StereolabsZED.



Abbildung 25: Tiefensensordaten der StereolabsZED¹⁰⁵

Die aktuelle Arbeit „Depth cameras on UAVs: A first approach“¹⁰⁶ beschäftigt sich mit dem Thema der 3D-Rekonstruktion. Hier wird das oben beschriebene Sensorsystem an einer Drohne montiert und ein Pavillon aufgenommen, um anschließend ein dreidimensionales Modell dieses Pavillons zu erzeugen. Fazit der Arbeit war, dass sich das StereolabsZED Sensorsystem für Projekte mit geringer Auflösung als ausreichend erwiesen hat. Für Dokumentationen mit einer hohen Präzisionsanforderung, wie beispielsweise einer Aufnahme kulturellen Erbes, ist es nicht geeignet.

¹⁰⁴ <https://www.stereolabs.com/zed/>

¹⁰⁵ <https://www.stereolabs.com/zed/>

¹⁰⁶ vgl. Deris et al., 2017

Vorteile:

- Das System bietet eine großflächige, räumliche Abdeckung eines Arbeitsbereichs.
- Es besteht die Möglichkeit Rohdaten der Sensoren auszulesen, aber auch die Software umzuprogrammieren, um individuelle Informationen zu gewinnen.

Nachteile:

- Das Sensorsystem ist mit 386 Euro vergleichbar teuer in der Anschaffung.
- Für den Einsatz einer StereolabsZED in der Fehlererkennung bei Montagetätigkeiten gibt es derzeit keine entsprechende Verarbeitungssoftware für den Tiefensensor. Die Programmierung einer solchen ist sehr aufwendig und benötigt Erfahrung in diesem Bereich.
- Das System besitzt weder eine Personenerkennung noch ein virtuelles Skelett wie die Kinect V2 oder die Orbbec Persee.
- Die Tiefendetails sind sehr grob und eignen sich nur begrenzt für Kleinteilidentifikationen.

2.3.6 VicoVR

Das VicoVR-Sensorsystem (siehe Abbildung 26) besteht aus einem Tiefensensor und einer RGB Kamera. Die Kombination dieser beiden Sensoren und einer mitgelieferten Software führen zu einem weiteren Bodytrackingsystem. Es wurde vor allem für die Spieleindustrie entwickelt und überträgt alle Daten via Bluetooth. Der Tiefensensor hat eine Reichweite von 5 m und eine Auflösung von 680 x 480 Pixel bei 30 BpS. Diese Werte sind im Vergleich zu den bereits vorgestellten Systemen, Orbbec und Kinect schlechter. Dieser Umstand kommt daher, dass der Sensor lediglich für die Positionserfassung des Menschen gedacht ist, um ihn in einer virtuellen Welt abzubilden. Hierfür sind keine genauen Details nötig, sondern eine schnelle Datenübertragung mit einer minimalen Verzögerung. Über Bluetooth werden die Daten an eine VR-Brille übertragen und der Benutzer findet sich selbst in einer virtuellen Welt wieder.



Abbildung 26: VicoVR-Sensorsystem¹⁰⁷

Auch nach längeren Recherchen konnten keine veröffentlichten, wissenschaftlichen Arbeiten über dieses Sensorsystem gefunden werden. Auch das Funktionsprinzip des Tiefensensors ist nicht ersichtlich. Lediglich das SDK im Bereich des Bodytracking soll große Ähnlichkeit mit dem der Orbbec haben.¹⁰⁸

Positiv hervorzuheben ist, dass bereits auf der Homepage¹⁰⁹ Programmierführungen und Beispiele angegeben sind.

Vorteile:

- Das System bietet eine großflächige, räumliche Abdeckung des Arbeitsbereichs.
- Es besteht die Möglichkeit Rohdaten der Sensoren auszulesen, aber auch die Software umzuprogrammieren, um individuelle Informationen zu gewinnen.
- Das VicoVR-System ist ein eigenständiges Wireless-System und benötigt daher keine Computerverbindung. Die Daten werden mit Bluetooth übertragen und können auf jedem Smartphone abgespielt werden.
- Es werden keine zusätzliche Verkabelung zu einem PC benötigt, wodurch das System leicht in eine bestehende Arbeitsumgebung integrierbar ist.

Nachteile:

- Das Sensorsystem ist mit 447 Euro vergleichbar teuer in der Anschaffung.
- Das System ist darauf ausgelegt grobmotorische Bewegungen zu erkennen und besitzt keinen Referenzpunkt im Raum. Dieser Umstand bedeutet auch, dass

¹⁰⁷ <https://vicovr.com/>

¹⁰⁸ <https://skarredghost.com/2017/05/12/orbbec-now-offers-skeletal-tracking-markerless-full-body-vr-coming/>

¹⁰⁹ <https://vicovr.com/developers/>

die Koordinaten einzelner Gelenkspunkte im Raum nicht ermittelt werden können, da kein räumlich fixiertes Koordinatensystem vorhanden ist.

- Für den Einsatz einer VicoVR in der Fehlererkennung bei Montagetätigkeiten gibt es derzeit keine entsprechende Verarbeitungssoftware für den Tiefensensor. Die Programmierung einer solchen ist sehr aufwendig und benötigt Erfahrung in diesem Bereich.
- Für eine großflächige Arbeitsplatzabdeckung müssen mehrere VicoVR-Systeme eingebaut werden, da der Sensor Bewegung einer Person nur frontal erkennt.
- Mit nur einem Skelettpunkt je Hand ist eine Maschinensteuerung mit Handzeichen mit Hilfe beigelegter Körpertrackingsoftware nicht möglich.
- Die Auflösung ist sehr gering, sodass bei einer Distanz von 5 m zwar eine Person noch erfasst wird, allerdings keine Details erkennbar sind.

2.3.7 Openpose

Hierbei handelt es sich nicht um ein Sensorsystem, sondern um eine sehr aufstrebende Software zur Personenerkennung. Die Daten für diese Software können von jeder beliebigen Kamera stammen, auch bereits aufgenommene Videos können nachträglich mit der Software analysiert werden. Je besser die Daten, bzw. die Auflösung des Bildmaterials, desto genauer sind die Ergebnisse der Openpose Software.

Vorteile:

- Die Software kann auf jedes Video angewandt werden.
- Es ist nur eine einzige Kamera notwendig, um beliebig viele Personen gleichzeitig zu erfassen.
- Bei Echtzeitbodytracking entstehen kaum Verzögerungen, da nur mit RGB-Pixelvergleichen gearbeitet wird.
- 130 Punkte werden erstellt.
- Bei einer nicht kommerziellen Nutzung ist die Software kostenlos zugänglich.

Nachteile:

- Das System ist darauf ausgelegt Personen zu erkennen und besitzt keinen Referenzpunkt im Raum. Dieser Umstand bedeutet auch, dass Koordinaten

einzelner Gelenkspunkte im Raum nicht ermittelt werden können, da kein räumlich fixiertes Koordinatensystem vorhanden ist.

- Für eine großflächige Arbeitsplatzabdeckung muss das Bildmaterial mehrerer Kameras, aus verschiedenen Winkeln benutzt werden, um ein zuverlässiges dreidimensionales Abbild der Person zu erzeugen.

2.3.8 Direkte Gegenüberstellung der bildbasierenden Systeme

	Kinect v2	ORBEC Persee	ORBEC Astra PRO	Stereolabs ZED	VICOVR	OPENPOSE
Gewicht	1,4 kg	0,8 kg	0,3 kg	0,159 kg	0,45 kg	
Reichweite	0,5 - 8 m	0,6 - 8 m	0,6 - 8 m	0,5 - 20 m	0,5 - 4,5 m	
Infrarotbild	512 x 424 (30 BpS)	vorhanden	vorhanden	-	-	
Tiefenbild (30 BpS)	512 x 424	640 x 400	640 x 480	siehe Kamera	640 x 480 VGA	
RGB Bild	1920 x 1080 (30 BpS)	1280 x 720 (30 BpS)	1280 x 720 (30 BpS) 1280 x 960 (7 BpS) 320 x 240 (30 BpS)	4416 x 1242 (15 BpS) 3840 x 1080 (30 BpS) 2560 x 720 (60 BpS)	vorhanden	Alle Kameras möglich
Sichtfeld	70° horiz x 60° vert.	60° horiz x 45° vert. (73°diag)	60° horiz x 45° vert. (73°diag)	110° diag	60° horiz x 49,5 vert. (73° diag)	
Mikrofone	4	2	2	-	-	
Betriebssystem	Windows	Android	Windows, Linux, Android	Windows, Linux	Android, iOS	Ubuntu, Windows, nvidia
USB	3.0	2.0	2.0	3.0	micro USB	
Interface		2,4 GHz			Bluetooth 4.0, Wi-Fi	
HDMI		2.0				
Software	SDK 2.0	ORBEC Astra SDK oder Open NI	Astra SDK oder Open NI	SDK	SDK Unity 3D, UE4	Openpose
Preis		239,99 \$	149,99 \$	449 \$	299 \$	0 \$
Skelett	17 für Körper 8 für Hände	19 für Körper	19 für Körper	NEIN	19 für Körper	18 für Körper 42 für Hände 70 für Gesicht
Personen Anzahl	6	2	2	x	2	∞

Tabelle 4: Gegenüberstellung der bildbasierenden Sensorsysteme

In Tabelle 4 sind die bildbasierenden Systeme nochmals im Vergleich dargestellt. Jedes System hat Vor- und Nachteile, sowie Alleinstellungsmerkmale. Während Systeme wie das Stereolabs und VicoVR ihren Einsatz vor allem in spezifischen Anwendungen, wie beispielsweise in der 3D-Rekonstruktion und in der Spieleindustrie

finden, haben sich die Orbbec und die Kinect auch im industriellen Bereich durchsetzen können. Vor allem die ToF-Technologie ist stark im Voranschreiten und ermöglicht eine immer besser werdende Tiefenerkennung. Diese beiden Systeme sind ebenfalls führend im Bereich des visuellen Bodytracking. Die Software ermöglicht mit Hilfe der Tiefendaten und der RGB Kameras eine fortgeschrittene und kontaktlose Personenerkennung.

In der weiteren Arbeit werden Personentrackingsysteme einerseits durch ihre Tiefendatentechnologie und andererseits anhand der Anzahl an Gelenkpunkten beurteilt. Entscheidend ist, ob das Trackingsystem zuverlässig Griffbewegungen erkennen kann. Dies setzt voraus, dass eine Hand mit mindestens zwei Referenzpunkten erkannt wird. Dadurch kann eine zweidimensionale Aussage über die Position der Hand gegeben werden.

2.4 Analyse möglicher Anwendungsgebiete

Der Bedarf an Assistenz-, Qualitätssicherungs- und Überwachungssystemen ist mit dem Voranschreiten der vierten industriellen Revolution als neue Marktlücke hervorgegangen. Immer mehr Unternehmen entwickeln Produkte, beispielsweise das ELAM-System um diesen Markt zu befriedigen. Die Lösungen sind, aufgrund des variierenden Einsatzgebietes, von Hersteller zu Hersteller sehr verschieden. Oftmals finden sich auch Produkte aus anderen Bereichen in Montagebetrieben wieder. Das Kinect V2 Sensorsystem wurde beispielsweise für die Spieleindustrie entwickelt, aufgrund seiner Eigenschaften als Personenerkennungssystem ist es allerdings auch in der industriellen Montage einsetzbar.

Anhand vorheriger Abschnitte dieses Kapitels lassen sich die beschriebenen Sensoren und Sensorsysteme in zwei Kategorien einteilen: Jene welche entwickelt wurden, um Bewegungen des Menschen zu erfassen und jene welche Abläufe anhand von Ereignissen erfassen. Zur ersten Kategorie zählen sämtliche Trackingsysteme, welche versuchen den Menschen bestmöglich zu analysieren und den Montageprozess als Ganzes zu erfassen. Die zweite Kategorie beinhaltet sämtliche Sensoren zur Überwachung einzelner Teilschritte in der Montage. Dazu zählen beispielsweise Gewichtssensoren, Lichtschranken, Drucksensoren etc. Sie werden eingesetzt, um Fortschritte von Teilprozessen in der Montage zu erfassen. Beispielsweise kann ein angebrachter Lichtschranken vor einem Behälter einen Eingriff in diesen Behälter erfassen. Diese Einsatzmöglichkeit eines Lichtschranken, erlaubt eine Aussage über einen Teilprozess einer, aus vielen dieser Teilprozessen bestehenden, komplexen Montage zu treffen.

Im folgenden Kapitel wird ein Bewertungssystem entwickelt, welches der Beurteilung von Sensorkombinationen in Bezug auf derartige Teilprozesse in der Montage dient.

3 Bewertungssystem

In vorangegangenen Kapiteln wurden Sensoren und Sensorsysteme vorgestellt. Sie sollen die im ersten Kapitel formulierten Probleme, welche aufgrund neuer Marktanforderungen an die Montage entstehen, lösen. Um nun für jeweilige, teils sehr spezifische Produktionslinien die idealen Sensoren bzw. Sensorsysteme zu finden, wird im folgenden Kapitel ein Bewertungsverfahren entwickelt und beschrieben, welches vorhandene Montageschritte mit den Leistungen verschiedener Sensoren direkt in Verbindung setzt. Dadurch wird nach Angabe von Montageschritten und Sensorsystemen eine Abschätzung der Montagefortschrittserkennung errechnet. In einem ersten Teil wird die Frage behandelt, wie der Montageprozess unterteilt und messbar gemacht werden kann. Sensoren haben einen räumlich eingeschränkten Einsatzbereich, beispielsweise können Lichtschranken nur Prozesse erkennen, welche mit Auslösen eines Sensors in Verbindung stehen. Daraus folgt, dass die unterteilten Prozesse bei jeder Wiederholung konstante Eigenschaften aufweisen müssen, um messbar zu sein bzw. um von einem Sensor erfasst zu werden. Anschließend werden mehrere Montageschritte zusammengefasst, damit deren erfolgreiche Absolvierung oder Teilabsolvierung beurteilt werden kann.

3.1 Das MTM-Verfahren und das MTM-UAS

MTM bedeutet Methods Time Measurement und ist ein Verfahren zur zeitlichen Bewertung einer Arbeitsmethode.¹¹⁰ Es beschreibt menschliche Arbeit mit weltweit einheitlichen Zeitstandards. Zu analysierende Systeme kommen sowohl aus der Großserien- und Massenfertigung als auch aus der Einzel-, Klein- und Mittelserienfertigung. Das eigentliche Einsatzgebiet ist eine Gestaltung von Arbeitssystemen, sowie Planung und Steuerung von Prozessen. Das MTM-Verfahren lässt sich somit auch bei Einzel- bzw. Kleinserienfertigung anwenden. Im Fall einer Montagefortschrittserkennung ist nicht die Zeitermittlung der nützliche Aspekt des MTM-Verfahrens, sondern die Tatsache, dass laut MTM-Verfahren alle menschlichen Arbeiten in fünf Grundbewegungen unterteilt werden können. Komplexe Montageschritte lassen sich somit auf eine Aneinanderreihung einfacher Bewegungen und Aktionen zurückführen.

Das MTM-Verfahren besteht aus fünf Grundbewegungen: „Hinlangen“, „Greifen“, „Bringen“, „Fügen“ und „Loslassen“. 80 – 85 % aller Abläufe bestehen aus diesen fünf

¹¹⁰ http://www.mtm-vereinigung.at/mtm/set_links.htm

Bewegungen.¹¹¹ Die eben genannte Abfolge ist meist dieselbe und wird als Grundzyklus bezeichnet.

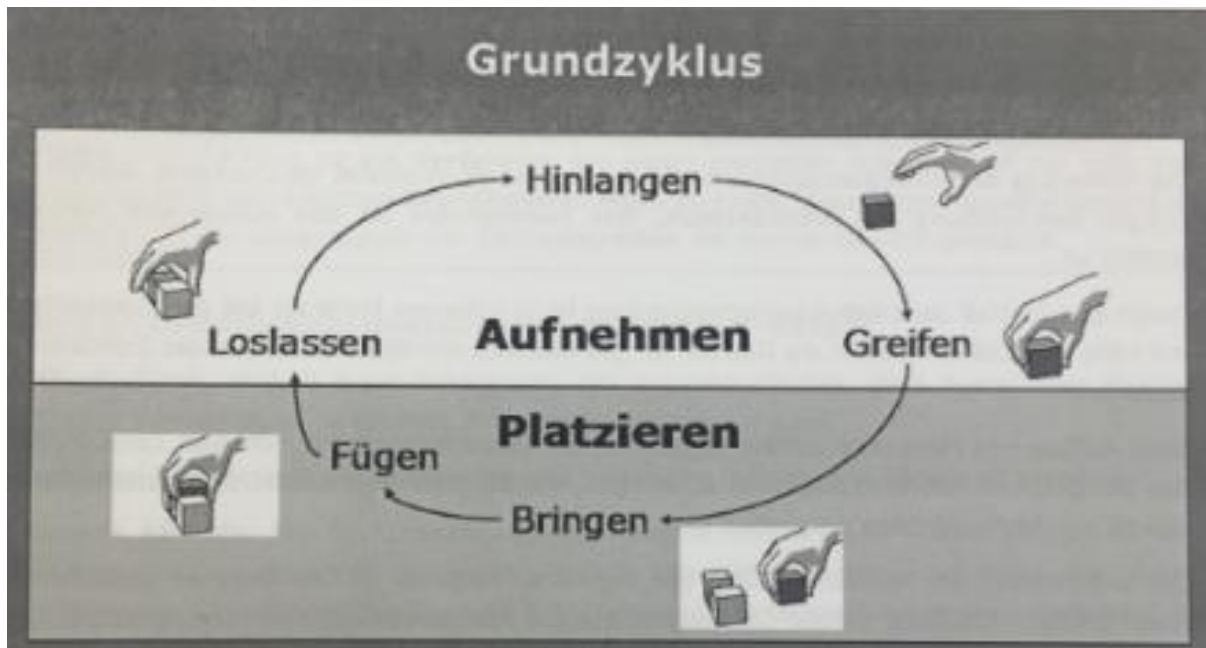


Abbildung 27: MTM-Grundzyklus

In Abbildung 27 ist der Ablauf dieses Grundzyklus dargestellt. Zusätzlich werden die fünf Grundbewegungen noch von weiteren Bewegungen ergänzt. Hierbei handelt es sich um „Drücken“, „Trennen“, „Drehen“, „Körper-, Bein- und Fußbewegungen“ und „Blickfunktionen“.¹¹²

Eine Zerlegung in Grundbewegungen dient in einem ersten Schritt der Analyse und Identifikation von Montagetätigkeiten und anschließend wird versucht, einzelne Grundbewegungen zu messbaren Tasks zusammenzufassen. Dafür wurde das Bausteinsystem „Universelles Analysiersystem“ (UAS) aus dem MTM Verfahren entwickelt. Es fasst die Grundbewegungen des MTM-Verfahrens zu Tasks zusammen. Diese sind beispielsweise Schraubarbeiten, Behandeln, Festspannen, Lösen und das Montieren von Normteilen. Der Anwendungsbereich des MTM-UAS Verfahrens findet unter anderem Anwendung in der Elektro- und Elektronikfertigung, sowie im Gerätebau.¹¹³

Bei den MTM-Zeitermittlungsverfahren wird bei Hinlang-, Greif- und Bringbewegungen zu Teilen oder Werkzeugen nicht unterschieden. Im Fall einer sensorgestützten Überwachung besteht allerdings Differenzierungsbedarf, da einige Sensoren am Werkzeug, andere an Teilen befestigt werden und daher beispielsweise nur eine bestimmte Bringbewegung identifiziert werden kann. In Tabelle 5 ist ein MTM-UAS

¹¹¹ vgl. Österreichische MTM-Vereinigung, 2017, S. 33

¹¹² vgl. U.S. MTM Association for Standards and Research, 1955

¹¹³ vgl. Österreichische MTM-Vereinigung, 2017, S. 18

Task beschrieben und in seine Grundbewegungen aufgeteilt, wobei letztere um die Differenzierungen erweitert wurden (eindreihen per Hand, festziehen mit Werkzeug).

Task		Grundbewegung
Schraubarbeiten	von Hand	Hinlangen zum Teil
		Teil greifen
		Teil bringen
		Teil fügen
		Teil eindreihen per Hand
		Teil festziehen per Hand
		Teil loslassen
	von Hand ohne festziehen	Hinlangen zum Teil
		Teil greifen
		Teil bringen
		Teil fügen
		Teil eindreihen per Hand
	Schrauben einschrauben und festziehen mit Werkzeug	Hinlangen zum Teil
		Teil greifen
		Teil bringen
		Teil fügen
		Teil eindreihen mit Werkzeug
		Teil festziehen mit Werkzeug
Hinlangen zum Werkzeug		
Werkzeug greifen		
Werkzeug bringen		
Werkzeug ablegen		

Tabelle 5: Beispiel: Zuordnung UAS-Montagetask „Schraubarbeiten“ zu adaptierten MTM-Grundbewegungen

Diese Aufteilung in Grundbewegungen wurden ebenfalls für weitere Tasks des MTM-AUS-Verfahrens durchgeführt, darunter auch beispielsweise der Task: „Normteile montieren“.

Ziel dieses Vorgehens ist, eine mittels Sensoren erfassbare Größe zu identifizieren, welche Aufschluss über eine erfolgreiche Absolvierung des Tasks gibt.

3.2 Zuordnung der Sensoren zu Montagetasks

Bei komplexen Sensorsystemen oder Sensorkombinationen erweist sich eine Zuordnung zu einzelnen Montageschritten als schwierig. Neben Faktoren wie beispielsweise dem praktischen Einbau oder der Genauigkeit einer Messung eines Sensors, muss auch die Wirtschaftlichkeit des Sensoreinsatzes berücksichtigt werden.

Wie bereits in Abschnitt 2.3 erläutert, können gleiche Sensoren in verschiedenen Kombinationen und mit entsprechender Datenverarbeitungssoftware unterschiedliche Daten gewinnen. Bei Auswahl von Sensoren oder Sensorsystemen muss darauf geachtet werden, welche Einsatzmöglichkeiten, beziehungsweise Eigenschaften verwendete Systeme bieten. Dazu dürfen nicht lediglich Eigenschaften einzelner Sensoren eines Sensorsystems betrachtet und aufsummiert werden. Als Beispiel kann die Kinect herangezogen werden. Sie kann mit Hilfe von Tiefensensor, Infrarotbild und einer RGB Kamera Gesten erkennen. Separat betrachtet wären diese Sensoren ohne der entsprechenden Datenverarbeitung nicht in der Lage, Gesten zu erkennen. Erst eine Kombination der Sensoren und eine Vernetzung der Daten führen zu einer komplexen Gestenerkennung. Somit müssen beim Einsatz einer Kinect zusätzlich zu den Informationen der einzelnen Sensoren weitere Daten berücksichtigt werden.

Die folgenden Beschreibungen der Grundbewegungen sind aus der MTM-1 Datenkarte entnommen.¹¹⁴ Die Beschreibungen werden mit Möglichkeiten zur Erfassung der Bewegungen durch Sensoren ergänzt.

- Die Aktion „**Hinlangen**“ wird in fünf Kategorien aufgeteilt, wobei vier der fünf das Hinlangen zu einem Gegenstand in einer bestimmten Lage, die 5. Kategorie das Hinlangen zu einem Gegenstand, welcher sich bereits in der anderen Hand des Montagemitarbeiters befindet, beschreiben. Eine Armbewegung über eine bestimmte Distanz kann mittels Ortungssensoren ermittelt werden. Je mehr Sensoren sich auf dem Arm befinden, desto genauer wird die Bewegung erkannt. Eine weitere Möglichkeit die Position eines Arms beziehungsweise einer Hand zu ermitteln besteht darin, im Raum Sensoren anzubringen, um Bewegungen zu erkennen. Hierzu bieten sich beispielsweise optische Sensoren, wie Lichtschranken, Bewegungssensoren oder Trackingsysteme an.
- Die Aktion „**Greifen**“ bezieht sich immer auf einen oder mehrere Gegenstände. Einerseits wird die Größe des zu fassenden Gegenstandes definiert, andererseits wird die Art des Griiffs unterschieden. Die Größe des Gegenstandes wird, bei allgemeinen Objekten durch Seitenabmessungen (Länge x Höhe x Breite) und bei runden Objekten durch den Durchmesser definiert. Die Arten des Griiffs sind Zufassungsgriff, Ankantgriff, Abrollgriff, Nachgriff, Übergabegriff, Auswählgriff und Berührungsgriff. Die unterschiedlichen Griiffe können mit Sensoren nur schwer erkannt werden. Es besteht eine theoretische Möglichkeit mittels vieler einzelner Positionssensoren an einzelnen Gliedern der Hand oder Kamerasystemen, welche Bewegungen einzelner Finger ermitteln können, diese Griiffe zu ermitteln. Die Aktion „Greifen“ könnte zwar erfasst werden, allerdings führt dies zu einer Beeinträchtigung des Werkers durch aufwendige Befestigungen von Sensoren an Händen und

¹¹⁴ vgl. U.S. MTM Association for Standards and Research, 1955

Fingern. Mit optischen Sensoren müsste ein durchgehendes Sichtfeld von mindestens drei Seiten gegeben sein, um ein mehrdimensionales Abbild der Hand generieren zu können. Dies ist in realen Arbeitssituationen kaum zu erreichen. Drucksensoren auf den Fingern können Aufschluss über den Kontakt mit der Umgebung geben. Eine andere Herangehensweise wäre eine Grifferrkennung über den Gegenstand. In diesem Fall können Drucksensoren am Gegenstand ein Zugreifen erkennen. Ein weiterer Aspekt wäre eine Erkennung des Kontaktverlustes eines Gegenstandes zum ursprünglichen Entnahmeort. Hierfür würde sich eine Gewichtsmessung des Entnahmebehälters eignen, welche allerdings keinen Aufschluss über Griffart und Abmessungen eines Objektes gibt. Bei Entnahme aus einer Halterung kann beispielsweise auch ein optischer Sensor wie eine Lichtschranke erkennen, ob sich ein Gegenstand an einer bestimmten Position befindet. Es kann jedoch keine Aussage darüber gegeben werden, ob der Gegenstand auch montiert wurde.

- Die Aktion „**Loslassen**“ unterscheidet lediglich zwei Fälle: In beiden löst sich ein Kontakt zwischen Mensch und Gegenstand, aber nur in einem öffnet die beteiligte Person die Finger. Hier kann eine Positionserfassung einzelner Finger Aufschluss über die Aktion geben. Im anderen Fall, beispielsweise dem Schließen einer Lade, können Drucksensoren auf der Hand, sowie am Gegenstand selbst ein Aufheben des Kontaktes feststellen. Die Aktion Loslassen kann, ähnlich wie beim Greifen auch durch den Kontakt eines Gegenstandes am Zielort erfasst werden. Hierzu bietet sich je nach Platzgestaltung eine Gewichtsmessung am Zielort, beziehungsweise ein Lichtschranken an der Endposition, an.
- Die Aktion „**Bringen**“ ist der Aktion Loslassen sehr ähnlich, mit dem Unterschied, dass beim Bringen ein Gegenstand in eine bestimmte Lage gebracht werden muss. Die Positionierungsgenauigkeit ist in Kategorien unterteilt, wobei die präziseste eine Genauigkeit von 12 mm besitzt und alle Bring-Bewegungen, welche eine höhere erfordern, unter dem Punkt Fügen berücksichtigt werden. Um eine Bring-Bewegung sensorgestützt zu erfassen, können je nach Montageumständen Lichtschranken, pneumatische Sensoren oder aber auch optische Bildverarbeitungssysteme, wie beispielsweise das Kamerasystem In-Sight 2000 verwendet werden.
- Die Aktion „**Fügen**“ ist eine präzisere Variante der Aktion „Bringen“. Sensoren zur Montageerkennung sind daher dieselben, welche bereits bei „Bringen“ erwähnt wurden, allerdings mit einer erhöhten Genauigkeit gegenüber Bring-Bewegungen. Einsatz pneumatischer Sensoren ist bei Teilen mit geringem Eigengewicht (beispielsweise Puder) ein großes Problem und somit nicht für

alle Teile geeignet, vor allem wenn eine exakte Positionierung von unter einem Millimeter gefordert ist.

- Die Aktionen „**Drücken**“ und „**Trennen**“ treten im Montagebereich nur sehr selten auf. Hierbei handelt es sich um Arbeitsschritte wie beispielsweise unter Kraftaufwendung einen Taster betätigen. Drucksensoren können für Betätigungen von Schaltern eingesetzt werden, allerdings handelt es sich hier nicht im direkten Sinn um eine Montagetätigkeit und wird daher auch in folgenden Abschnitten der Arbeit nicht näher berücksichtigt. Sensoren zur Kontrolle eines Trennvorganges sind ebenfalls eher selten im Montagebereich anzutreffen und jeder Trennvorgang kann sehr individuell ablaufen. Ein gemeinsamer Faktor aller Trennvorgänge ist der Kontaktverlust zwischen den zu trennenden Objekten. Da weder Form der Kontaktfläche noch Kraftübertragung zwischen Objekten oder Art der Trennung einheitlich sein müssen, ist es schwierig eine Sensorgruppe zur Überprüfung derartiger Trennvorgänge festzulegen. Wird ein Trennvorgang vollständig oder zumindest teilweise von einer Maschine durchgeführt, können Kraftänderungen Aufschluss über den Vorgang geben.
- Ähnlich verhält sich auch die Erkennung der Aktion „**Drehen**“. Ein Kraftaufwand beziehungsweise ein aufgebrachtes Moment, sowie ein Drehwinkel können meistens nur anhand integrierter Sensoren in Werkzeugen ermittelt werden. So gibt es beispielsweise Drehschrauber, welche auch in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ eingesetzt werden, die Drehmuster gespeichert haben und somit erkennen, ob eine Schraube mit dem ausreichenden Moment angeschraubt wurde. Zusätzlich kann anhand des gemessenen Drehwinkels auf Schraubenlängen geschlossen werden.
- Zuletzt werden „**Körper-, Bein- und Fußbewegungen**“ angeführt. Diese sind meist nicht direkt an der Montage eines Produktes beteiligt, allerdings eine Grundvoraussetzung für verschieden Arbeitsschritte. Neben Lichtschranken können auch Personentrackingsysteme eingesetzt werden.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die eben beschriebene Zuordnung von Sensoren und Grundbewegungen. Sofern nicht anders angegeben, wird die Fortschrittserkennung der Grundbewegung zu 100 % abgedeckt. Ein Drehmomentsensor am Werkzeug beispielsweise erkennt das „Festziehen“ einer Schraube zu 100 %, allerdings kann nur mit einer 50 % Abdeckung eine Drehbewegung erkannt werden.

Vorhandene Sensoren	MTM Grundbewegungen
Waage Schütte	Bringen
Waage Bauteil	Hinlangen, Greifen, Bringen, 50 % Fügen
Bauteilkamera (z.B.: In-Sight 2000)	Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen
Lichtschranken/Tiefensensor Schütte	Hinlangen
Drehmomentsensor am Werkzeug	Festziehen, 50 % Drehen
Handtracking	Hinlangen, 50% Bringen
17-Punkt-Tracking (Körper, Beine, Arme)	50% Hinlangen, 50% Bringen
Drehwinkelsensor am Werkzeug	Drehen, 50% Festziehen
25-Punkt-Tracking (Körper, Beine, Füße, Arme und Hände)	Hinlangen, 50% Bringen
Handschuhe mit Drucksensoren	Hinlangen, Greifen
Teiletracking (RFID)	Bringen (Teile)
Werkzeugtracking	Bringen (Werkzeug)

Tabelle 6: Zuordnung der Sensoren zu MTM Grundbewegungen

Zu beachten ist, dass die Genauigkeit von Sensoren einen erheblichen Einfluss auf die Montagefortschrittserkennung hat. Somit muss der jeweilig eingesetzte Sensor auf seine Eigenschaften überprüft werden, um anschließend beurteilen zu können, ob verschiedene Grundbewegungen auch erkannt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Sensoren individuell in jedem Montagebetrieb gezielt an den Montagevorgang angepasst werden können. Wie bereits im Abschnitt 2.3 erwähnt, können ähnliche Sensoren unterschiedliche Montagefortschrittserkennungsmöglichkeiten liefern. Ein Beispiel ist eine Bewegungsüberprüfung einer Person. Einerseits können Bewegungsmelder An- oder Abwesenheit einer Person erkennen, andererseits kann ein Kinect V2 Sensorsystem, Schütteneingriffe überprüfen oder mittels Gestensteuerung Maschinen steuern.

3.3 Faktoren und Einflüsse

In Montagehallen können andere Bedingungen als in einem Testlabor herrschen. Faktoren wie Arbeitstemperatur, Lichteinfall, elektromagnetische Strahlung, Vibrationen etc. müssen berücksichtigt werden, da diese einen großen Einfluss auf Sensoren haben können. Im später erläuterten Bewertungssystem werden diese Einflussgrößen nicht mitberücksichtigt, da verschiedene Montagebereiche unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt sind. Beispielsweise können lichtempfindliche Sensoren, in deren Nähe geschweißt wird, dadurch gestört werden. Sollten derartige Umstände gegeben sein, muss eine Bewertung einzelner Sensoren individuell auf die Montageerkennung angepasst werden.

3.4 Bewertungssystem basierend auf Excel

Um bewerten zu können welche Sensorkombination eine größtmögliche Fortschrittserkennung liefert, wird im folgenden Abschnitt ein Bewertungsverfahren entwickelt. Es basiert auf der vorangegangenen Zuordnung von Sensoren zu Grundbewegungen.

Ziel des Bewertungssystems ist, bei vorgegebenen Arbeitsschritten und einer Auswahl einsetzbarer Sensoren und Sensorsystemen, Aufschluss über den Grad der Montagefortschrittserkennung zu liefern.

Im folgenden Abschnitt soll das Verfahren beispielhaft anhand einer Montagetätigkeit nähergebracht werden. Vier Tasks „Schraubarbeiten mit Hand ohne festziehen“, sowie acht Tasks „Schraubarbeiten mit Werkzeug mit festziehen“ sollen mit Sensoren zur Fortschrittsüberwachung ausgestattet werden. Dazu wird in Tabelle 7 die Anzahl in der Produktion vorhandener Tasks eingetragen, um anschließend verschiedene Sensorkombinationen auszutesten.

Task		Grundbewegung	Abdeckung (%)	Summe (%)	Anzahl der vorhandenen Tasks
Schraubarbeiten	von Hand	Hinlangen zum Teil	0	0	0
		Teil greifen	0		
		Teil bringen	0		
		Teil fügen	0		
		Teil eindrehen von Hand	0		
		Teil festziehen von Hand	0		
		Teil loslassen*	0		
	von Hand ohne festziehen	Hinlangen zum Teil	0	0	4
		Teil greifen	0		
		Teil bringen	0		
		Teil fügen	0		
		Teil eindrehen von Hand	0		
	Schrauben einschrauben und festziehen mit Werkzeug	Hinlangen zum Teil	0	0	8
		Teil greifen	0		
		Teil bringen	0		
Teil fügen		0			
Teil eindrehen mit Werkzeug		0			
Teil festziehen mit Werkzeug		0			
Hinlangen zum Werkzeug		0			
Werkzeug greifen		0			
Werkzeug bringen		0			
Werkzeug ablegen		0			

Tabelle 7: Auswahl der Tasks (farblich hinterlegte Zellen) *wird in den Berechnungen nicht berücksichtigt da diese Grundbewegung keinen Beitrag zum Montagefortschritt leistet. Bei den weiteren Tasks wird daher auf die Erwähnung dieser Grundbewegung verzichtet.

Zur Veranschaulichung werden nun in Tabelle 8 die Sensoren ausgewählt. Dafür müssen in den farblich hinterlegten Zellen das Vorhandensein (J) oder die Abwesenheit (N) des Sensors eingetragen werden.

Vorhandene Sensoren	J/N	MTM Grundbewegungen
Waage Schütte	J	Bringen
Waage Bauteil	N	Hinlangen, Greifen, Bringen, 50 % Fügen
Bauteilkamera (z.B.: In-Sight 2000)	N	Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen
Lichtschranken/ Tiefensensor Schütte	N	Hinlangen
Drehmomentsensor am Werkzeug	J	Festziehen, 50 % Drehen
Handtracking	N	Hinlangen, 50% Bringen
17-Punkt-Tracking (Körper, Beine, Arme)	N	50% Hinlangen, 50% Bringen
Drehwinkelsensor am Werkzeug	N	Drehen, 50% Festziehen
25-Punkt-Tracking (Körper, Beine, Füße, Arme und Hände)	N	Hinlangen, 50% Bringen
Handschuhe mit Drucksensoren	N	Hinlangen, Greifen
Teiletracking (RFID)	N	Bringen (Teile)
Werkzeugtracking	N	Bringen (Werkzeug)

Tabelle 8: Auswahl der Sensoren (farblich hinterlegte Zellen)

Die gleichzeitige Auswahl einer Waage bei der Schütte und eines Drehmomentsensors am Werkzeug führt zu folgendem Ergebnis.

Task		Grundbewegung	Abdeckung (%)	Summe (%)	Anzahl der vorhandenen Tasks
Schraubarbeiten	von Hand	Hinlangen zum Teil	0	17	0
		Teil greifen	0		
		Teil bringen	100		
		Teil fügen	0		
		Teil eindrehen von Hand	0		
		Teil festziehen von Hand	0		
		Teil loslassen	0		
	von Hand ohne festziehen	Hinlangen zum Teil	0	20	4
		Teil greifen	0		
		Teil bringen	100		
		Teil fügen	0		
		Teil eindrehen von Hand	0		
	Schrauben einschrauben und festziehen mit Werkzeug	Hinlangen zum Teil	0	39	8
		Teil greifen	0		
		Teil bringen	100		
		Teil fügen	0		
		Teil eindrehen mit Werkzeug	50		
		Teil festziehen mit Werkzeug	100		
		Hinlangen zum Werkzeug	0		
Werkzeug greifen		0			
Werkzeug bringen		100			
Werkzeug ablegen		0			

Tabelle 9: Ergebnistabelle des Beispiels

Um die gesamte Montagefortschrittsabdeckung zu errechnen, wird folgende Formel verwendet.

$$\text{Montagefortschrittsabdeckung} = \frac{\sum_{n=1}^i (\text{Summe}_n * \text{Anzahl}_n)}{\sum_{n=1}^i \text{Anzahl}_n}$$

Formel 1: Montagefortschrittsabdeckung

Bei gleichzeitigem Einsatz einer Schüttenwaage und eines Drehmomentsensors am Werkzeug wird eine Montagefortschrittserkennung ermittelt (siehe Formel 1). Dieser Wert setzt sich aus der Summe aller erkannten Grundbewegungen, bezogen auf die gesamte Anzahl an Grundbewegungen in der Beispielproduktion, zusammen. In oben dargestelltem Beispiel ergibt die Montagefortschrittsabdeckung $\frac{(4*20+8*39)}{(4+8)} = 33 \%$.

Die Montagefortschrittserkennung ist sehr gering, daher sollten weitere Sensorkombinationen miteinbezogen werden, um einen höheren Wert zu erreichen.

3.5 Vor-/Nachteile des Systems

Das entwickelte Verfahren bietet eine Möglichkeit, schnell und einfach eine Bewertung über den Grad der Montagefortschrittserkennung zu erhalten.

Der Prozentsatz ist auf die Gesamtzahl an Grundbewegungen eines Montagevorgangs bezogen. Benötigt ein Arbeitsschritt (Task) eine große Anzahl an Grundbewegungen, wird dieser höher gewichtet als ein Montageschritt mit einer vergleichsweise geringen Anzahl. Eine Herangehensweise, um diesen Umstand zu umgehen, wäre die Einführung von Voraussetzungen für ein erfolgreiches Absolvieren eines Montagetasks. Sensorsysteme könnten, bezogen auf das Erkennen dieser Voraussetzungen, beurteilt werden und der Grad der Montagefortschrittserkennung darauf bezogen werden. Als Beispiel kann „Schraubarbeiten per Hand“ herangezogen werden. Während der Task bei dem in Abschnitt 3.4 entwickelten Verfahren in sieben Grundbewegungen aufgeteilt wird, könnte ebenso definiert werden, dass die Voraussetzungen für den Erfolg dieses Montagetasks das **Eindreihen** und **Festziehen** der **richtigen Schraube** am **richtigen Ort** sind. Somit wäre der Bezug der Fortschrittserkennung lediglich auf vier Voraussetzungen festgelegt und damit auch die prozentuelle Gewichtung eine andere.

Vorteil des entwickelten Verfahrens ist, dass eine Rückführung von Montagetätigkeit auf einheitliche Grundbewegungen dazu führt, dass nahezu jede menschliche Bewegung damit beschrieben werden kann und daher auch jede Montagetätigkeit. Werden nun Sensoren anhand dieser Grundbewegungen beurteilt (Sensor A erfasst Grundbewegung B) können sehr komplexe Montagetätigkeiten auf ihren Fortschritt beurteilt werden. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass die Beurteilung der Sensoren auf Erkennen einer Grundbewegung nicht eindeutig ist. So können manche Sensoren beispielsweise lediglich Teile einer Bewegung oder Grundbewegungen in einem bestimmten räumlichen Bereich einer Halle erkennen. Die Genauigkeit eines Sensors ermöglicht keine absolut sichere Aussage über die Grundbewegung. Es wurden daher auch in Abschnitt 3.1 die MTM-Grundbewegungen um örtliche Komponenten erweitert (z.B.: Eindreihen per Hand).

Ein weiterer Nachteil des Verfahrens ist, dass Sensorhersteller kontinuierlich neue Systeme entwickeln und dadurch die Auswahl an Sensoren aus Tabelle 6 stetig aktualisiert und erweitert werden muss. Des Weiteren sind die vorgestellten Sensoren in Hinblick auf die 3D-Druckerproduktion der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ ausgewählt. Eine Produktionslinie auf einem Fließband beispielsweise, erfordert an die Struktur angepasste Sensorsysteme, um einen Montagefortschritt erkennen zu können. Dasselbe gilt für eine Teilentnahme aus einer Vorrichtung anstatt einer Schütte.

Ein möglicher Zugang wäre eine Datenbank zu erstellen, welche sämtliche am Markt erhältlichen Sensoren beinhaltet. Anschließend muss eine Bewertung hinsichtlich Erkennung von Grundbewegungen durchgeführt werden. Sind diese beiden Schritte erledigt kann aus der Datenbank eine Auswahl an Sensoren für die jeweilige Produktionslinie getroffen werden. Der Benutzer wählt aus einer Liste an Sensorsystemen (siehe Tabelle 6) jene aus, welche er überprüfen möchte. Anschließend trägt er die Anzahl der Tasks ein, welche in seinem Montagefall getätigt werden müssen. Das Programm gibt dem Benutzer einen Prozentsatz aus, welcher dem Grad der erwarteten Montagefortschrittserkennung entspricht.

4 TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0

Die „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ ist ein Demonstrationsprojekt der Technischen Universität Wien. Es handelt sich um eine Produktionsstätte. Anhand der Produktionslinie eines 3D-Druckers können hier neue Produktionskonzepte getestet werden. Ziel ist es, eine intelligente Produktion aufzubauen, welche sich durch eine hohe Effizienz bei einer gleichzeitig geringen Losgröße auszeichnet.

4.1 3D-Druckermontage

Der Drucker wird auf einem FTS aufgebaut, wobei auch das Werkzeug, ein Teil des Materials und die Montagevorrichtung auf dem FTS angebracht sind (siehe Abbildung 28). Der Montagevorgang findet ausschließlich auf dem drehbaren Montagetisch statt, wobei das FTS an drei verschiedenen Montagestationen hält, um verschiedenen Werkern die einzelnen Montagearbeiten zu ermöglichen. Die Montageplätze in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ sind derart aufgebaut, dass der Werker die benötigten Teile und Werkzeuge immer an örtlich festgelegten Stellen entnimmt. Des Weiteren sind die benötigten Teile immer in Reichweite des Arbeiters angebracht. Die Platzierung der Teile erfolgt je nach Position des Drehtisches an unterschiedlichen Stellen, bezogen auf ein räumlich definiertes Koordinatensystem. Der Drehtisch besitzt keinen Sensor, welcher den Winkel der Drehung erfassen kann, somit kann nicht auf die Ausrichtung des Druckers geschlossen werden. Die Druckerproduktion in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ erfolgt mittels einer Mensch-Maschinen-Kooperation in einer cyber-physischen Montageumgebung. Der Werker arbeitet mit vorprogrammierten Werkzeugen. Die Akkuschauber werden nur freigeschaltet, wenn der aktuelle Arbeitsschritt die Benützung eines Akkuschaubers erfordert. Außerdem sind bestimmte Einschraubabläufe gespeichert, wodurch ein vorgegebenes Anziehmoment garantiert wird und gleichzeitig eine Überprüfung der korrekten Schraubenlänge erfolgt.



Abbildung 28: Montageplatz der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“

In der Diplomarbeit werden die Montageaufgaben der ersten Station behandelt, da die Erhebung der Daten für die Montagestation zwei und drei den Umfang der Arbeit überschreiten würde. Zudem handelt es bei der letzten Station vor allem um den Einbau der Elektronik des 3D-Druckers.

4.1.1 Montageablauf in der „TU-Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“

In diesem Abschnitt wird näher auf den genauen Montageablauf der ersten Station eingegangen.

Die erste Montagestation beinhaltet sechs Montageaufgaben, welche wiederum in einzelne Teilaufgaben unterteilt werden können.

1. Die erste Montageanweisung lautet: „4 x untere Rahmenteile wie abgebildet in Vorrichtung legen und ausrichten“. Dieser Arbeitsablauf entspricht laut dem in Abschnitt 3 entwickelten Verfahren:
 - 4 x „Normteil montieren von Hand“

2. Die zweite Montageanweisung lautet: „4 x ‚Rahmen Vertikal‘ platzieren und mit unteren Rahmenelementen verschrauben“.

Dieser Ablauf entspricht:

- 4 x „Normteil montieren von Hand“
- 4 x „Schraubarbeiten mit Werkzeug“

3. Die dritte Montageanweisung lautet: „4 x Stellfuß montieren“.

Dieser Ablauf entspricht:

- 4 x „Schraubarbeiten von Hand ohne festziehen“

4. Die vierte Montageanweisung lautet: „1 x ‚Motor x-Achse‘ platzieren und mit ‚Rahmen Vertikal‘ sowie 1 x Befestigungswinkel Filament verschrauben“. Dieser Ablauf entspricht folgenden Schritten:

- 3 x „Normteil montieren von Hand“
- 1 x „Schraubarbeiten mit Werkzeug“

5. Die fünfte Montageanweisung lautet: „1 x ‚Motor y-Achse‘ platzieren und mit ‚Rahmen Vertikal‘ sowie 1 x Befestigungswinkel Filament verschrauben“. Dieser Ablauf entspricht:

- 3 x „Normteil montieren von Hand“
- 1 x „Schraubarbeiten mit Werkzeug“

6. Die sechste Montageanweisung lautet: „1 x ‚Motor z-Achse‘ mit unterem Rahmen verschrauben“.

Dieser Ablauf entspricht:

- 1 x „Normteil montieren von Hand“
- 2 x „Schraubarbeiten mit Werkzeug“

In Summe ergibt dies: 15 x „Normteil montieren von Hand“, 8 x „Schraubarbeiten mit Werkzeug“ und 4 x „Schraubarbeiten von Hand ohne festziehen“.

4.1.2 Faktoren und Einflüsse in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“

Die „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ wurde im August 2015 eröffnet. Aktuell findet keine durchgehende Montage in der Produktionshalle statt, wodurch die Betriebsmittel sowie die Montageinfrastruktur kaum Abnutzungen aufweisen. Die Beleuchtung ist konstant, der Produktionshallenboden eben und ohne Steigungen. Weder

Schwingungen noch akustische oder optische Störeinflüsse wirken auf den Montagemitarbeiter und seinen Arbeitsplatz.

4.2 Anwendung des Sensorauswahlverfahrens

In der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ sind bereits folgende Sensorsysteme integriert: Ein Drehmomentsensor und ein Drehwinkelsensor am Werkzeug (siehe Abbildung 29), ein 17-Punkte-Tracking System (Xsens), und ein Werkzeugtracking (Sarissa).



Abbildung 29: Akkuschauber mit integrierten Drehmoment- und Drehwinkelsensoren der Firma Bosch Rexroth

Die Anwendung des Sensorauswahlverfahrens auf die Montagetasks der 3D Drucker montage in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ ergibt, dass mit den vorhandenen Systemen bereits eine Montagefortschrittserkennung von 32 % an der ersten Montagestation erzielt wird. Der Wert ergibt sich, wenn die vorhandenen Sensoren und Montagetasks in das bereits beschriebene Bewertungssystem eingesetzt werden (siehe Abschnitt 3.4).

Werden nun abwechselnd zusätzliche Sensorsysteme zu den bereits implementierten Systemen der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ ausgewählt, können verschiedene Sensorkombinationen auf ihre resultierende Montagefortschrittserkennung bewertet werden (siehe Tabelle 10). Nach dem abwechselnden Hinzufügen jeweils eines Sensors wurde mit dem Bewertungssystem im besten Fall (einer zusätzlichen

Bauteilkamera) eine Montagefortschrittserkennung von 92% erzielt (siehe Tabelle 11). Dies entspricht einer Steigerung um 60% gegenüber dem Ausgangssystem.

Hinzugefügter Sensor	Abdeckung
Waage Schütte	41,7%
Lichtschranken/ Tiefensensor Schütte	41,7%
Teiletracking (RFID)	42,7%
Handtracking	43,4%
25-Punkt-Tracking (Körper, Beine, Füße, Arme und Hände)	43,4%
Handschuhe mit Drucksensoren	66,8%
Waage Bauteil	82,0%
Bauteilkamera (z.B.: In-Sight 2000)	92,0%

Tabelle 10: Abdeckung des Montagefortschritts in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ bei Hinzufügen einzelner Sensoren

Task		Grundbewegung	Abdeckung (%)	Summe (%)	Anzahl	
Schraubarbeiten	von Hand	Hinlangen zum Teil	100	67	0	
		Teil greifen	100			
		Teil bringen	100			
		Teil fügen	100			
		Teil eindrehen von Hand	0			
		Teil festziehen von Hand	0			
		Teil loslassen	0			
	von Hand ohne festziehen	Hinlangen zum Teil	100	80	4	
		Teil greifen	100			
		Teil bringen	100			
		Teil fügen	100			
		Teil eindrehen von Hand	0			
	Schrauben einschrauben und festziehen mit Werkzeug	Hinlangen zum Teil	100	88,9	8	
		Teil greifen	100			
		Teil bringen	100			
		Teil fügen	100			
		Teil eindrehen mit Werkzeug	100			
		Teil festziehen mit Werkzeug	100			
		Hinlangen zum Werkzeug	100			
		Werkzeug greifen	0			
		Werkzeug bringen	100			
Werkzeug ablegen		0				
Normteile montieren		mit einem Werkzeug	Hinlangen zum Teil			100
	Teil greifen		100			
	Teil bringen		100			
	Teil fügen		100			
	Hinlangen zum Werkzeug		100			
	Werkzeug greifen		0			
	Werkzeug bringen		100			
	Montagefunktion ausführen		0			
	mit der Hand		Hinlangen zum Teil	100	100	15
		Teil greifen	100			
		Teil bringen	100			
		Teil fügen	100			

Tabelle 11: Anwendung in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ bei zusätzlicher Verwendung einer Bauteilkamera

4.3 Ergebnisdiskussion

Wird zu den vorhandenen Systemen der „TU-Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ zusätzlich eine Bauteilkamera eingesetzt, können 92 % der Montagetaasks erkannt werden. Beim

Einsatz des zweit gereihten Sensors, eine Bauteilwaage, können 82 % der Montagetasks erkannt werden.

Folgende Faktoren haben dazu geführt, dass trotz dieser 92 % der zweit gereihten Sensor in der Bewertung, umgesetzt wurde: Im Falle einer optischen Überprüfung müssen Kameras, mit einer sehr guten Auflösung, welche den Montagetisch durchgehend im Sichtbereich filmen, in einem Abstand von ca. 1 bis 2 m angebracht werden. Aufgrund der flexiblen Montage auf einem FTS ist dies nur mit mehreren einzelnen Kameras möglich. In vorliegendem Fall handelt es sich um drei Montagestationen, wodurch drei Kameras benötigt werden. Diese Zahl kann bei komplexen industriellen Montagewerken jedoch weitaus höher ausfallen. Durch den Einsatz von Kameras über dem Montagetisch, können seitlich bzw. von unten montierte Bauteile nicht erkannt werden. Daher müsste der Abdeckungsgrad der Montagefortschrittserkennung verringert, bzw. die Anzahl der Kameras erhöht werden. Eine Abhilfe würden Spiegelsysteme schaffen. Diese schränken allerdings die Montagefreiheit der Arbeiter ein und es wären weiterhin nur einzelne Bereiche überprüfbar. Zusätzlich benötigen Kameras, durch eine ständige Lageänderung des Druckers während der Montage, je nach Montagefortschritt einen automatischen Fokus, da sich durch den ständigen Montagefortschritt des Druckers die zu überprüfenden Merkmale in unterschiedlichen Abständen zur Kamera befinden. Zusätzlich wird eine konstante Belichtung benötigt, um Fehler in der späteren Bildverarbeitung zu vermeiden. Die Möglichkeiten, den Montagetisch zu drehen und zu verschieben, stellen weitere Komplikationen in der Montagefortschrittserkennung dar. Die Bildverarbeitungssoftware muss, trotz Rotation und Translation des Arbeitstisches die Position und das Vorhandensein eines Teils erkennen. Am Markt sind derartige Systeme (z.B.: In-Sight 2000), wie bereits im Abschnitt 2.2.1 erwähnt, verfügbar. Allerdings sind diese vor allem für Qualitätssicherungen von kleinen, gleichartigen Bauteilen, welche mit einem Fließband transportiert werden, konzipiert. Die Kosten eines derartigen Systems mit mehreren Kameras würde zudem den Budgetrahmen des Projektes überschreiten.

Vorteile der Gewichtsmessung des Bauteils:

- Gewichtsmessungen mit DMS liefern zuverlässige Ergebnisse.
- 82 % der Montagetasks der ersten Montagestation können damit erkannt werden.
- Eine Datenaufbereitung und Auswertung ist vergleichsweise einfach.
- DMS werden bereits intensiv in industriellen Überwachungsbereichen, wie beispielsweise Füllstandsmessungen, eingesetzt.
- Eine Umsetzung in ein bereits laufendes Produktions- und Montageumfeld ist ohne große bauliche Eingriffe möglich. Des Weiteren kann eine Montage auch ohne Verwendung der eingebauten Gewichtsmessung stattfinden.

- Es werden keine Sensoren auf der Kleidung eines Mitarbeiters angebracht, somit benötigt das System keine zusätzlichen Vorbereitungszeiten, außerdem ist das System Mitarbeiterunabhängig.
- Aufgrund der geringen Sensorkosten beläuft sich die Umsetzung auf lediglich 350 Euro.

5 Implementierung und Evaluierung des Sensorsystemsen

Einer der ersten Schritte der technischen Umsetzung des Konzepts, war die Auswahl der benötigten Sensoren zur Gewichtsmessung. In folgendem Kapitel wird nun, neben der Auswahl geeigneter Gewichtssensoren, auch deren technischer Einbau beschrieben. Faktoren wie exzentrische Belastungen, eingeleitete Kräfte und Überbelastungen werden im konstruktiven Einbau der Zellen mitberücksichtigt und bilden den Hauptteil des mechanischen Einbaus. In den Kapiteln 5.2 und 5.3 wird die Umwandlung des analogen Ausgangssignals in ein digitales Signal, sowie die Programmierung der Elektronik erläutert. Zuletzt wird der Prototyp mit Hilfe einer Versuchsreihe getestet, analysiert und anschließend mittels SWOT-Analyse bewertet.

5.1 Wägezellsysteme

Wie bereits im Kapitel 4.3 beschrieben, wurde aufgrund verschiedener Faktoren zugunsten einer Echtzeitgewichtsermittlung des Bauteils entschieden. Die Gewichtsmessung erfolgt mittels eines Wägezellsystems, dessen Eigenschaften im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

5.1.1 Leistungsparameter eines Wägesystems

Ein Sensorsystem besteht aus einem oder mehreren Sensoren, welche physikalische Größen in ein elektrisches Signal umwandeln, sowie nachgeschalteter Elektronik zur Signalverarbeitung (siehe Abschnitt 2.2).¹¹⁵ Bei dem umgesetzten Wägesystem handelt es sich um zwei Wäge Zellen, einer nachgeschalteten Elektronik, einem Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler) und einer Datenaufbereitung mittels einer Software.

Drei grundlegende Leistungsparameter eines Wägesystems sind Genauigkeit, Auflösung und Wiederholbarkeit. Die **Genauigkeit** kann durch Aufbringen eines genormten Prüfgewichtes ermittelt werden. Der angezeigte Wert eines Wägesystems wird mit dem Prüfgewicht verglichen und eine Abweichung beider Werte lässt Rückschlüsse auf die Genauigkeit des Systems zu. Die **Auflösung** entspricht der kleinsten messbaren Gewichtsänderung. Sie ist nicht nur von der Wägezelle abhängig, sondern auch vom AD-Wandler. Ein AD-Wandler kann meist eine Teilung der Spannung von mehreren Millionen Schritten erzielen. Aufgrund der Auflösung des Spannungssignals mittels AD-Wandler, kann nicht auf die Genauigkeit eines

¹¹⁵ vgl. Sauerer & Schütze, 2013, S. 18

Wägesystems geschlossen werden. Beispielsweise ist ein Wägesystem, welches eine Auflösung von 0,5 g besitzt, allerdings bei einer Belastung mit 1000 g einen Wert von 1005 g anzeigt. Auf die Genauigkeit des Systems kann mit der 5 g Abweichung geschlossen werden, während das System eine Auflösung von 0,5 g besitzt. Die **Wiederholbarkeit** ist ein Maß dafür, ob bei wiederholter Belastung mit dem selben Gewicht, derselbe Wert ermittelt wird. Die Wiederholbarkeit ist eine Grundvoraussetzung für die Genauigkeit eines Systems.¹¹⁶

5.1.2 Kenndaten der ausgewählten Wägezellen

In der „TU-Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ wird ein Gesamtgewicht von Montagevorrichtung und vollständig montierten Drucker von ca. 14 kg erreicht. Es wurden zwei H10A Plattformwägezellen aus Aluminium für die Gewichtsmessung gewählt. Die Nennbelastung der einzelnen Sensoren beträgt 8 kg. Durch den Einsatz von zwei parallel angeordneten Wägezellen teilt sich das, auf den Montagetisch wirkende Gewicht, bei mittlerer Belastung gleichmäßig auf beide Zellen auf und es wird eine Gesamtnennlast von 16 kg erreicht. Die Wägezellen weisen die Genauigkeitsklasse C3 auf, dies bedeutet laut OIML, dass sie bei 3000 Teilungswerten eichbar sind. Der Mindestteilungswert v_{\min} beträgt bei 8.000 g Nennlast $8.000/10.000 = 0,8$ g. Das Mindestintervall wäre somit $0,8 \times n_{LC} = 2.600$ g. Laut Tabelle 3 hat die Wägezelle bei einer Belastung von $1,6 \text{ kg} < \text{Masse} < 8 \text{ kg}$ eine maximal zulässige Fehlertoleranz von der 1,5-fachen Intervallgröße, abgemindert durch den p_{LC} -Faktor ($0,8 \times 1,5 \times 0,7 = 0,84$ g). Weitere wichtige Daten und Kennzahlen dieser Wägezelle sind in Tabelle 12 angeführt.

¹¹⁶ vgl. Mettler Toledo Inc., 2010, S. 3–2

Genauigkeitsklasse:	C3 (nach OIML R 60)
Nennlast (E_{\max}):	8 kg
Anzahl der Teilungswerte (n_{LC}):	3000
Nennkennwert (C_n):	2,0 mV/V
Kennwerttoleranz:	$\pm 0,2$ mV/V
Kennwert vom relativen Mindestteilungswert d. WZ ($Y = E_{\max} / V_{\min}$):	10.000 % von E_{\max}
Mindestteilungswert (V_{\min}):	0,01% von $E_{\max} = 0,8$ g
Grenzlast (EL):	150 % von $E_{\max} = 12$ kg
Bruchlast (E_d):	300 % von $E_{\max} = 24$ kg
Empfohlene Speisespannung (U_{ref}):	5 - 12 V
Maximal zulässige Speisespannung (BU):	15 V
Nullabgleich:	± 3 % v. C_n
Eingangswiderstand (RLC) bei Referenztemperatur:	$404 \pm 10 \Omega$
Ausgangswiderstand (RO) bei Referenztemperatur:	$350 \pm 3 \Omega$
Isolationswiderstand:	>2.000 M Ω
Kabellänge:	1 m
Nenntemperaturbereich (BT):	- 10 ... + 40 °C
Gebrauchstemperaturbereich (Btu):	- 30 ... + 70 °C
Schutzart nach (DIN 40.050 / EN 60529):	IP 65
Werkstoff:	Aluminium

Tabelle 12: Datentabelle der Wägezelle¹¹⁷

Die Grenzlast des Gesamtsystems beträgt 24 kg und die Bruchlast 48 kg bei mittlerer Belastung des Montageteiles. Zu beachten ist allerdings, dass diese Belastungen nur dann gelten, wenn sich die aufgebrachte Last auf beide Sensoren gleichmäßig aufteilt. In praktischen Anwendungen ist allerdings mit asymmetrischen, exzentrischen Belastung zu rechnen. Im folgenden Abschnitt werden daher einige Finite-Elemente-Analysen zur Berechnung der Aufstandskräfte, sowie der Belastungen der Sensoren bei exzentrisch aufgebrachten Lasten auf die Montagevorrichtung angeführt.

5.2 Technische Umsetzung

Im folgenden Kapitel wird der Einbau der Sensoren in das FTS beschrieben. In einem ersten Teil wird auf die mechanische Belastung der Bauteile, sowie auf kritische Werte für äußere Belastungen eingegangen. Der zweite Teil umfasst die Signalauswertung und Übertragung an weitere Systeme. Ziel dieses Kapitels ist, einen Überblick über die praktische Umsetzung des Systems zu geben und auf Probleme, welche währenddessen aufgetreten sind, hinzuweisen.

¹¹⁷<https://www.bosche.eu/waagenkomponenten/waagezellen/plattform-waagezellen/plattform-waagezellen-h10a>

5.2.1 Mechanischer Aufbau

Der präzise, mechanische Einbau der Sensoren ist Grundvoraussetzung für eine zuverlässige Datenermittlung. Dazu wurden an der Stelle, an welcher der Drehtisch auf dem FTS angebracht ist, verschiebbare Plastikzwischenstücke eingesetzt, welche in Schienen gelagert sind. Auf diesen Plastikteilen wird eine 2 mm Stahlplatte, welche der Waage zusätzliche Stabilität bietet, angeschraubt. Mittels Distanzstücken werden die Wägezellen aus Abschnitt 5.1.2 auf der Stahlplatte befestigt (siehe Anhang 7.1). Um eine möglichst gleichmäßige Gewichtsverteilung auf beide Wägezellen zu erwirken, werden diese gespiegelt angeordnet. Eine 3 mm starke Aluminiumplatte wird an der Oberseite der Sensoren angeschraubt und auf diese wird der Drehtisch montiert. Der genaue Aufbau ist in der Bauanleitung im Anhang unter dem Abschnitt 7.3 beschrieben. Ein Vorteil von Wägezellen ist, dass sie sehr dünn sind und daher die Montagethöhe, im Vergleich zum ursprünglichen Aufbau, lediglich um 36 mm erhöht wird.

Um Spannungen, Verbiegungen und Absenkungen der Deckplatte zu beurteilen, wurde ein numerischer Ansatz gewählt. In einer FEM-Analyse, mit der CAD-Software Catia V5 wurden verschiedene Belastungsfälle simuliert. In Abbildung 30 sind auf den Drehtisch wirkenden Kräfte abgebildet. Die Bodenplatte aus Aluminium, auf welcher die Drehtischplatte angeschraubt ist, wurde analysiert. Alle Freiheitsgrade beider Distanzstücke an den Ecken der Bodenplatte wurden gesperrt, Verbindungen zwischen Bodenplatte und Drehtisch wurden als Kontaktverbindung simuliert. Die vier Pfeile in der Mitte der Platte (a) entsprechen einer Flächenlast, welche durch den komplett aufgebauten 3D-Drucker auf den Drehtisch ausgeübt wird. Die Pfeile an der rechten Ecke (b) simulieren eine Last, welche ein Arbeiter bei einer Montage durch Druck aufbringt. Der Werkstoff der Bodenplatte und der Distanzstücke ist im Modell Aluminium, Drehtisch und Montagetisch sind aus Stahl.

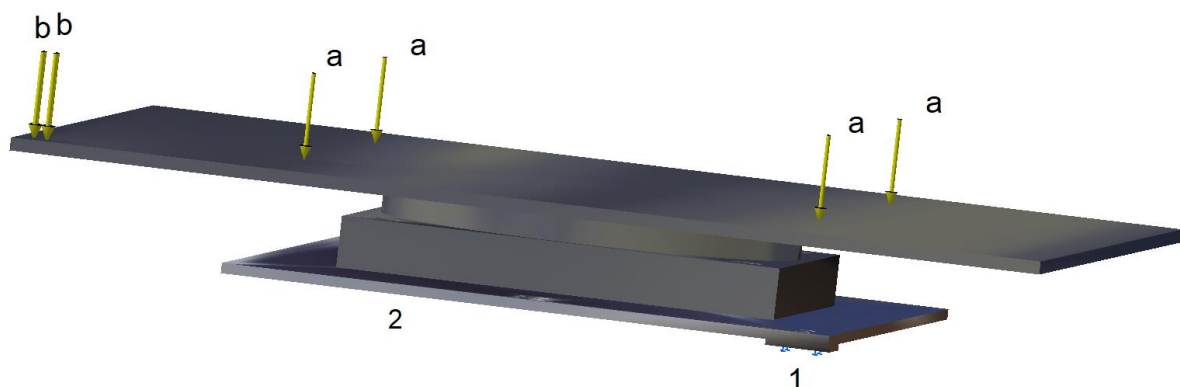


Abbildung 30: Belastung des Montagetisches mit Flächenlast (a) und exzentrischer Belastung (b)

Es wurden drei verschiedene Belastungsfälle getestet, wobei die Flächenlast auf den Montagetisch mit 140 N (Newton) konstant gehalten wurde. Diese Last entspricht dem Gewicht eines fertig montierten 3D-Druckers und dem Drehtisch (14 kg). Die Last an der Ecke (b) wurde kontinuierlich erhöht, wobei mit 15 N gestartet und anschließend die Belastung auf 71 und 242 N erhöht wurde. Gemessen wurden die Auflagekräfte auf beiden Distanzstücken, da diese den Belastungen der Sensoren entsprechen. Die Kräfte wurden so gewählt, dass bei Belastungen an den Positionen der Sensoren spezifische Belastungen aus dem Sensordatenblatt erreicht werden.

Belastungsfall		Einspannpunkt 1 (vertikale Kraft)	Einspannpunkt 2 (vertikale Kraft)
Eckenlast	Flächenlast		
15 N	140 N	80,5 N	74,5 N
71 N	140 N	119 N	91 N
241 N	140 N	240 N	141 N

Tabelle 13: Belastungen der Sensoren

In folgendem Abschnitt wird kurz auf die Auswahl der mechanischen Bauteile anhand FEM-Berechnungen eingegangen. In Tabelle 13 sind die Ergebnisse einer FE-Analyse dargestellt. Der kritische Einspannpunkt ist in dieser Belastungssimulation der Einspannpunkt 1. Er ist in Abbildung 30 im Vordergrund (1) abgebildet und mit blauen Dreiecken unterlegt. An den Einspannungen befinden sich in späterer Folge die Sensoren, welche die Belastungen aufnehmen. Die Abweichung beider Kräfte an Einspannpunkt 1 und 2 ist dadurch bedingt, dass durch Eckbelastung der Gesamtschwerpunkt in Richtung des Einspannpunktes (1) verschoben wird, wodurch dieser einen größeren Teil der Kraft aufnimmt. Bei einer Eckenlast von 1,5 kg wird bei dem kritischen Sensor (1) eine Belastung von 80,5 N gemessen (siehe Tabelle 13). Diese Belastung entspricht 8 kg und ist die Nennlast des Sensors. Wird die Eckenlast auf 71 N erhöht, ca. 7 kg entsprechend, wird am Einspannpunkt (1) eine vertikale Aufstandskraft von ca. 120 N gemessen. Diese Belastung entspricht der maximal zulässigen Belastung des Sensors. Bei einer Eckbelastung mit 240 N erreicht die Aufstandskraft am Einspannpunkt (1) eine Grenzbelastung von 24 kg, bei welcher eine plastische Verformung der Wägezelle stattfindet und somit ein dauerhafter Schaden der Wägezelle entstehen würde.

Die Deckplatte wurde aus einer 3 mm Aluminiumplatte gefertigt, da sie im Vergleich zu einer Stahlplatte zwar eine wesentlich höhere Durchbiegung bei hoher Belastung besitzt, allerdings nur ca. ein Drittel des Gewichts einer Stahlplatte erreicht. Ein weiterer Vorteil einer Aluminiumplatte ist, dass bei einer zu großen Belastung (über 20 kg Eckbelastung) die Durchbiegung dazu führt, dass die Platte auf dem Sensor selbst aufliegt. Somit wird das Biegemoment in Grenzbelastungen verringert und der Sensor wird vor dauerhafter Beschädigung geschützt.

Während der Testphase hat, bei größeren und wiederholten Belastungen, die Ausgangsspannung und damit auch das angezeigte Gewicht um mehrere Gramm variiert. Aufgrund der hohen Sensibilität der Sensoren muss daher darauf geachtet werden, dass sich die Wägezellen in einer waagrechten Position und parallel zueinander befinden. Um dies zu erreichen, wurde eine zwei Millimeter dicke Stahlplatte als Untergrund verwendet. Sie sorgt dafür, dass beide Wägezellen dasselbe Torsionsmoment aufnehmen und den selben Winkel gegenüber dem Unterbau des FTS besitzen.

Die Wägezellen reagieren sensibel auf Belastungen, welche nicht vertikalen Soll-Belastungen entsprechen. Werden die Wägezellen seitlich belastet entsteht, aufgrund der Platten zwischen welchen sie eingespannt sind, eine innere Spannung im System, sodass eine Gewichtschwankung von $\pm 0,5$ g, unabhängig der normalen Belastung der Sensoren, entstehen kann. Eine seitliche Belastung entsteht vor allem durch Rotation des Drehtisches, welche die Erzeugung eines Moments benötigt. Die aufgebrachte Kraft, um den Drehtisch zu drehen wird direkt über die Wägezellen auf den Unterbau übertragen. Beide Platten verschieben sich dadurch kurzfristig gegen einander und nach der Belastung bleiben innere Spannungen in den Platten und Sensoren erhalten. Zu vermeiden wäre dieses Problem bei Verwendung lediglich einer zentral montierten Wägezelle. Sie müsste genau mittig des Montagetisches fixiert werden. Dadurch würde die Zelle zwar höheren Torsionskräften ausgesetzt sein und müsste größer dimensioniert werden, allerdings gäbe es keine inneren Verspannungskräfte.

Die Variante mit zwei Sensoren wurde gewählt, da die Stabilität des Montagetisches gewährleistet sein muss, die Auflösung von zwei Zellen doppelt so hoch ist wie die einer einzelnen, die Fixierelemente der Wägezellen (Führungsschlitten) geringer mechanisch belastet werden und die Abmessungen der kleineren Wägezellen eine geringere Erhöhung des Montagetisches bedeuten. In Abbildung 31 ist die Waage mit Boden- und Deckplatte dargestellt. Die Pfeile auf den Wägezellen zeigen die Richtung der Kraftaufbringung an.



Abbildung 31: Ansicht der Waage von vorne

In Abbildung 32 sind die zusammengebaute Waage, Kabelführung der Wägezelle, sowie die Schlitten zu sehen.

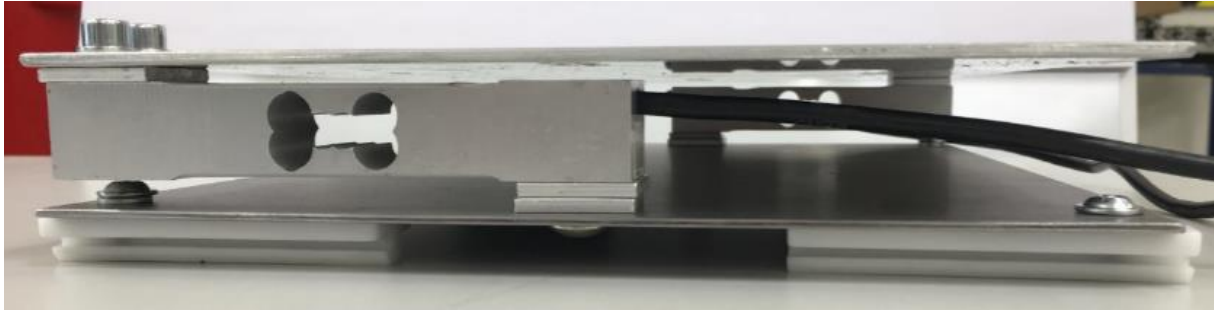


Abbildung 32: Ansicht der Waage von der Seite

5.2.2 Elektrotechnischer Aufbau

Die beiden Wägezellen sind baugleich und bestehen aus einer Brückenschaltung mit vier Ausgängen, wie in Abbildung 33 dargestellt. Auf das Prinzip einer Messbrückenschaltung wurde bereits im Abschnitt 2.2.3 eingegangen. In diesem Fall ist, wie bereits erläutert, eine Vollbrückenschaltung zum Einsatz kommen.

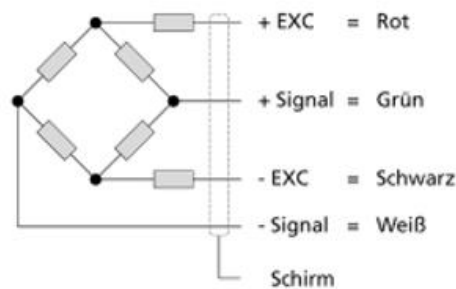


Abbildung 33: Schaltplan der Wägezelle

Die Spannung zwischen grünem und weißem Draht entspricht der Ausgangsspannung, während rot und schwarz der Versorgungsspannung entsprechen. Bei der umgesetzten Schaltung wird der +EXC Eingang mit +5 V (Volt) versorgt und der -EXC wird mit der Masse verbunden. Der Schirm wird ebenfalls mit der Masse verbunden, um das Signalrauschen zu minimieren.

Bei der Signalauswertungselektronik wurde jeweils ein ADS1232REF verwendet (siehe Abbildung 34), ein 24-Bit AD Wandler von Texas Instruments.

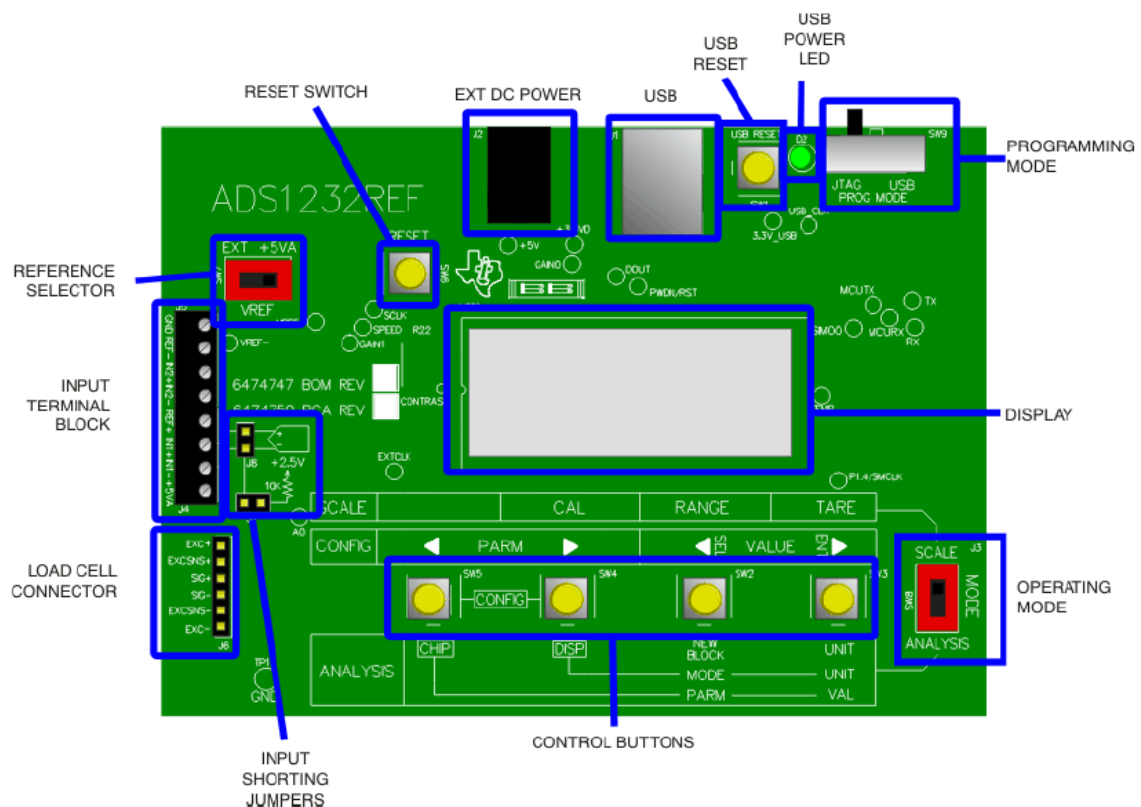


Abbildung 34: ADS1232REF AD-Wandler von Texas Instruments¹¹⁸

Der Vorteil dieses Wandlers gegenüber eines gängigen AD-Wandlers ist, dass er sehr präzise ist und verschiedene Filter vorgeschaltet hat, um ein möglichst genaue Signalauswertung zu erzielen. Das Rauschen wird minimiert und eine Digitalanzeige auf der Platine ermöglicht eine schnelle Signalanalyse ohne zusätzlichen PC. Der AD-Wandler wurde speziell für Signalauswertungen von Wägezellen entwickelt und besitzt eine Tarierfunktion, sowie eine Kalibriermöglichkeit mit Hilfe von Knöpfen direkt auf der Platine. Des Weiteren stellt Texas Instrument eine Software zur Verfügung, welche Sensorausgangsspannungen in Gewichtsdaten umrechnet und in ein grafisches Interface überträgt, wie in Abbildung 35 ersichtlich.

¹¹⁸ Texas Instruments, 2011, S. 3

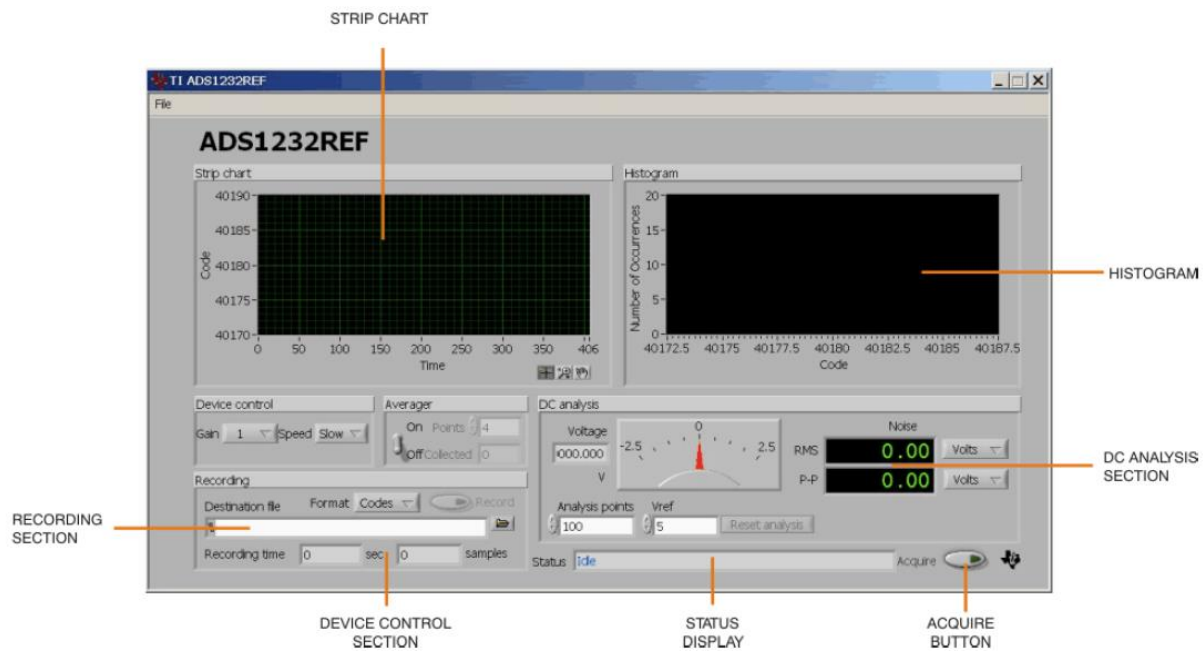


Abbildung 35: Grafisches Interface für den ADS1232REF

Die Energieversorgung des AD-Wandlers funktioniert entweder über eine 9 V Batterie oder über einen Rundstecker mit einer Versorgungsspannung zwischen 6-9 V. Der AD-Wandler regelt die Spannung auf 5 V herunter. Nachdem die Stromversorgung mit einer 9 V Batterie ca. 20 Stunden hält, ist eine Versorgung über den Rundstecker unumgänglich, um einen durchgehenden Betrieb in einer Montagelinie zu gewährleisten. Zum einen bietet sich eine Energieversorgung über die Autobatterien, mit welchen das FTS versorgt wird an, zum anderen eine Versorgung über den Bordcomputer des FTS. Der Nachteil einer Versorgung über die Autobatterien ist der Eingriff in ein teures industrielles Gerät und der damit verbundene Verlust der Herstellergarantien. Der Bordcomputer wiederum bietet eine Energieversorgungsmöglichkeit über USB Ausgänge. Diese Variante wird umgesetzt, da die Leistung eines USB Ausgangs gegenüber der Leistung einer Autobatterie vergleichsweise gering ist. Die USB Ausgänge ermöglichen eine 5 V Spannungsversorgung für angeschlossene Geräte. Für eine volle Funktionsfähigkeit der AD-Wandler wird eine minimale Spannungsversorgung von 6 V benötigt, somit muss ein Up-Converter zwischengeschaltet werden. Dazu wurde ein „DROK LM2577 Boost-Spannungsregler Step Up Stromwandler“ zwischen den USB-Stecker und die Platinenversorgungsstecker eingebaut. Ein weiterer Vorteil einer Versorgung über einen USB-Port ist die Möglichkeit andere Netzteile, wie beispielsweise Handyladesysteme oder eine Powerbank mit einer Ausgangsspannung von je 5 V zu verwenden. Um Schwankungen der Versorgungsspannung zu minimieren wird ein „Spannungsregler - Linear, Typ78 STMicroelectronics L7809CV TO-220AB Positiv Fest 9 V 1.5 A“ vor den „Step Up Stromwandler“ mit einem 23 Ohm Widerstand (R1) und drei Kapazitäten (C1, C2, C3) laut Abbildung 36 eingebaut. Der Hersteller des L7809CV empfiehlt für die Kapazitäten C1 und C2 einen gemeinsamen Wert von 330

nF (Nanofarad) und C3 100 nF¹¹⁹. Aus Kostengründen wurden, für C1 und C2 nur 320 nF eingebaut, wodurch allerdings kein Nachteil entsteht.

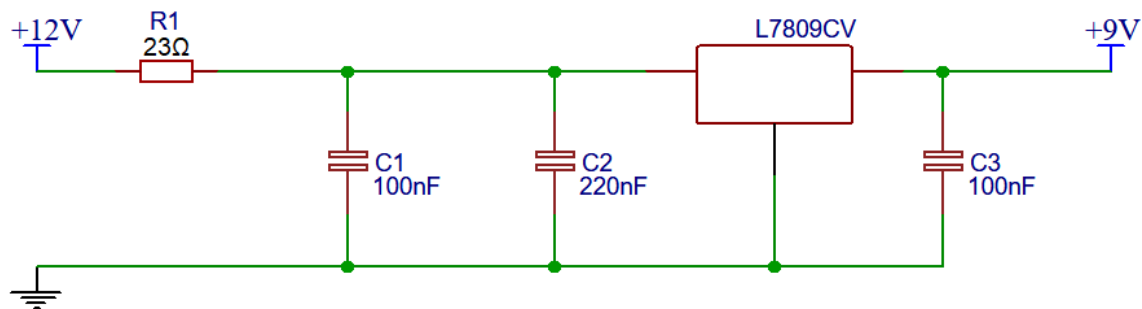


Abbildung 36: Umgesetzter Schaltplan des Spannungsreglers

Um Werte der Ausgangsspannung auslesen zu können, werden Signale des AD-Wandlers mit Hilfe gängiger Programmiersprachen in verwendbare Daten übersetzt. Ein Nachteil des AD-Wandlers von Texas Instruments ist, dass der eingebaute Treiberchip nur von einem Windows Betriebssystem erkannt wird. Der Treiber ist dafür zuständig, dass der USB-Port als Serial-Port erkannt wird, was wiederum Voraussetzung ist, um ihn über eine Programmiersprache anzusprechen. Weder der FTS-Computer noch PCs wie beispielsweise ein Raspberry Pi besitzen ein Windows Betriebssystem und sind daher nicht kompatibel mit dem Treiberchip. Um dieses Problem zu umgehen, wurde der Treiberchip mit einem Serial-USB Ausgang, welcher Linuxkompatibel ist, kurzgeschlossen. Bei letzterem handelt es sich um einen "FTDI Adapter FT232RL USB zu TTL Serial für 3,3 V und 5 V". Er besitzt sechs Eingänge und einen USB Ausgang. Der Masse-Eingang wird mit einer Masse des AD-Wandlers verbunden (siehe Abbildung 37, grün). Der VCC Anschluss ist zuständig für die Energieversorgung des Serial USB Adapters und ist in Abbildung 37 gelb dargestellt. Als Versorgungsspannung wurde ein 3,3 V Ausgang des AD-Wandlers verwendet. Ursprünglich wurde er für die Energieversorgung des USB-Ports des AD-Wandlers eingesetzt. Der Tx (transmit) Ausgang des Serial-USB wurde mit dem Rx (recive) Eingang des Wandlers (Testpunkt 16) verbunden. In Abbildung 37 ist diese Verbindung in rot dargestellt. Der Rx Eingang des Serial-USB wurde mit dem Tx Ausgang des Wandlers verbunden (in blau dargestellt).

¹¹⁹ vgl. STMicroelectronics, 2013, S. 7

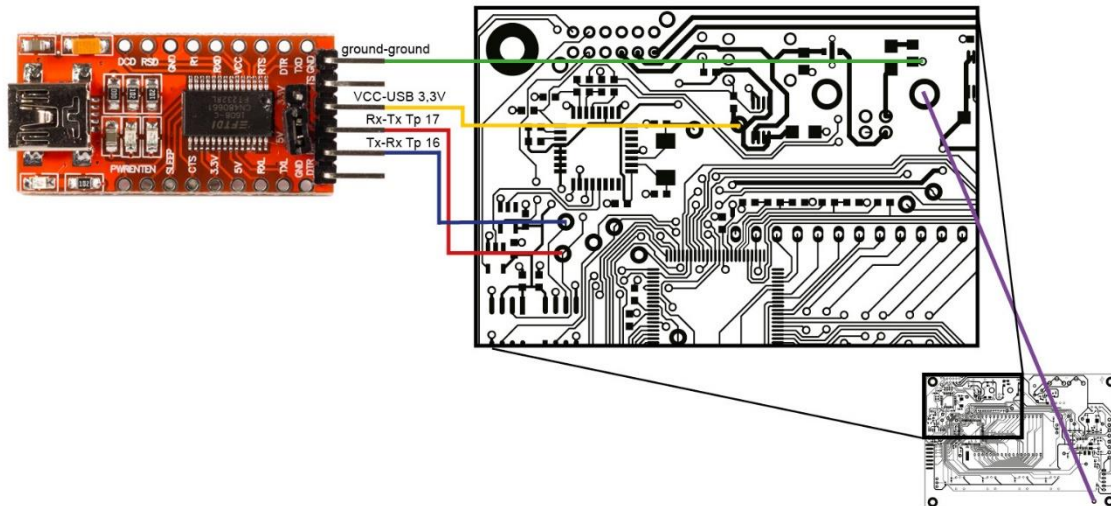


Abbildung 37: Schaltplan des Serial-USB und des Ad-Wandlers

Im Anhang 7.2 befinden sich vergrößerte Bilder der Schaltungen (siehe Abbildung 41).

Eine weitere Veränderung der Elektronik bestand darin, beide Massen zu verbinden (lila ground-ground Verbindung). Grund dafür war ein auftretender Fehler, welcher durch Positionierung von Metallteilen auf den eingebauten Sensoren, zu einem Neustart der Elektronik geführt hat. Vermutlich lag das Problem an einer Potentialdifferenz, welche durch den Ausgleich, mittels einer direkten Verbindung, behoben wurde. Zusätzlich wurde bei späterer Programmierung darauf geachtet Störimpulse aus den Daten zu filtern. Der Grund für die Verwendung zwei verschiedener Massen auf einer Platine geht aus dem Datenblatt von Texas Instruments nicht hervor. Eine Vermutung ist, dass die Platine aus mehreren, bereits fertigen Komponenten gefertigt wurde. Eine Masse dient als Referenz für die Signalauswertung inklusive dem AD-Wandler Chip, die andere für den Treiberchip der USB-Schnittstelle und den Prozessor. In Abbildung 38 ist zusammenfassend ein Schaltbild des kompletten Aufbaus dargestellt.

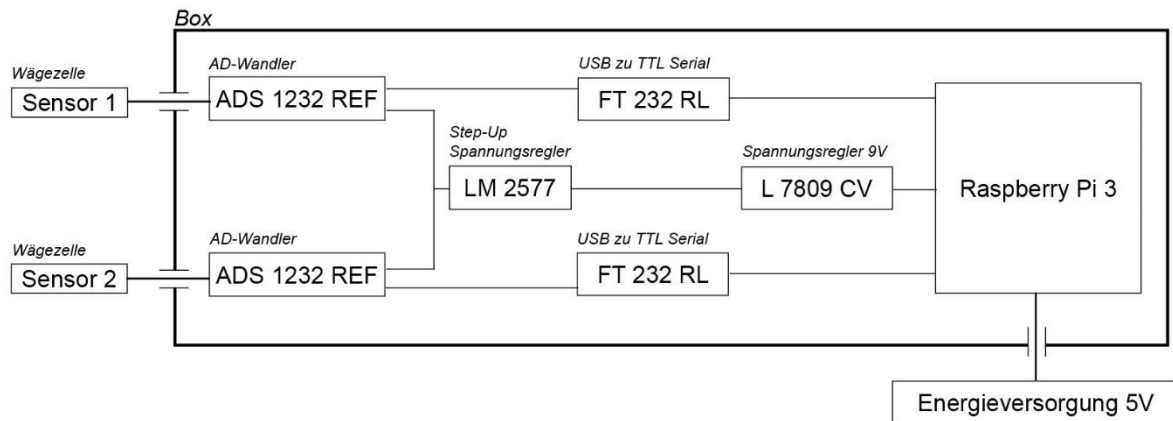


Abbildung 38: Schaltbild des umgesetzten Wägezellensystem

5.3 Programmierung der Sensoren

Nachdem die Platinen des AD-Wandler in späterer Folge in die Elektronik des FTS integriert wurden, konnten die Steuerknöpfe, welche in Abbildung 34 in gelb dargestellt sind, nicht mehr manuell betätigt werden. Diese sind zur Steuerung des AD-Wandlers unabdinglich. Der Hersteller hat daher, neben der bereits erwähnten Steuerung über Knöpfe und Software, dem Benutzer auch eine Möglichkeit gegeben den AD-Wandler mittels Befehlen über den Serial Port zu steuern.

COMMAND	FORMAT	OPERATION
P	P [0-3]	Set PGA
R	R [F,S]	Set data rate
K	K	Perform offset calibration
V	V	Show firmware version
S	S	Start streaming
D	D	Read data once
C	C	Set input channel
Q	Q	Query parameters

Tabelle 14: Befehle zur Ansteuerung des AD-Wandler¹²⁰

Empfangene Daten müssen umgewandelt werden, um eine genaue Gewichtsanzeige in Gramm zu erhalten.

Beide verwendeten Sensoren haben eine lineare Kennlinie, dies bedeutet, dass die Ausgangsspannung proportional zur Belastung der DMS ist. Diese Ausgangsspannung wird vom 24Bit AD-Wandler in 2^{24} Teile aufgelöst und jedem

¹²⁰ Texas Instruments, 2011, S. 12

Spannungswert wird eine Zahl zugewiesen. Letzterer befindet sich aufgrund der 24Bit Auflösung zwischen 1 und 16.777.216 und wird als hexadezimal String an den Serial Port gesendet. In Python wird der String in ein integer umgewandelt, um anschließend damit weiterarbeiten zu können (siehe Anhang 7.4 `ascii2int`).

Um die Steigungen der Kennlinien beider Sensoren zu ermitteln wird ein Referenzgewicht mit bekannter Masse (r) auf die Sensoren aufgebracht. Anschließend wird der Wert des Referenzgewichtes durch die Differenz der Werte bei Belastung der Zellen mit dem Referenzgewicht (p) und im unbelasteten Zustand (u) dividiert (siehe Formel 2). Dieser Wert entspricht der minimalen Gewichtsänderung, welche der Auflösung des AD-Wandlers entspricht.

$$m_1 = \frac{r_1}{p_1 - u_{11}}$$

Formel 2: Kalibrationskonstante des Sensors 1

Wird ein Gewicht auf einen Sensor aufgebracht, wird nach Formel 3 das Gewicht ermittelt. Der abgezogene Faktor $m_1 \times u_1$ entspricht dem Offset. Der Wert von u_1 wird in späterer Folge bei jedem neuen Trieren der Waage angepasst.

$$\text{Gewicht}_1 = m_1 \times \text{Sensordaten}_1 - m_1 \times u_1$$

Formel 3: Gewichtsumrechnung Sensor 1

Die Teile- und Gewichtlisten (siehe Tabelle 15) wurden im Vorhinein ermittelt, um Gewichte einzelner Montageaufgaben (siehe Tabelle 16) zu errechnen.

Drehtischvorrichtung	4.851,00
Schraube M5x25	6,25
Linsenkopfschraube M6x8	3,15
Linsenkopfschraube M6x16	4,00
Beilagscheibe 6 mm	0,84
Unterer Rahmen 1 (4 Löcher abgeschrägt)	275,70
Unterer Rahmen 2 (Ein- und Ausschalter)	321,20
Unterer Rahmen 3 (Stecker)	269,70
Steher	290,40
Stellfuß	26,60
Winkel	37,10
Motor x	446,80
Motor y	444,30
Motor z	428,50
Umlenkrolle x, y	51,00
Führungsstange mit Lagerschlitten	260,00
Extruderschlitten	858,00
Führungsstange	151,00
Lagerhülse	0,00
Rahmen Oben (Pos 5)	272,00
Umlenkrolle z	31,00
Bettmodul	1.486,00
Rahmen Oben (Pos 7)	275,00
Mutter M6	2,15
Schalter	5,90
Stecker	14,3
Schrauben für Stecker	0,7
Werkzeug:	
Akkuschrauber	2.074,00

Tabelle 15: Komponenten des 3D-Druckers und entsprechende Gewichte

Beschreibung	Anzahl (Stück)	Gewicht pro Stück (g)	Gesamtgewicht (g)
Drehtischvorrichtung	1	4.851,00	4.851,00
Schraube M5x25 mm	4	6,25	25,00
Beilagscheibe 6 mm	4	0,84	3,36
OFFSET			4.879,36
Erster Arbeitsschritt			
Unterer Rahmen 1 (4 Löcher abgeschrägt)	2	275,70	551,40
Unterer Rahmen 2 (Ein- und Ausschalter)	1	321,20	321,20
Unterer Rahmen 3 (Stecker)	1	269,70	269,70
Stecker	1	14,30	14,30
Schalter	1	5,90	5,90
Schraube für Stecker	2	0,70	1,40
SUMME:			1.163,90
Zweiter Arbeitsschritt			
Steher	4	290,40	1.161,60
Linsenflachkopfschraube M6x8 mm	8	3,15	25,20
SUMME:			1.186,80
Dritter Arbeitsschritt			
Stellfüße	4	26,60	106,40
SUMME:			106,40
Vierter Arbeitsschritt			
Winkel	1	37,10	37,10
Flachkopfschrauben M6x16 mm	1	4,00	4,00
Motor x-Achse	1	446,80	446,80
SUMME:			487,90
Fünfter Arbeitsschritt			
Winkel	1	37,10	37,10
Flachkopfschrauben M6x16 mm	1	4,00	4,00
Motor y-Achse	1	446,80	446,80
SUMME:			487,90
Sechster Arbeitsschritt:			
Linsenkopfschraube M6x8 mm	2	3,15	6,30
Motor z-Achse	1	446,80	446,80
SUMME:			453,10
MONTAGESTATION 1 Endsumme			3.886,00

Tabelle 16: Gewichtstabelle der Arbeitsschritte der ersten Montagestation

Ein Python Skript zur Auswertung und Speicherung der Sensordaten wird beim Hochfahren eines Raspberry Pi 3 automatisch gestartet. Des Weiteren besitzt ein Raspberry Pi 3 die Möglichkeit Daten über W-Lan oder Ethernet an andere Systeme weiterzuleiten oder zu empfangen. Dies ermöglicht eine Weiterleitung des Montagefortschrittes an weitere Betriebsmittel in der Produktion. Im folgenden Absatz wird näher auf das Skript und die Datenanalyse eingegangen.

Bei Start des Skripts wird, um von den AD-Wandlern Daten zu erhalten, an beide ein 's' gesendet. Der Buchstabe 's' steht für stream und ist der Befehl für den AD-Wandler, analoge Daten der Sensoren in digitale umzuwandeln und diese fortlaufend an die USB-Ports zu senden. Vier eingehende Daten der jeweiligen Sensoren werden durch das Python Skript gemittelt, um eine Glättung der Werte zu erreichen. Diese Werte werden in ein Gewicht umgerechnet (siehe Formel 3) und addiert, wodurch sich das Gesamtgewicht des Montagetisches errechnet. In den ersten 10 Sekunden werden die gesendeten Daten gespeichert, gemittelt und der gemittelte Wert wird verwendet, um die Waage auf Null zu tarieren. Hierzu wird der, über die Zeit gemittelte Wert, als neuer u_1 - bzw. u_2 -Wert gesetzt. Dieses Vorgehen ermöglicht einen Offsetfehler bei längerem Stillstand des FTS zu eliminieren. Wurden beispielsweise zusätzliche Bauteile für die Befestigung der Drehtischvorrichtung angebracht, werden diese in zukünftigen Montageschritten nicht berücksichtigt, um eine exakte Fortschrittserkennung zu gewährleisten.

Anschließend wird das gemessene Gewicht mit einem Sollgewicht, welches in einer txt-Datei gespeichert ist, verglichen. Hierzu muss vorher eine Datei mit den Gewichten einzelner Arbeitsschritte angelegt werden. Sie wird Zeile für Zeile ausgelesen, wobei beim Erstellen der Datei darauf geachtet werden muss, dass in jeder Zeile nur eine Zahl steht. Erreicht das gemessene Gesamtgewicht im Mittel (drei Werte) den Soll-Wert, wird die nächste Zeile des Files ausgelesen und dieser Wert als neuer Soll-Wert gesetzt. Gleichzeitig wird ein Erreichen des ersten Montageschrittes ausgegeben und das Gewicht der Waage auf Null gesetzt, um kumulierende Fehler in der Gewichtsmessung zu verringern. Bei dem bereits angesprochenen Soll-Ist-Wertevergleich wird ein Fehler von $\pm 2,5$ g toleriert und der Ist-Wert erst akzeptiert, wenn eine Gewichtsschwankung der letzten drei Gewichtsmittelungen 0,3 g nicht überschreitet. Diese Zusatzbedingung führt dazu, dass kein Fehler entstehen kann, wenn der Montagemitarbeiter Druck auf den Montagetisch ausübt und dieser zufällig einen Soll-Wert erreicht. Der Druck müsste auf 0,3 g genau über eine bestimmte Zeit gehalten werden. Während den Messungen ist dieser Fall nicht aufgetreten und selbst ein Versuch diesen Fehler zu erzwingen ist nicht gelungen.

Der Raspberry Pi, sowie die zwei AD- Wandler wurden in einer Plastikbox verbaut und auf der Unterseite der Stahlplatte fixiert. Die Box besitzt zwei Kabelausgänge zu den beiden Sensoren und einen USB Eingang für die Energieversorgung der Elektronik.

5.4 Evaluierung: Durchführung einer Testreihe

Zur Evaluierung der Waage wurde eine Testreihe in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ durchgeführt. Die Montagetätigkeit wurde an einem Tag, von einem Probanden durchgeführt. Es handelt sich um eine Testreihe mit 17 Montagevorgängen, bei

welchen alle Montageschritte der ersten Montagestation durchgeführt wurden. Der Montagetisch wurde während der Montagedurchführungen sowohl translatorisch, als auch rotatorisch bewegt.

Die Wägezellen sind gegenüber horizontaler Schräglagen nicht kompensiert. Um sicher zu stellen, dass auch in unebenen Montagehallen ein exaktes Gewichtsmessergebnis zustande kommt, müsste zusätzlich zu der Gewichtsmessung auch der Auslenkungswinkel des Gewichtssensors gegenüber dem Boden ermittelt und rechnerisch berücksichtigt werden. In der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ ist der Boden eben und somit werden die Resultate nicht durch diese Störgröße beeinflusst.

5.4.1 Versuchsbeschreibung

Derzeit findet noch keine Serienfertigung in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ statt, wodurch das Gewicht der Einzelteile von Drucker zu Drucker um mehrere Gramm variiert. Dieser Umstand ist einerseits dadurch bedingt, dass einige Teile aus Eigenfertigung kommen und es derzeit noch keine genormten Abmessungen gibt, andererseits entstehen durch die interne Fertigung in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ Gewichtsschwankungen durch Fertigungstoleranzen. Zurzeit haben diese leichten Gewichtsunterschiede gleicher Teile keinen relevanten Montagenachteil, in Zukunft werden jedoch alle Teile ein präziseres Gewicht und genauere Abmessungen aufweisen. Um zu testen, ob eine Montagefortschrittserkennung mittels Gewichtsmessung stattfinden kann, müssen verbaute Teile ein bekanntes Gewicht aufweisen. Um dies zu gewährleisten wurden alle Teile vor dem Versuch abgewogen und das Gewicht der Teile eines Arbeitsschrittes summiert. Zudem wurde der Drucker nach jedem Aufbau wieder in seine Einzelteile zerlegt und nochmals montiert.

Bei den Einzelteilen handelt es sich unter anderen um drei Motorbaugruppen, welche jeweils aus Motor und Kabelstrang bestehen. Letzterer liegt bei der Montage auf der Deckplatte auf. In diesem Fall ist die Gewichtsmessung unbeeinflusst, da die Wägezellen diesen Bereich abdecken. In einigen Fällen kann es dazu kommen, dass ein Kabelstrang darunter auf den Führungsschienen aufliegt, wodurch die Gewichtsmessung beeinflusst wird, da die Wägezellen lediglich das Gewicht über der Deckplatte messen. Für eine Verwendung von Gewichtssensoren muss sichergestellt werden, dass diese Motorkabeln immer oberhalb der Deckplatte zum Aufliegen kommen. Dies kann durch Kürzen oder Zusammenbinden der Kabel erfolgen.

Da die Auflösung des Wägesystems begrenzt ist, wurden die aufgenommenen Werte auf eine Komastelle gerundet.

5.4.2 Ergebnisse

In der Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Testreihe dargestellt. Die sechs Schritte entsprechen den sechs Arbeitsschritten der ersten Montagestation. Die Informationen in der zweiten Spalte beziehen sich auf die Orientierung des Mitarbeiters während der Montage. Die klassische Montage des Druckers erfolgt von vorne, selten passiert es, dass unerfahrene Montagearbeiter den Drehtisch nicht verwenden und um den Montagetisch gehen um Teile zu montieren. Für diesen Fall wurden neben der Montage von vorne auch noch seitliche und Montagearbeiten von der Rückseite durchgeführt. Die Zahlen entsprechen dem gemessenen Gewicht in Gramm nach jeweiliger Beendigung eines Arbeitsschrittes. Die Farbabstufung erfolgt von hellem gelb (Werte nahe dem Mittelwert des Arbeitsschrittes) bis zu dunkelrot (Werte die 1,5 g vom Mittel abweichen). Wurde nach Beendigung des Arbeitsschrittes das Gewicht innerhalb eines Intervalls von $\pm 2,5$ g erreicht und gleichzeitig das Gewicht über mehrere Werte mit einer geringeren Schwankung als 0,3 g gehalten, setzt das Programm die Waage automatisch auf Null. In folgender Tabelle wurden diese Voraussetzungen ausnahmslos erreicht, unter der Berücksichtigung, dass keine Kabeln unter dem Drehtisch aufliegen.

Versuch	Montage	Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4	Schritt 5	Schritt 6
1	von hinten	1164,4	1213,1	105,4	489,5	486,3	435,9
2		1164,2	1213,3	105,7	489,3	486,3	435,6
3		1164,4	1213,5	105,5	489,6	484,9	437,3
4		1164	1213	105,5	489,4	484,9	436
5	von vorne	1163,9	1212,9	105,3	488,8	486,6	436,4
6		1163,9	1213,1	105,1	488,6	486,8	436,5
7		1163,5	1212,6	105,3	488,8	487	436,4
8		1164	1212,7	105,6	488,4	486,6	436,3
9		1163,8	1213,2	105,8	488,4	486,8	436,2
10		1163,8	1212,9	105,4	488,9	485,9	436,8
11		1163,8	1212,7	105,3	488,7	486,8	436,5
12		1164	1212,8	105,6	488,4	486,8	436,2
13		1163,8	1212,6	105,4	488,6	486,2	437,1
14		1164,1	1212,8	105,4	488,7	486,9	436,1
15		1164	1212,8	105,3	488,7	486,6	436,2
16		1164	1212,8	105,3	488,6	486,9	436,3
17	von der Seite	1164	1212,8	105,4	489,4	485,7	436

Tabelle 17: Testreihe (in Gramm)

In Tabelle 18 sind Kennwerte der einzelnen Arbeitsschritte aufgelistet. Der Mittelwert gibt Aufschluss über das durchschnittlich gemessene Gewicht einzelner Arbeitsschritte.

Montage von vorne	MITTELWERT	1163,88	1212,83	105,40	488,63	486,66	436,42
	kleinster Wert	1163,50	1212,60	105,10	488,40	485,90	436,10
	größter Wert	1164,10	1213,20	105,80	488,90	487,00	437,10
	Differenz	0,60	0,60	0,70	0,50	1,10	1,00

Montage von vorne und von der Seite	MITTELWERT	1163,89	1212,82	105,40	488,69	486,58	436,38
	kleinster Wert	1163,50	1212,60	105,10	488,40	485,70	436,00
	größter Wert	1164,10	1213,20	105,80	489,40	487,00	437,10
	Differenz	0,60	0,60	0,70	1,00	1,30	1,10

Montage von allen Seiten	MITTELWERT	1163,98	1212,92	105,43	488,87	486,35	436,34
	kleinster Wert	1163,50	1212,60	105,10	488,40	484,90	435,60
	größter Wert	1164,40	1213,50	105,80	489,60	487,00	437,30
	Differenz	0,90	0,90	0,70	1,20	2,10	1,70

Tabelle 18: Kennzahlen der Montagearten (in Gramm)

Die Ergebnisse beginnen bei den Montageschritten vier, fünf und sechs stärker vom Idealwert abzuweichen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass es sich bei den erwähnten Montageschritten um eine exzentrische Befestigung von Teilen handelt. Die Sensoren werden unterschiedlich belastet, und der Schwerpunkt der aufgebrachten Massen befindet sich außerhalb der vom Hersteller empfohlenen 15 cm vom Auflagepunkt des Sensors. Bei dem Fehler bedingt durch Rotation des Drehtisches hat sich herausgestellt, dass in allen Fällen das Gewichtsintervall von $\pm 1,5$ g eingehalten wird.

5.5 Diskussion der Ergebnisse

Aufgrund der bereits erwähnten Ungenauigkeiten kann das Gewicht lediglich auf $\pm 1,5$ g genau gemessen werden. Zusätzlich muss eine Gewichtsschwankung des Mittelwerts gegenüber dem realen Gewicht der Teile berücksichtigt werden. In der txt.-Datei entsprechen die Gewichtsdaten der Arbeitsschritte nicht exakt dem Mittelwert der Datenreihe, wodurch ebenfalls eine zusätzliche Toleranz miteinberechnet werden muss. Somit wird das Toleranzintervall der Waage auf $\pm 2,5$ g gesetzt. Dies ermöglicht eine Überprüfung auf Schrauben und Teile über 5 g. Da allerdings auch Beilegscheiben mit 0,6 g verbaut werden, kann keinerlei Aussage über deren Einbau gegeben werden. Um diese Teile zu erfassen, müssten empfindlichere Wägezellen und gleichzeitig ein präzise gefertigter Schlitten mit gleitenden Schienen verwendet werden.

Wie bereits beschrieben, tariert sich die Waage nach jedem Arbeitsschritt auf Null. Dies bedeutet, dass das aktuelle Gewicht als neuer Nullwert angenommen wird. Als

logische Konsequenz aufgrund der $\pm 2,5$ g Toleranz, ist eine Gewichtsbeschränkung des letzten Teiles eines Arbeitspakets auf mindestens 5 g notwendig. Beispielsweise wird eine Schraube mit 1 g, welche als letztes Teil eines Arbeitspakets verschraubt wird, aufgrund der Toleranz nicht erkannt. Das Programm schließt aufgrund des Gewichts innerhalb des Toleranzbereichs auf einen erledigten Arbeitsschritt, setzt den Wert auf Null und gibt dadurch den nächsten Arbeitsschritt frei. Der Arbeiter schraubt die Schraube ein, das Gewicht zählt allerdings zum nächsten Arbeitsschritt und dies kann im schlimmsten Fall dazu führen, dass eine positive Absolvierung des nächsten Arbeitsschrittes nicht erkannt wird.

5.6 Conclusio

Nach erfolgreicher Umsetzung und Analyse der Gewichtsmessung stellt sich nicht nur heraus, dass diese Art der Montagefortschrittserkennung sehr präzise ist, sondern auch zur Qualitätssicherung in frühen Stadien der Produktion dienen kann.

Während der Durchführung der Testreihe wurde der 3D-Drucker aufgrund Teile ähnlichen Gewichts und Aussehens öfters falsch zusammengebaut. Die Gewichtsmessung hat dabei geholfen, alle Montagefehler durch falsche Teile zu erkennen. Um genauere Angaben über die Qualität und die Fehlerrate der Waage geben zu können, müssen größere Testreihen durchgeführt werden. Auch die Wiederholbarkeit bei Einsätzen über mehrere Stunden muss analysiert werden und könnte Thema zukünftiger Arbeiten sein.

Der Einsatz einer einzigen stärker dimensionierten Wägezelle würde die Genauigkeit des Systems erhöhen allerdings hätte dies Einbußen in der Auflösung zur Folge. Fehler werden minimiert, welche durch Gewichts aufteilung auf mehrere Sensoren, Verspannungen im System und exzentrische Belastungen entstehen. Der höhere Preis einer einzelnen, qualitativen Wägezelle würde durch den Entfall des zweiten AD-Wandlers relativiert werden.

Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Voraussetzungen, um eine zuverlässige Montagefortschrittserkennung mit dem Prototyp zu erzielen:

- Die Wägezellen müssen immer waagrecht eingebaut werden.
- Die Spannungen, welche durch die Verschraubung der Platten mit den Wägezellen verursacht werden, müssen minimal gehalten werden. Dazu müssen die Befestigungsschrauben bei Einbau der Waage gleichmäßig und abwechselnd angezogen werden.

- Der Toleranzbereich liegt bei $\pm 2,5$ g, alle Massen unterhalb dieses 5 g Toleranzbereiches können nicht zuverlässig erfasst werden.
- Alle Teile müssen oberhalb der Wägezellen angebracht werden. Ist ein Kabel zu lang und liegt auf dem FTS auf, liefert die Gewichtsmessung ein verfälschtes Resultat.
- Ein Arbeitsschritt sollte nicht durch das Positionieren eines einzigen Teiles unter 5 g beendet werden. Dies kann in der Planung der Arbeitsschritte, beziehungsweise mit Hilfe der Programmierung berücksichtigt werden.
- Bei zu starker exzentrischer Belastung werden die Werte der Gewichtsermittlung unpräzise.

Die Kennwerte des Prototyps sind folgende:

Die Auflösung beträgt 0,02 g, die Genauigkeit beträgt $\pm 1,5$ g und die einzelnen Wägezellen sind auf 2,6 g Auflösung laut OIML eichbar. Die Wiederholbarkeit muss im Rahmen einer größeren Studie ermittelt werden.

Alle genannten Werte sind aus der Testreihe ermittelt worden, aufgrund des Fehlens von genormten Prüfgewichten handelt es sich daher um Abschätzungen. Die Aussagekraft der Testreihe ist beschränkt, da aus Zeitgründen lediglich 17 Montagedurchführungen gemacht wurden.

6 Zusammenfassung und allgemeiner Ausblick

Das Bewertungssystem entspricht, unter Berücksichtigung aktuell verfügbarer Sensoren, dem Stand der Technik. Aufgrund stetig voranschreitender, technischer Entwicklungen auf dem Gebiet der Sensorsysteme, vor allem im Bereich Tiefenbildtechniken und Bewegungserkennung, muss die Auswahlliste des Sensorauswahlverfahren in Zukunft aktuell gehalten werden.

Die gewonnenen Informationen haben gezeigt, dass eine bestmögliche Abdeckung der Montagefortschrittserkennung an der „TU-Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ mit Hilfe einer zusätzlichen optischen Montageplatzüberwachung erzielt werden kann. Aufgrund mangelnder finanzieller Ressourcen und einer vermuteten praktischen Abweichung der ermittelten Daten wurde zweite Lösung, eine Gewichtsmessung des Montagetisches, gewählt. Die bereits vorhandenen Systeme in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ können laut Verfahren 32% des Montagefortschritts erkennen, eine zusätzliche Gewichtsmessung des Montagetisches liefert eine 82% Montagefortschrittserkennung. Ein Nachteil bei dieser Variante ist, dass obwohl das Vorhandensein richtiger Teile erkannt wird, nicht auf die richtige Position eines Teils geschlossen werden kann. Dieser zusätzliche Faktor wäre mit einer visuellen Überprüfung möglich. Die Entwicklung in Richtung einer solchen ist zu beobachten, allerdings ist mit einer Markteinführung eines Sensorsystems mit zuverlässigem Tiefenbild aus größerer Distanz in näherer Zukunft nicht zu rechnen.

Die Umsetzung einer Echtzeitgewichtsmessung hat einen Prototyp hervorgebracht. Unter Berücksichtigung eines $\pm 2,5$ g Toleranzbereichs wurden alle Arbeitsschritte erkannt. Somit eignet sich eine Gewichtsmessung des Montagetisches, um die Vollzähligkeit der Teile eines Arbeitsschritts zu garantieren.

Das Wägesystem besitzt bei exzentrischer Belastung eine höhere Schwankung der Gewichtsmessung. Der Toleranzbereich von $\pm 2,5$ g führt dazu, dass keine der Schwankungen Einfluss auf die Fortschrittserkennung hat. 100 % der Arbeitsschrittgewichte wurden, unter Berücksichtigung der Toleranz, bei den 17 durchgeführten Montagen erkannt. Bei höheren Gesamtbelastungen des Montagetisches kommt es, durch die Schwingung der Deckplatte zu Schwingungsdauern von mehreren Sekunden bis das gemessene Gewicht sich in dem 0,3 g Schwankungsbereich befindet. Diese Schwankung ist durch den relativ weichen Werkstoff der Deckplatte zu erklären und kann bei Verwendung von Stahl reduziert werden. Des Weiteren muss in praktischen Anwendungen überprüft werden, ob der Schwankungsbereich von 0,3 g nicht erhöht werden kann, ohne die 100% Zuverlässigkeit der Waage zu reduzieren.

Genauigkeit und Wiederholbarkeit des gesamten Systems konnten nicht exakt festgestellt werden, allerdings lässt sich, durch Genauigkeitsverluste in den einzelnen Bereichen, ein Potential identifizieren. Die Waage kann durch mechanische Optimierung im Bereich der Schienenführung, sowie der Spannungsoptimierung noch verbessert werden. Auch die Fertigung der Einzelteile kann mittels professioneller Herstellung zur Optimierung der Resultate beitragen. Die Programmierung kann ebenfalls weiterentwickelt werden, sodass in Zukunft nicht nur richtige Teile erkannt, sondern vielleicht auch Hinweise auf fehlende oder falsche Teile gegeben werden. Derzeit jedoch bietet das umgesetzte System eine zuverlässige, wenn auch nicht alles abdeckende, Montagefortschrittserkennung.

Zusammenfassend kann eine Gewichtsmessung am Bauteil eine zuverlässige Aussage darüber geben, ob die richtigen Teile am Montagetisch vorhanden sind. Aufgrund der limitierten finanziellen Mittel ist der Prototyp durch seine Auflösung, Genauigkeit, exzentrische Belastung sowie Wiederholbarkeit beschränkt. Die durchgeführte Testreihe war sehr vielversprechend, allerdings müssen Montagen durch weitere Probanden diese Resultate bestätigen. Der Montagemitarbeiter, welcher zuständig für die Montagetätigkeit der Testreihe war, hat Stärken und Schwächen der Waage gekannt und war somit voreingenommen.

Um die Forschungsfrage „**Welche Sensorkombinationen eignen sich, um physischen Montagefortschritt automatisiert zu erfassen?**“ zu beantworten wurde ein Bewertungsverfahren entwickelt, welches zu einer Echtzeitgewichtsmessung geführt hat. Diese Sensorkombination eignet sich für eine Montagefortschrittserkennung. Trotzdem wird aktuell an verschiedensten Systemen gearbeitet, die viel Potential aufweisen und in Zukunft vermutlich noch wesentlich bessere Möglichkeiten bieten werden, um den Montagefortschritt zu erfassen. Tiefenbildkameras, welche auf dem Prinzip des ToF basieren, kombiniert mit RGB-Kameras können in Zukunft, genauso wie die Hololens, Möglichkeiten bieten, welche der reinen Gewichtsmessung weit überlegen sind.

Die zweite Frage „**Wie kann die Synchronisation zwischen physischem Montagefortschritt und digitalem Informationsfluss sichergestellt werden?**“ wurde mit der Umsetzung des Sensorsystems und der Echtzeitauswertung der Daten beantwortet. Die Daten wurden erfolgreich ausgelesen und bewertet, sodass weitere Systeme oder Personen informiert werden können. Durch die Verwendung einer gängigen Programmiersprache können Schnittstellen zu anderen Systemen leicht erzeugt werden.

Zukünftige Aufgaben könnten das Entwickeln einer industriellen Gewichtsmessung sein, um so eine eindeutige Identifikation verbauter Teile zu erzielen, sodass Teile bis zur Beilegscheibe mit weniger als einem Gramm erkannt werden können. Ein wichtiger Faktor wird die Zuverlässigkeit neuer Technologien und bildbasierenden

Personenerkennungssoftware sein. Die Anzahl an Publikationen und Arbeiten in diesem Bereich sind stark gestiegen und werden vermutlich auch in Zukunft ein starkes Interesse wecken, um neue Wege in der Montagefortschrittserkennung zu eröffnen.

7 Anhang

Der Anhang besteht in einem ersten Punkt aus den Konstruktionszeichnungen der einzelnen Bauteile der Waage, welche im Zuge der Arbeit entworfen, konstruiert und gefertigt wurden. Anschließend ist eine Anleitung beigelegt, um die Waage zusammenzubauen und auf dem FTS zu fixieren. Zuletzt ist das Programm zur Auslesung der Daten angeführt.

Aufbau des Anhangs:

- Waagenaufbau
 - Isometrische Ansicht
- Schaltpläne
 - USB-Element des AD-Wandlers (ADS1232REF)
 - ADS-Serial-USB Verbindung
- Bauanleitung der Waage
- Programmcode

7.1 Waagenaufbau



Abbildung 39: Isometrische Ansicht des umgesetzten Gewichtsmessungssystems

7.2 Schaltpläne

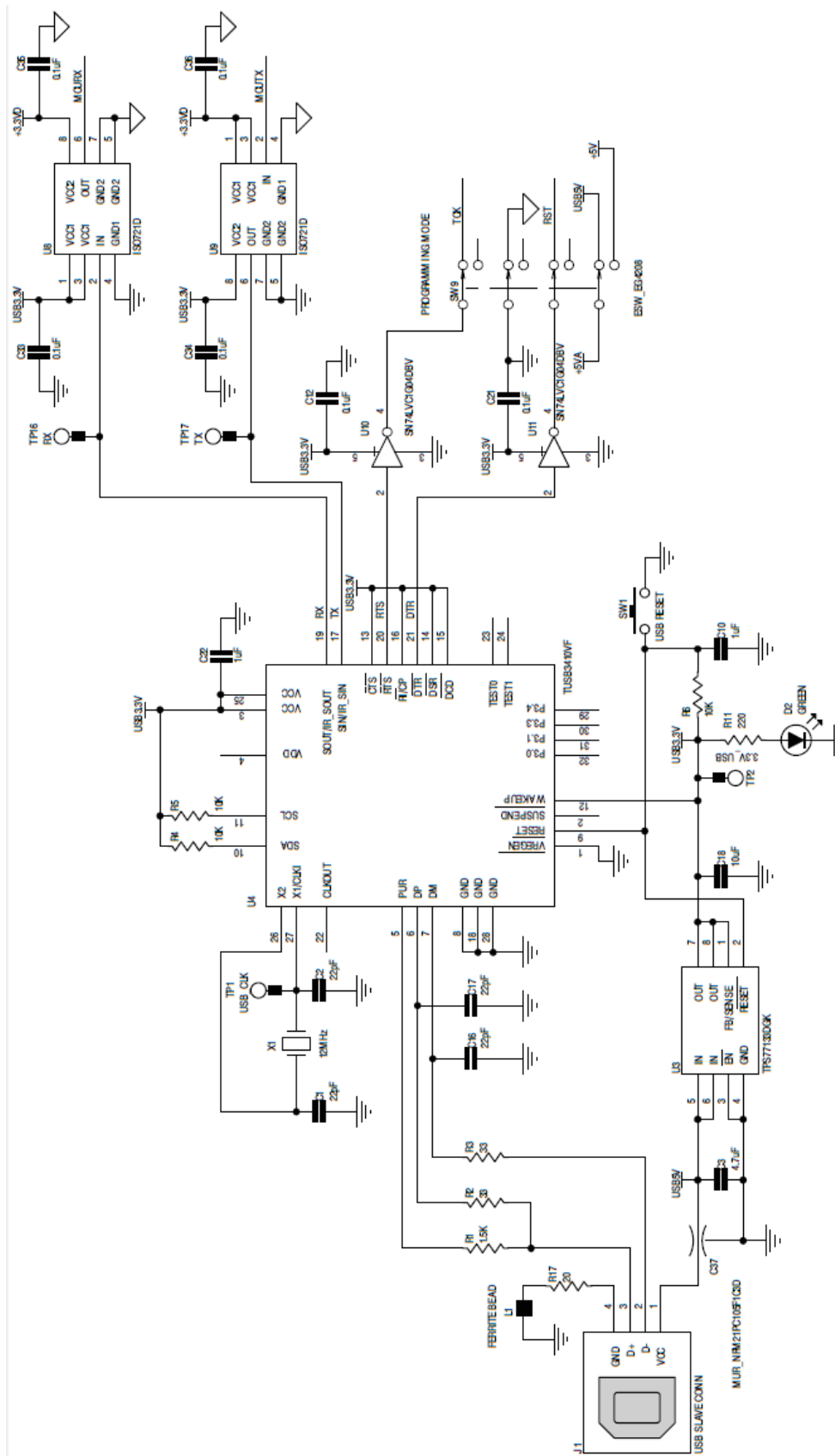


Abbildung 40: USB-Element des ADS1232REF mit RX- und TX-Testpunkten

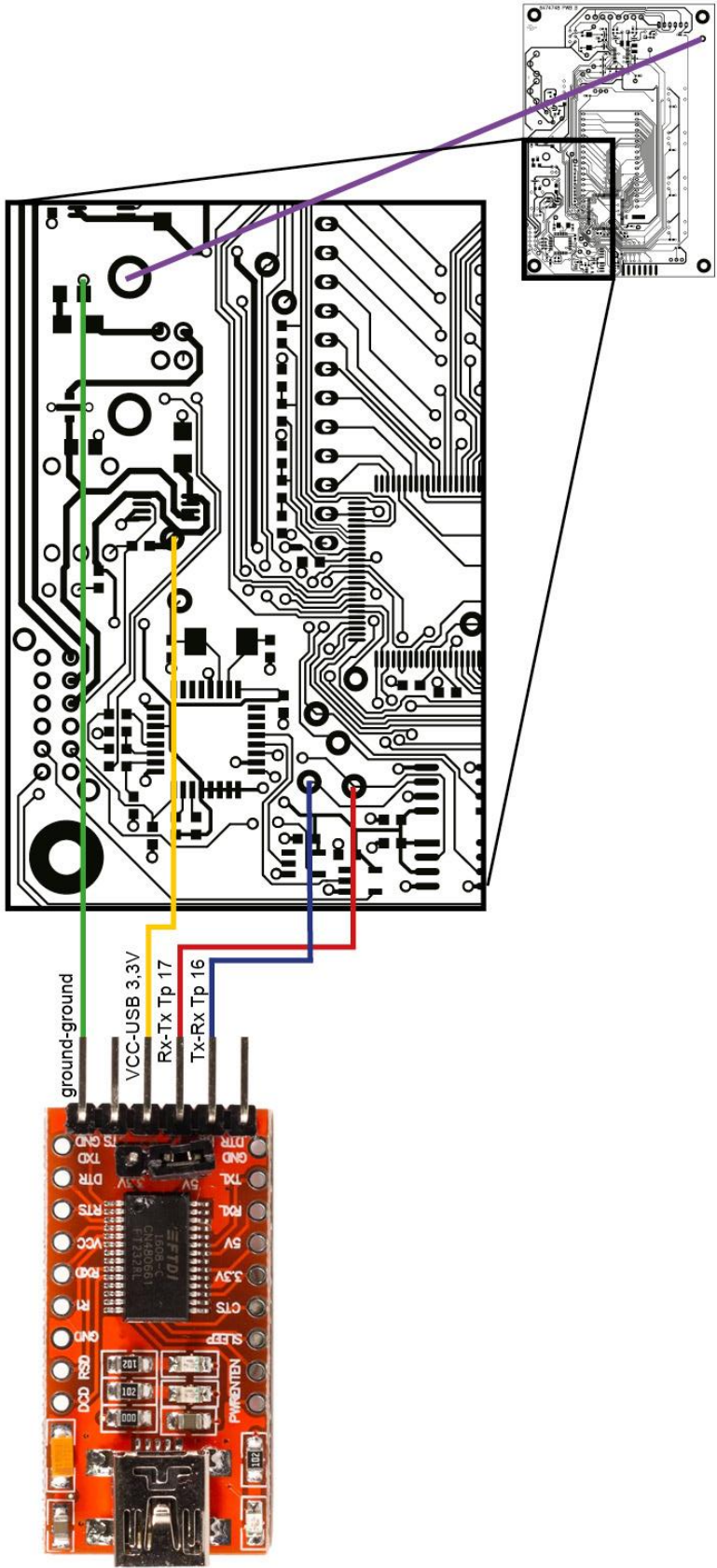
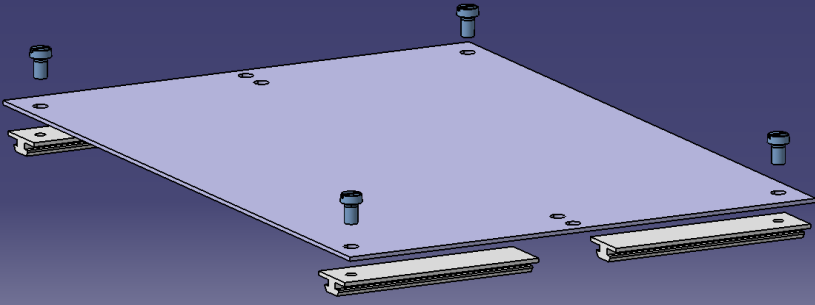
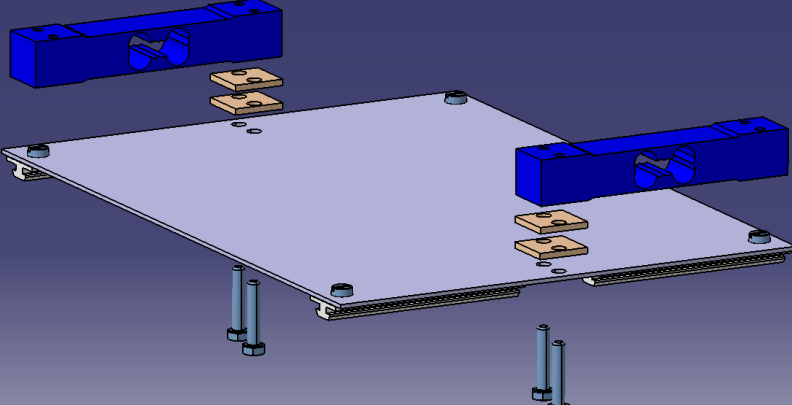
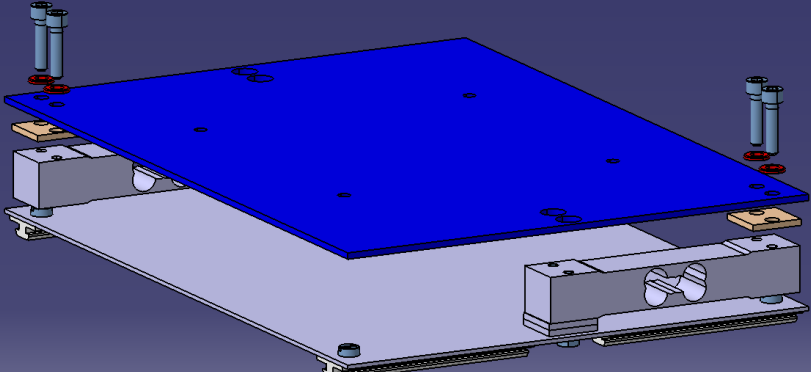
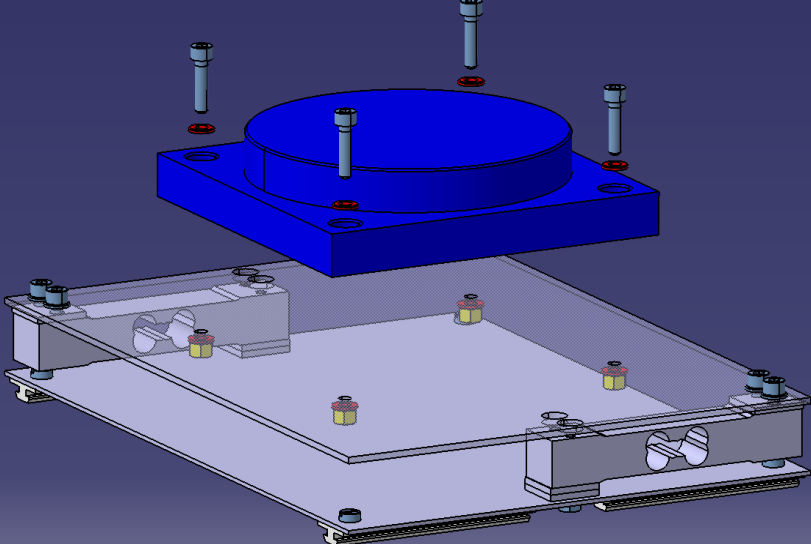


Abbildung 41: ADS-Serial-USB Verbindung

7.3 Bauanleitung der Waage

<p>1)</p> <p>4 x Schlitten mit Bodenplatte verschrauben (M6x10 Schrauben)</p>	
<p>2)</p> <p>Zwei Wägezellen mit jeweils zwei Distanzstücken und zwei M6x30 Schrauben verschrauben. Darauf achten, dass die Wägezellen gegengleich orientiert sind und der Gewichtspfeil auf den Wägezellen nach unten zeigt.</p>	
<p>3)</p> <p>Deckplatte mit den Wägezellen verschrauben. Dazu jeweils zwei M6x25 Schrauben und zwei Beilegscheiben verwenden. Zusätzlich zwischen Wägezelle und Deckplatte ein Distanzstück platzieren.</p>	
<p>4)</p> <p>Drehtisch auf der Deckplatte platzieren und mit vier M6x25 Schrauben und jeweils zwei Beilegscheiben und einer Mutter verschrauben.</p>	

Anmerkungen zum Zusammenbau: Die vier Schrauben aus dem ersten Schritt sollten nicht fest angezogen werden, es besteht keine Gefahr, dass sie sich lösen. Ein leichtes Anziehen der Schrauben lässt den Schlitten genügend Spielraum um sich der Schienenführung anzupassen. Die acht Schrauben aus Schritt 2 und Schritt 3 sollten, um möglichst geringe innere Spannungen in den Sensoren zu verursachen, erst am Ende des dritten Schrittes fest angezogen werden.

7.4 Programmcode

```
1  import serial
2  import time
3  import binascii
4  from drawnow import *
5
6  f = open('DATA.txt','r')
7  Teileliste = f.readlines()
8
9  i=0
10 def getweight(weight):
11     line=Teileliste[weight]
12     try:
13         if i==0:
14             weight=line[3:]
15             t = float(weight)
16         else:
17             weight=line
18             t=float(weight)
19     except:
20         print('serial exception 4')
21     return t
22
23
24 def ascii2int(data_ascii):
25     # function translates hex number (ascii char) to integer
26     # function needs binascii module
27     try:
28         if is_hex(data_ascii)==True:
29             data_binhex = binascii.a2b_hex(data_ascii)
30             data_int = int.from_bytes(data_binhex, byteorder='big')
31         else:
32             print('false')
33             data_int = 1000000000
34     except:
35         print('serial exception 3')
36     return data_int
37
38 def is_hex(s):
39     try:
40         int(s, 16)
41     except ValueError:
42         return False
43     return len(s) % 2 == 0
44
45 def plotValues():
46     plt.title('Sensordaten')
47     plt.grid(True)
```

```
48     plt.ylabel('Gewicht')
49     # plt.plot(wertel, 'r-', label='Data1')
50     # plt.plot(werte2, 'b-', label='Data2')
51     plt.plot(werte, 'g-', label='Gesamtgewicht')
52     plt.legend(loc='upper right')
53
54     sensor1 = serial.Serial('COM10', 115200, timeout=5)
55     sensor2 = serial.Serial('COM6', 115200, timeout=5)
56
57     print('connected')
58
59     r1 = 4000                                #Referenzgewicht
60     u1 = 275028                               #Code wenn unbelaste
61     u11 = 254651
62     p1 = 2505795                             #Code (mit Referenzgewicht)
63     m1 = r1/(p1-u11)                         #Konstante Sensor 1
64
65     r2 = 4000                                #Referenzgewicht
66     u2 = 262972                               #Code wenn unbelaste
67     u22 = 701505
68     p2 = 3275780                             #Code (mit Referenzgewicht)
69     m2 = r2/(p2-u22)                         #Konstante Sensor 2
70     myList1 = []
71     myList2 = []
72
73     try:
74         sensor1.reset_input_buffer()
75         sensor1.write('Q'.encode())
76         sensor1.write('\n'.encode())
77         data1 = sensor1.read(18)
78     except:
79         print('serial exception 1')
80
81     try:
82         sensor2.reset_input_buffer()
83         sensor2.write('Q'.encode())
84         sensor2.write('\n'.encode())
85         data2 = sensor2.read(18)
86     except:
87         print('serial exception 2')
88
89     sensor1.write('s'.encode())
90     sensor1.write('\n'.encode())
91     sensor2.write('s'.encode())
92     sensor2.write('\n'.encode())
93     t_end = time.time() + 5000
94     t_tara1 = time.time() + 10
95     t_tara2 = time.time() + 10.5
96     werte = []
97     wertel = []
98     werte2 = []
99     schritt = [1,2,3,4,5]
100    schritt1 = []
101    ulschritt = []
102    u2schritt = []
103    taraSensor1 = []
104    taraSensor2 = []
105    starttime = time.time()+ 5
106    plt.ion()
107    dosleep = 0
108
109    while time.time() < t_end:
110        try:
```

```
111         data1 = sensor1.read(16)
112         if ascii2int(data1[3:9]) != 1000000000:
113             gewicht1 = m1 * ascii2int(data1[3:9]) - m1 * u1
114             taraSensor1.append(ascii2int(data1[3:9]))
115             u1schritt.append(ascii2int(data1[3:9]))
116             if len(u1schritt) >= 5:
117                 u1schritt.pop(0)
118             myList1.append(gewicht1)
119             time.sleep(0.000001)
120         else:
121             sensor1.reset_input_buffer()
122             sensor1.write('s'.encode())
123             sensor1.write('\n'.encode())
124             time.sleep(0.000001)
125         data2 = sensor2.read(16)
126         if ascii2int(data2[3:9]) != 1000000000:
127             gewicht2 = m2 * ascii2int(data2[3:9]) - m2 * u2
128             taraSensor2.append(ascii2int(data2[3:9]))
129             u2schritt.append(ascii2int(data2[3:9]))
130             if len(u2schritt) >=5:
131                 u2schritt.pop(0)
132             myList2.append(gewicht2)
133             time.sleep(0.000001)
134         else:
135             sensor2.reset_input_buffer()
136             sensor2.write('s'.encode())
137             sensor2.write('\n'.encode())
138             time.sleep(0.000001)
139     except:
140         print('serial exception')
141
142     if (time.time() >= t_tara1 and time.time() <= t_tara2):
143
144         x = sum(taraSensor1) / len(taraSensor1)
145         y = sum(taraSensor2) / len(taraSensor2)
146         u1 = x
147         u2 = y
148
149     if len(myList1)>=4:
150         b = sum(myList2)/len(myList2)
151         c = sum(myList1)/len(myList1)
152         Gewicht = b + c
153         myList1.clear()
154         myList2.clear()
155
156         werte.append(Gewicht)
157         wertel.append(c)
158         werte2.append(b)
159         drawnow(plotValues)
160         schritt.append(Gewicht)
161
162     if len(werte) >= 15:
163         werte.pop(0)
164         wertel.pop(0)
165         werte2.pop(0)
166
167     if len(schritt) >=3:
168         schritt.pop(0)
169
170     if dosleep == 1:
171         time.sleep(1)
172         dosleep = 0
173     else:
```

```
174         if sum(schritt)/len(schritt)>= getweight(i)-2.5 \  
175             and sum(schritt)/len(schritt)<= getweight(i)+2.5\  
176             and max(schritt) - min(schritt) < 0.3 \  
177             and dosleep == 0:  
178             s1= 'Schritt '  
179             s2= ' erledigt'  
180  
181             print(s1+str(i+1)+s2)  
182             print(sum(schritt)/len(schritt))  
183             u1= sum(u1schritt)/len(u1schritt)  
184             u2= sum(u2schritt)/len(u2schritt)  
185             i+=1  
186             schritt = [0,0]  
187             dosleep = 1  
188 sensor1.close()
```


8 Literaturverzeichnis

- Adam, D. (1990). Integration und Flexibilität: eine Herausforderung für die allgemeine Betriebswirtschaftslehre: 51. Wissenschaftliche Jahrestagung des Verbandes der Hochschullehrer für Betriebswirtschaftslehre [sic] e.V. 1989 in Münster. Wiesbaden 1990.
- Bauernhansl, T. (2014). Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden 2014.
- Bechtolf, H. & Zöllner, T. Industrie 4.0: Zeit für ein Arbeitsschutzrecht 2.0?
- Biermann, T. & Dehr, G. (1997). Innovation mit System: Erneuerungsstrategien für mittelständische Unternehmen. Berlin 1997.
- Björn, M. & Hao, D. (2013). Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage. 2013.
- Cognex (2016a). In-Sight 2000 Datasheet. 2016.
- Cognex (2016b). In- Sight ® 2000 Series Vision Sensor Reference Guide. 2016.
- Deris, A., Trigonis, I., Aravanis, A. & Stathopoulou, E. (2017). Depth cameras on UAVs: A first approach. 2017.
- Eißler, W. (1996). Praktischer Einsatz von berührungslos arbeitenden Sensoren: Auswahlkriterien und Anwendungsbeispiele aus der Automatisierungs- und Steuerungstechnik., 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage Renningen-Malmsheim 1996.
- EIMaraghy, H. A. (2009). Changeable and reconfigurable manufacturing systems. London 2009.
- Finkenzeller, K. (2012). RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC., 6., aktualisierte und erweiterte Auflage München 2012.
- Funk, M., Mayer, F. & Schmidt, A. (2015). Using In-Situ Projection to Support Cognitively Impaired Workers at the Workplace. 2015.
- Geng, J. (2011). Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. 2011.
- Graichen, T., Weichold, S. & Bilda, S. (2017). Framework zur Innenraumpositionierung unter Verwendung freier, offener Innenraumkarten und Inertialsensorik. *Tagungsband 13. Chemnitzer Fachtagung Mikromechanik & Mikroelektronik*, S. 55–57.
- Hansard, M., Lee, S., Choi, O. & Horaud, R. (2013). Time-of-flight cameras: principles, methods and applications. London 2013.
- Hering, E. (2012). Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete., 1. Auflage Wiesbaden 2012.

- Hesse, S. & Schnell, G. (2011). Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung., 5. korr. und verb. Auflage Wiesbaden 2011.
- Hinrichsen, S., Riediger, D. & Unrau, A. (2017). Anforderungsgerechte Gestaltung von Montageassistenzsysteme. 2017.
- Karsten, F. (2018). Positionsermittlung eines Werkstücks/ Objekts mit einer 3D-ToF - Kamera, Visualisierung und Verarbeitung der Bilddaten mit dem Robot Operating System (ROS) und Matlab, geregeltes Greifen und Ablegen des Werkstücks auf einer Fertigungslinie mit dem Roboterarm des Kuka-youBots. 2018.
- Kleborn, S. Evaluierung einer Microsoft Kinect v2 zur gesten- und sprachbasierten Steuerung eines Roboterarmes.
- Lindemann, U., Reichwald, R. & Zäh, M. (2006). Individualisierte Produkte: Komplexität beherrschen, in Entwicklung und Produktion. Berlin 2006.
- Lindner, A. (2005). Kundenwünsche - entwickeln, antizipieren, entsprechen. .
- Löffler-Mang, M. (2012). Optische Sensorik: Lasertechnik, Experimente, Light Barriers., 1. Auflage Wiesbaden 2012.
- Lotter, B. (2012). Montage in der industriellen Produktion: ein Handbuch für die Praxis; mit 18 Tabellen., 2. Auflage Berlin 2012.
- Mekonnen, I. Automated Aircraft Identification by Machine Vision.
- Mettler Toledo Inc. (2010). Wägemodulsysteme Handbuch. 2010.
- Müller, R., Speicher, C. & Hörauf, L. (2014). Planungsunterstützung bei komplexen Aufgabenstellungen in der Montage – ein Industrie 4.0 Projekt. 2014.
- Odendahl, M., Finn, J. & Wenger, A. (2009). Arduino - Physical Computing für Bastler, Designer und Geeks: Microcontroller- Programmierung für alle; Prototype Your Life; mit kompletter Programmiersprachenreferenz. Beijing 2009.
- OIML R60 (2000). Metrological regulation for load cells. 2000.
- Olbrich, R. & Battenfeld, D. (2005). Variantenvielfalt und Komplexität — kostenorientierte vs. marktorientierte Sicht Journal für Marketing 44. 2005.
- Österreichische MTM-Vereinigung (2017). Basic MTM Lehrunterlage f. studentische Ausbildung A/AB. 2017.
- Pohl, R., Eckey, A., Casperson, R., Sickert, R. & Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (2013). Passiver induktiver Sensor zur Zustandsüberwachung rotierender metallischer Bauteile. 2013.
- Pöhlmann, S., Harkness, E., Taylor, C. & Astley, S. (2016). Evaluation of Kinect 3D Sensor for Healthcare Imaging. *Journal of Medical and Biological Engineering* (36), URL: <https://doi.org/10.1007/s40846-016-0184-2>.

- Reinhart, G. (2017). Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München 2017.
- Reinhart, G., Shen, Y. & Spillner, R. (2013). Hybride Systeme – Arbeitsplätze der Zukunft. Nachhaltige und flexible Produktivitätssteigerung in hybriden Arbeitssystemen. In: wt Werkstattstechnik online. 2013.
- Sauerer, J. & Schütze (2013). Sensorik für erneuerbare Energien und Energieeffizienz. *Beiträge zum Workshop vom AMA Fachverband für Sensorik e.V. und vom ForschungsVerbund Erneuerbare Energien.*
- Spath, D. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0: Studie. Stuttgart 2013.
- Texas Instruments (2011). ADS1232REF User's Guide. 2011.
- Theis, S., Pache, S., Zietzschmann, S. & Bernhardt, H. (2010). Neue elektronische Tierkennzeichnung mit SAW-basiertem RFID-System im 2,4 GHz ISM-Band. *Landtechnik*, 4 (65), S. 248–251.
- U.S. MTM Association for Standards and Research (1955). MTM-Karte 101 A U.S. MTM Association for Standards and Research. 1955.
- Xsens Technologies (2016). MVN User Manual. 2016.
- Zhang, W. (2011). In-Vehicle pedestrian detection using Stereo Vision Technology. 2011.

9 Onlineliteratur

<http://www.armbruster.de/> (überprüft am 06.06.2018)

<http://www.armbruster.de/elam-zusatzfunktionen.html> (überprüft am 06.06.2018)

<https://www.bosche.eu/waagenkomponenten/waegezellen/plattform-waegezellen/plattform-waegezellen-h10a> (überprüft am 06.06.2018)

<http://www.cognex.com/> (überprüft am 06.06.2018)

<http://www.denso-wave.com/qrcode/aboutqr-e.html> (überprüft am 06.06.2018)

https://de.ifixit.com/Device/Xbox_One_Kinect (überprüft am 06.06.2018)

http://www.mtm-vereinigung.at/mtm/set_links.htm (überprüft am 06.06.2018)

<https://orbbec3d.com/> (überprüft am 06.06.2018)

<https://orbbec3d.com/product-persee/> (überprüft am 06.06.2018)

<https://www.sarissa.de/> (überprüft am 06.06.2018)

<https://www.sarissa.de/applikationen/> (überprüft am 06.06.2018)

<https://de.statista.com/> (überprüft am 03.07.2018)

<https://de.statista.com/> Quelle: Bitkom, veröffentlicht: Juli 2014 (überprüft am 03.07.2018)

<http://www.statistik.at/> (überprüft am 03.07.2018)

<https://www.stereolabs.com/zed/> (überprüft am 06.06.2018)

<https://www.wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/losgroesse-40747/version-264125/> (überprüft am 06.06.2018)

<https://www.xsens.com/> (überprüft am 06.06.2018)

<https://www.xsens.com/customer-cases/> (überprüft am 06.06.2018)

<https://www.youtube.com/watch?v=dpqOB7kzZAE> (überprüft am 06.06.2018)

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auswahlkriterien für Montagesysteme	7
Abbildung 2: In-Sight® 2000.....	14
Abbildung 3: Aufbau der In-Sight® 2000	15
Abbildung 4: Arbeitsbereich und Sichtfeld für In-Sight® 2000 Modelle mit 640x480 Auflösung.....	15
Abbildung 5: Structured-Light-Technologie	19
Abbildung 6: Druck- (li.) und Zuglast-Wägezelle (re.)	20
Abbildung 7: Kennwerte einer Wägezelle	21
Abbildung 8: Beispiel einer Wägezellen Klassifizierung	21
Abbildung 9: Wheatstone-Brücke mit DMS.....	23
Abbildung 10: QR-Code (li.) und Barcode (re.).....	24
Abbildung 11: Funktionsweise eines pneumatischen Rückstausensors anhand dreier Zustände (a,b,c)	27
Abbildung 12: Kinect V2	29
Abbildung 13: Kinect V2 ohne Gehäuse	29
Abbildung 14: Daten aus dem Kinect Sensor	30
Abbildung 15: Versuchsaufbau mit einer Kinect V2.....	33
Abbildung 16: Schütteneingriff aufgenommen mit einer Kinect V2	33
Abbildung 17: Sarissa Handgelenksensor.....	35
Abbildung 18: Sarissa Empfängereinheit.....	35
Abbildung 19: Beispiel einer Umsetzung des Sarissa-Systems.....	37
Abbildung 20: Xsens Bewegungssensor	39
Abbildung 21: Xsens in der Montage	40
Abbildung 22: Orbbec Persee.....	42
Abbildung 23: Personenerkennung der Orbbec.....	43
Abbildung 24: StereolabsZED	44
Abbildung 25: Tiefensensordaten der StereolabsZED.....	45
Abbildung 26: VicoVR-Sensorsystem.....	47
Abbildung 27: MTM-Grundzyklus	53
Abbildung 28: Montageplatz der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“	66
Abbildung 29: Akkuschauber mit integrierten Drehmoment- und Drehwinkelsensoren der Firma Bosch Rexroth.....	68
Abbildung 30: Belastung des Montagetisches mit Flächenlast (a) und exzentrischer Belastung (b)	76
Abbildung 31: Ansicht der Waage von vorne.....	78
Abbildung 32: Ansicht der Waage von der Seite	79
Abbildung 33: Schaltplan der Wägezelle	79
Abbildung 34: ADS1232REF AD-Wandler von Texas Instruments.....	80
Abbildung 35: Grafisches Interface für den ADS1232REF	81

Abbildung 36: Umgesetzter Schaltplan des Spannungsreglers	82
Abbildung 37: Schaltplan des Serial-USB und des Ad-Wandlers	83
Abbildung 38: Schaltbild des umgesetzten Wägezellensystem	84
Abbildung 39: Isometrische Ansicht des umgesetzten Gewichtsmessungssystems .	97
Abbildung 40: USB-Element des ADS1232REF mit RX- und TX-Testpunkten.....	98
Abbildung 41: ADS-Serial-USB Verbindung	99

11 Formelverzeichnis

Formel 1: Montagefortschrittsabdeckung	62
Formel 2: Kalibrationskonstante des Sensors 1	85
Formel 3: Gewichtsumrechnung Sensor 1.....	85

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Struktur der Arbeit und methodische Vorgehensweise	6
Tabelle 2: Sinne und Sensoren	12
Tabelle 3: Fehlertoleranz der jeweiligen Klasse	22
Tabelle 4: Gegenüberstellung der bildbasierenden Sensorsysteme.....	49
Tabelle 5: Beispiel: Zuordnung UAS-Montagetask „Schraubarbeiten“ zu adaptierten MTM-Grundbewegungen.....	54
Tabelle 6: Zuordnung der Sensoren zu MTM Grundbewegungen.....	58
Tabelle 7: Auswahl der Tasks (farblich hinterlegte Zellen) *wird in den Berechnungen nicht berücksichtigt da diese Grundbewegung keinen Beitrag zum Montagefortschritt leistet. Bei den weiteren Tasks wird daher auf die Erwähnung dieser Grundbewegung verzichtet.	60
Tabelle 8: Auswahl der Sensoren (farblich hinterlegte Zellen).....	61
Tabelle 9: Ergebnistabelle des Beispiels	62
Tabelle 10: Abdeckung des Montagefortschritts in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ bei Hinzufügen einzelner Sensoren.....	69
Tabelle 11: Anwendung in der „TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0“ bei zusätzlicher Verwendung einer Bauteilkamera.....	70
Tabelle 12: Datentabelle der Wägezelle	75
Tabelle 13: Belastungen der Sensoren	77
Tabelle 14: Befehle zur Ansteuerung des AD-Wandler	84
Tabelle 15: Komponenten des 3D-Druckers und entsprechende Gewichte	86
Tabelle 16: Gewichtstabelle der Arbeitsschritte der ersten Montagestation	87
Tabelle 17: Testreihe (in Gramm).....	90
Tabelle 18: Kennzahlen der Montagearten (in Gramm).....	91

13 Abkürzungsverzeichnis

AD	Analog-Digital
BpS	Bilder pro Sekunde
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka
cm	Zentimeter
D _{max}	Maximale Testlast
DMS	Dehnungsmessstreifen
\$	US-Dollar
€	Euro
E _{max}	Maximallast
E _{min}	Minimallast
etc.	et cetera
FEM	Finite-Elemente-Methode
FF	Forschungsfrage
FTS	Fahrerloses-Transport-System
g	Gramm
kg	Kilogramm
li.	links
LPS	Local Positioning System
m	Meter
max.	maximal
min.	minimal
mm	Millimeter
MTM	Methods Time Measurement
mV	Millivolt
N	Newton
nF	Nanofarad
nm	Nanometer
n _{LC}	Anzahl der Teilungswerte
n _{max}	Max. Teilung des Verifikationsintervalls
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
re.	rechts
SDK	Software Development Kit
ToF	Time of Flight
UAS	Universelles Analysiersystem
UAV	Unmanned aerial vehicle (unbemanntes Luftfahrzeug)

V	Volt
VCC	Voltage at the common collector (Versorgungsspannung)
vgl.	vergleiche
v_{\min}	Minimales Verifikationsintervall
VR	Virtual reality
z.B.	zum Beispiel
°C	Grad Celsius
Ω	Ohm