



DIPLOMARBEIT

Ein Beitrag zur Entwicklung einer modularen Roboter- plattform „Bau“

A contribution to the development of a modular robot platform "Construction"

eingereicht von

cand. ing. Lukas Felix Fuchs

geb. am 01.03.1996 in Bayreuth

Matrikel-Nummer: 4074488

Betreuer/in:

- Dipl.-Ing. Nicolas Mitsch

Mentoren/in:

- Dipl. -Ing. Martin Jahn (Ed. Züblin AG)

Verantwortlicher Hochschullehrer:

- Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Menzel

Zweitprüfer:

- Prof. Dr.-Ing. Raimar J. Scherer



Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Name: cand. ing. Lukas Fuchs
Vertiefung: Computational Engineering

(Matrikel Nr.: 4074488)

Thema: Ein Beitrag zur Entwicklung einer modularen Roboterplattform „Bau“
A concept for a modular robot system for the construction sector

Zielsetzung

Die Produktivitätssteigerungen in der Baubranche sind seit Beginn der 1990er Jahr hinter denen der meisten anderen Industriezweige zurückgeblieben. Mit zunehmender Prosperität in anderen Wirtschaftszweigen und EU-Ländern sowie der sich verändernden Bevölkerungsstruktur (alternde Gesellschaft) ist in der Baubranche ein genereller Arbeitskräftemangel zu verzeichnen, der über den üblichen Fachkräftemangel hinausgeht.

Damit sind im Bauwesen zwei Ziele zu erreichen: Steigerung der Produktivität und Erhöhung der Attraktivität von Berufen im Bauwesen. Die Automatisierung von Tätigkeiten im Bauwesen ist ein Lösungsansatz. Einer umfassenden Automatisierung steht die Struktur der Bauindustrie entgegen, da die überwiegende Zahl der am Markt agierenden Bauunternehmen kleine und mittlere Unternehmen (KMU) mit begrenztem Potential zu Investitionen sind.

Ein möglicher Weg, den Robotereinsatz auf der Baustelle zu vereinfachen, ist es, die Prozesse auf der Baustelle weitgehend zu standardisieren und das Arbeitsumfeld des Roboters leichter kontrollierbar zu machen. Aus diesen Gründen sollen in dieser Arbeit Anforderungen an eine mobile, modulare Roboterplattform erhoben werden, die im Innenausbau von Gebäuden, beziehungsweise im Dachdeckerhandwerk eingesetzt werden kann.

Als mögliche Einsatzszenarien sollen untersucht (i) Verlegen von großformatigen Platten und Fliesen, (ii) Auftragen bzw. sprühen von fließfähigen Baustoffen.

Auf Basis der Anforderungserhebung soll ein Konzept entwickelt werden, wie diese Arbeiten weitestgehend automatisiert durchgeführt werden können. Dieses Konzept soll anhand einer Simulation mit der Software Grasshopper und einem in Absprache mit dem Betreuer zu wählendem Plugin (z.B. Kuka | Prc oder vergleichbar) zur parametrischen Robotersteuerung und Simulation getestet werden.

Arbeitsumfang der Diplomarbeit:

Im Rahmen der Ausarbeitung sollen die folgenden Punkte bearbeitet werden:

1. Identifikation zu automatisierender Bauprozesse aus den Bereichen Dachdecker und Innenausbau. Dazu kann auf Vorarbeiten (Feldstudien) zurückgegriffen werden.
2. Spezifikation der möglichen Arbeitsmodule.
3. Erarbeitung von Anforderungsprofilen für die Arbeitsmodule.
4. Entwurf der Komponenten für die Steuerungssoftware der Arbeitsmodule.
5. Verifikation der vorgeschlagenen Steuerungsprofile mittels Simulationsprogrammen.

Verantwortliche und Termine:

Verantwortlicher Hochschullehrer
und Erstprüfer

Prof. Dr.-Ing. habil. Menzel

Zweitprüfer

Prof. Dr.-Ing. Raimar Scherer

Wiss. Betreuer TU Dresden

Dipl.-Ing. Nicolas Mitsch

Betrieblicher Mentor Ed. Züblin AG

Dipl.-Ing. Martin Jahn

ausgehändigt am

27.04.2021

einzureichen am

27.08.2021



Prof. Dr.-Ing. habil. K. Menzel
Verantwortlicher Hochschullehrer

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich reiche sie erstmals als Prüfungsleistung ein. Mir ist bekannt, dass ein Betrugsversuch mit der Note „nicht ausreichend“ (5,0) geahndet wird und im Wiederholungsfall zum Ausschluss von der Erbringung weiterer Prüfungsleistungen führen kann.

Name: Fuchs

Vorname: Lukas Felix

Matrikelnummer: 4074488

Dresden, den 22.10.2021



Unterschrift cand.ing. Lukas Fuchs

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während meines Studiums und meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Für die Betreuung und Begutachtung meiner Diplomarbeit gebührt mein Dank Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Menzel sowie Dipl.-Ing. Nicolas Mitsch. Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen Betreuern aus der Industrie, Martin Jahn, Johannes Dittrich sowie Felix Hillemeier für ihre Zusammenarbeit und Unterstützung.

Außerdem bedanke ich mich bei meiner Freundin Julia und meinen Freunden und Verwandten für ihren Beistand und das Korrekturlesen. Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die es mir ermöglicht haben zu studieren und mich die vielen langen Jahre dabei immer unterstützt haben.

Was lange währt, wird endlich gut.

Lukas Felix Fuchs

I ABSTRACT

Die vorliegende Diplomarbeit gibt einen Überblick über die Hindernisse und Möglichkeiten für den Einsatz einer modularen Roboterplattform im Bauwesen. Dafür wurden zunächst die notwendigen Grundlagen für einen Robotereinsatz benannt und untersucht. Anschließend wurde ein Entwurf für den Gesamtprozess eines Robotereinsatzes erstellt und einzelne Teilschritte definiert. Um einen dieser Teilschritte genauer zu beleuchten, wurden Analysen für Arbeitsabläufe und Werkzeugeinsätze von Gewerken im Innenausbau und der Flachdachkonstruktion durchgeführt. Weiterhin wurden Vorschläge für die Spezifikation von Werkzeugmodulen erarbeitet. Im Anschluss wurden die Werkzeugsimulationen erstellt und diese für einen realen Robotertest mit Universal Robots exportiert. In diesen Praxistests wurden Trockenbauplatten durch ein Schleifwerkzeug nachbearbeitet. Dabei hat sich gezeigt, dass mit Hilfe der Programmiersprache „G-Code“ Simulationsdaten effektiv und einfach an Roboter exportiert werden können. G-Code ist dabei herstellerunabhängig und kann für nahezu alle Industrieroboter eingesetzt werden. Die Daten können durch den Roboter jedoch nach dem Import nur begrenzt modifiziert werden. Bei der Auswertung der durchgeführten Praxistests haben sich außerdem mögliche Fehlerquellen durch die Verwendung von G-Code für Industrieroboter, aber auch Anwendungsmöglichkeiten für das Baugewerbe gezeigt.

II INHALTSVERZEICHNIS

I	Abstract.....	I
II	Inhaltsverzeichnis.....	II
III	Abbildungsverzeichnis.....	V
IV	Tabellenverzeichnis.....	VII
V	Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
VI	Übersetzungsverzeichnis	IX
1	Einleitung.....	1
2	Bisherige Erkenntnisse aus Forschung und Praxis zum Einsatz von Robotern im Bauwesen.....	3
2.1.	Praktische Forschungsprojekte.....	3
2.2.	Theoretische Feldstudien und Literatur.....	5
2.3.	Erarbeitete Grundlagen für einen Robotereinsatz	6
3	Prozessanalyse eines Robotereinsatzes.....	10
3.1.	Informationsaustausch	10
3.2.	Positionierung des Roboters im Arbeitsbereich	11
3.3.	Beginn des Arbeitsablaufplans	12
3.4.	Durchführung des Arbeitsvorgangs	13
3.5.	Umpositionierung nach Arbeitsablaufplan	15
3.6.	Einsatz im nächsten Arbeitsbereich	15
4	Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz	16
4.1.	Bauprozesse im Arbeitsbereich Innenausbau	16
4.1.1.	Schleifen und verspachteln von Trockenbauwänden.....	17
4.1.2.	Streichen von Wänden und Decken.....	19
4.2.	Bauprozesse im Arbeitsbereich Flachdach.....	21
4.2.1.	Haftbrücken auf Bitumenbasis.....	22
4.2.2.	Verlegen und Kleben von Wärmedämmplatten.....	23
4.3.	Vergleich und Auswertung der Bauprozesse in Bezug auf das Automatisierungspotential	29
4.4.	Gegenüberstellung verschiedener Bauprozesse in Hinblick auf den Werkzeugeinsatz	34

4.4.1.	Greifen von Plattenelementen	35
4.4.2.	Extrudieren von Material mit Mischpumpe	35
4.4.3.	Dispenser für Klebstoff.....	35
4.4.4.	Airless Spritzgerät	36
4.4.5.	Glätten von Material	36
4.4.6.	Zuschneiden von Werkstoffen.....	36
4.4.7.	Abschleifen von Oberflächen.....	37
4.4.1.	Werkzeugmatrix	37
4.4.2.	Auswertung der Werkzeugmatrix	39
5	Anforderungen und Spezifikationen von Werkzeugmodulen.....	40
5.1.	Konfiguration von Endeffektoren und Wegpunkten	40
5.2.	Greifer und Werkzeugtypen für Roboter	41
5.2.1.	Greifsysteme.....	42
5.2.2.	Arbeitswerkzeuge.....	44
5.2.3.	Messgeräte.....	46
5.3.	Spezifikation für Werkzeuge zum Einbau von Plattenelementen.....	47
5.3.1.	EPS-Dämmplatten	47
5.3.2.	Fliesen.....	48
5.4.	Spezifikation von Werkzeugen für das Aufsprühen von Baumaterialien	51
5.4.1.	Wand- und Deckenfarbe	51
5.4.2.	WDVS-Klebeschaum.....	53
6	Robotertest mit Universal Robots zum Schleifen einer Trockenbauplatte.....	54
6.1.	Simulation in Autodesk Fusion 360	55
6.1.1.	Modellierung des Werkstücks.....	55
6.1.2.	Modellierung des Werkzeugs.....	57
6.1.3.	Simulation und Post-Processing.....	58
6.2.	Versuchsaufbau und Vorbereitung	63
6.2.1.	Vorbereitung der Trockenbauplatte	63
6.2.2.	Konfiguration des Universal Robots	65
6.2.3.	Roboterprogramm	68
6.3.	Testdurchführung.....	70
6.3.1.	Schleifen der Plattenfläche	71
6.3.2.	Schleifen der Plattenfugen.....	73
6.4.	Ergebnisse und baupraktische Bewertung.....	75
6.4.1.	Schnittstellen und Programmierumgebung	75
6.4.2.	Konfiguration von TCP und Arbeitsebene mit Universal Robots.....	77
6.4.3.	Qualitätskontrolle der Schleifarbeiten.....	78
6.4.4.	Weitere Baupraktische Anwendungsbeispiele für G-Code	80

7	Zusammenfassung und Forschungsausblick	82
VII	Literaturverzeichnis	i
VIII	Anlagen	v

III ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1 Internationaler Vergleich von Roboterneueinstellungen	1
Abb. 2 Okibo Roboter auf Züblin Baustelle Esslingen, Baden-Württemberg	4
Abb. 3 EQart der Firma Flexcube in der Handwerkskammer Dresden	9
Abb. 4 Gesamtprozess Robotereinsatz	10
Abb. 5 Stromkasten, Züblin Baustelle Dessauer Straße in Leipzig	12
Abb. 6 Airless Gerät für Malerarbeiten, Züblin Baustelle Dessauer Straße in Leipzig.....	14
Abb. 7 Putzmischpumpe, Züblin Baustelle Bernhard-Göring-Straße in Leipzig.....	14
Abb. 8 Verspachteln von Fugen, Züblin Baustelle Bernhard-Göring-Straße in Leipzig	18
Abb. 9 Farbsprühpistole und Handwerker, Züblin Baustelle Dessauer Straße in Leipzig	20
Abb. 10 Warm- und Kaltdach schematischer Aufbau.....	21
Abb. 11 Verarbeitung von Haftbrücke mit Farbrolle	22
Abb. 12 Lagerung von EPS-Dämmplatten, Dachdecker Dittrich Baustelle Thymianweg in Dresden	25
Abb. 13 Zwischenlagerung von Material und Verbau der Dämmplatten, Dachdecker Dittrich Baustelle Thymianweg in Dresden	25
Abb. 14 Verlegeplan Gefälledämmung, Dachdecker Dittrich Baustelle Thymianweg in Dresden	27
Abb. 15 Arbeitsbereich Flachdach, Dachdecker Dittrich Baustelle Thymianweg in Dresden	28
Abb. 16 Automatisierungsmatrix.....	30
Abb. 17 Werkzeugmatrix.....	38
Abb. 18 OnRobot Backengreifer, Jugard+Künstner Zweigstelle Gera	43
Abb. 19 Schmalz Vakuumgreifer, Jugard+Künstner Zweigstelle Gera	43
Abb. 20 Yaskawa Roboter mit Kombigreifer, Handwerkskammer Dresden.....	44
Abb. 21 Schweißwerkzeug an Roboter, HWK Dresden	45
Abb. 22: Robotiq Backengreifer, Jugard+Künstner Zweigstelle Gera	46

Abb. 23 UR mit Schutzhülle, Jugard+Künstner Zweigstelle Gera	52
Abb. 24 Modellierte Platte für ganzflächiges Schleifen, Autodesk Fusion 360.....	56
Abb. 25 Modellierter Platz für das Fugenschleifen, Autodesk Fusion 360	56
Abb. 26 Modelliertes und echtes Schleifwerkzeug	57
Abb. 27 Simulation zum Schleifen der gesamten Platten, Autodesk Fusion 360.....	59
Abb. 28 Simulation zum Schleifen der Fugen, Autodesk Fusion 360.....	59
Abb. 29 UR Postprozessor, Autodesk Fusion 360	60
Abb. 30 Vorbereitete Trockenbauplatte für den Schleifvorgang	63
Abb. 31 Einspannung Trockenbauplatte auf Robotertisch	64
Abb. 32 Modifizierter Robotergriffe für Installation der Arbeitsebene.....	65
Abb. 33 Installation der Arbeitsebene UR5e, Abfahren der Achsen.....	66
Abb. 34 Ebenenvorschau Teach Pendant UR5e	66
Abb. 35 Import von Werkzeugpfad-Dateien UR5e.....	67
Abb. 36 Kennwerte des Schleifwerkzeugs UR5e	68
Abb. 37 Roboterprogramm zum Schleifen UR5e.....	69
Abb. 38 UR5e in der HWK Dresden	70
Abb. 39 Robotertest Schleifen der Platte	72
Abb. 40 Abmessungen Werkzeugpfad Plattenschleifen, Fusion 360	72
Abb. 41 Robotertest Fugenschleifen	74
Abb. 42 Abmessungen Werkzeugpfad Fugenschleifen, Fusion 360	74
Abb. 43 Modellierung UR5e mit Robotiq Schleifkit, RoboDK.....	76
Abb. 44 Beschädigung Trockenbauplatte durch Fugenschleifen.....	79
Abb. 45 Beschädigung Trockenbauplatte durch Flächenschleifen.	79

IV TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Zusammenfassung Verspachteln und Schleifen von Trockenbauwänden	18
Tabelle 2 Zusammenfassung Streichen von Decken und Wänden	20
Tabelle 3 Zusammenfassung Haftbrücken auf Bitumenbasis	23
Tabelle 4 Vergleich von Plattendämmstoffen	24
Tabelle 5 Zusammenfassung Verlegen von Dämmplatten.....	28
Tabelle 6 Bewertungskriterien und Automatisierungspunkte	29
Tabelle 7 Einstufung Automatisierungspotential.....	29

V ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
BIP	Bruttoinlandsprodukts
DIN	Deutsches Institut für Normierung
EPS	Expandierter Polystyrol Schaum
ggf.	Gegebenenfalls
HWK	Handwerkskammer
IFR	International Federation of Robotics
LoD	Level of Detail
Lol	Level of Information
M. Sc.	Master of Science
PUR	Polyurethan Hartschaum
sog.	Sogenannte
STCRs	Single Task Construction Robots
TCP	Tool Center Point
UR	Universal Robots
UR5e	Universal Robot 5 e-Series

VI ÜBERSETZUNGSVERZEICHNIS

Finish	Hier: Oberflächenabschluss
Level of Information	Informationstiefe
Level of Detail	Detailtiefe

1 EINLEITUNG

Das Baugewerbe in Deutschland erwirtschaftete 2020 laut dem statistischen Bundesamt (2021a, 2021b) 6% des Bruttoinlandsprodukts (BIP) und 5,7 % der Erwerbstätigen in Deutschland waren in der Baubranche beschäftigt. Der Beitrag zum BIP ist beispielhaft im Vergleich zur Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei um das Sechsfache und die Anzahl der Erwerbstätigen um das Fünffache größer. Dadurch gehört das Baugewerbe zu den größten und wichtigsten Industriezweigen in Deutschland. Das Wachstum der Branche sehen viele Unternehmen jedoch, insbesondere auf Grund des Fachkräftemangels, kritisch. Zwei von drei Bauunternehmen gaben in der Konjunkturumfrage 2021 des Deutschen Industrie- und Handelskammertag e.V (2021) an, dass sie darin das Hauptrisiko für die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung sehen.

Eine Möglichkeit die Auswirkungen des wachsenden Fachkräftemangels zu reduzieren, ist der vermehrte Einsatz von Robotern und der Prozessautomatisierung. Auf diese Weise können Tätigkeiten durch Maschinen und Robotersysteme übernommen und Personal reduziert werden. Deutschland gehört nach dem „World Robotics Report 2020“, der 2021 durch die „International Federation of Robotics“ (IFR) veröffentlicht wurde, neben Südkorea, Japan, den USA sowie dem Spitzenreiter China zu den fünf größten Märkten für Industrieroboter. Die Neuinstallationen von Industrieroboter in einigen Ländern für 2019 ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

Geschätzte Neuinstallationen von Industrierobotern in 2019

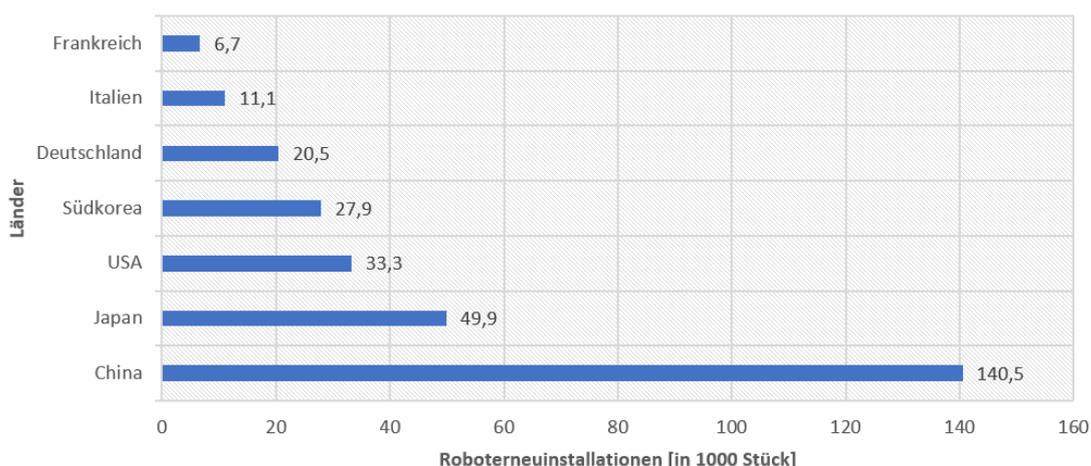


Abb. 1 Internationaler Vergleich von Roboterneuinstallationen¹

¹ Eigene Illustration anhand von IFR, 2021a

Ein Großteil der in Deutschland und international eingesetzten Roboter entfällt allerdings auf die Automobilindustrie (IFR, 2021b). Für die Baubranche werden durch die IFR keine repräsentativen Zahlen erhoben, da die Baubranche kein großer Absatzmarkt für typische Industrieroboter ist. Ein problemloser Einsatz von stationären Robotern, wie sie beispielsweise in der Fertigungs- oder Automobilindustrie eingesetzt werden, ist auf Baustellen nicht ohne weiteres möglich.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es daher, einen Beitrag zur Entwicklung von mobilen Roboterplattformen für den Einsatz in Bauprojekten zu leisten. Mit Hilfe dieser Robotersysteme sollen Bauleistungen teilweise oder vollständig hergestellt sowie Arbeitsprozesse automatisiert werden. Zunächst werden Grundlagen für einen Robotereinsatz aufgeführt und erläutert. Im Anschluss werden die Teilschritte, die sich bei einem solchen Einsatz ergeben, definiert, voneinander abgegrenzt und individuell beschrieben. Im Hauptteil der Arbeit wird einer dieser Schritte, die Durchführung der handwerklichen Arbeiten, genauer untersucht. Hierfür werden zunächst Prozessanalysen für Gewerke des Innenausbaus und der Flachdachkonstruktion durchgeführt. Die handwerklichen Prozesse werden dabei abstrahiert und in Bezug auf eine mögliche Automatisierung bewertet. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Verwendung und Spezifikation von Werkzeugen. Hierfür werden Möglichkeiten und Probleme für die Gestaltung und Nutzung von unterschiedlichen Werkzeugen durch einen Roboter aufgezeigt. Im nächsten Schritt sollen diese Werkzeuge und die handwerklichen Vorgänge digital abgebildet werden. Dafür wird das Programm „Autodesk Fusion 360“ eingesetzt, um die Werkstücke und Werkzeuge zu modellieren und den Vorgang anschließend zu simulieren. Diese Simulationen werden anschließend durch den Export von maschinennahem Quellcode in die Realität übertragen. Die Simulationsdaten werden in einen Roboter der Firma Universal Robots geladen und dieser mit einem Schleifgerät ausgerüstet, um die Oberfläche von Trockenbauplatten abzuschleifen. Die Schnittstellen zwischen Programm und Roboter sowie der Aufbau und die Durchführung des Tests sind dabei ausführlich dokumentiert.

Im Anschluss werden die durchgeführten Simulationen und Robotertest in Hinblick auf ihre Schnittstellen untersucht und ausgewertet. Dabei werden insbesondere Fehlerquellen und Komplikationen für den Weg vom digitalen Abbild bis hin zum echten Robotertest erläutert. Abschließend werden außerdem weitere baupraktische Applikationen für die angewendete Methodik aufgeführt.

2 BISHERIGE ERKENNTNISSE AUS FORSCHUNG UND PRAXIS ZUM EINSATZ VON ROBOTERN IM BAUWESEN

Mit dem Einsatz von Robotern im Bauwesen beschäftigen sich insbesondere japanische und amerikanische Wissenschaftler seit den 1980ern. Dabei kamen zunächst einfache Roboter zum Einsatz, sogenannte Single-Task Construction Robots (STCRs), die einzelne Aufgaben übernehmen sollten (Saidi, O´Brien und Lytle, 2008, S. 1081). Bereits damals zeichnete sich auf Grund der demographischen und sozialen Entwicklungen ein Fachkräftemangel in der Baubranche ab. Diese Probleme sind ebenfalls in Deutschland relevant und stellen mittlerweile eine große Herausforderung für die Unternehmen dar. Die Entwicklung wird durch verschiedene Studien und Berichte, beispielsweise von SOKA-Bau oder Offensive Gutes Bauen, bestätigt (SOKA-Bau, 2018; Offensive Gutes Bauen, 2014). Um dem entgegenzuwirken, forschen unter anderem Hochschulen und die Industrie an neuen Methoden und Möglichkeiten, um vermehrt Roboter für verschiedene Bauprozesse einzusetzen. Im Folgenden werden zunächst prägnant Beispiele zur Robotik im Bauwesen aus Theorie und Praxis aufgeführt. Abschließend werden spezifische Anforderungen und Voraussetzungen, die die Grundlage für einen effizienten Robotereinsatz darstellen, genauer erläutert.

2.1. PRAKTISCHE FORSCHUNGSPROJEKTE

Für den konkreten praktischen Einsatz von Robotik gibt es verschiedene Forschungsprojekte und innovative Hersteller. Diese beschäftigen sich dabei üblicherweise mit einer speziellen Anwendung oder einem spezifischen Gewerk. Beispielsweise beteiligt sich das Institut für Bauinformatik der TU Dresden an einem Forschungsprojekt in Kooperation mit der Dresdner Dachdeckerfirma Dachdeckermeister Claus Dittrich GmbH & Co. KG sowie der Chemnitzer Zweigstelle der Firma BEAS Technology zur Entwicklung einer mobilen Roboterplattform für Flachdacharbeiten. Dabei soll das Konzept für eine autonome Roboterplattform entwickelt werden. Diese soll Dämmplatten in Standardgrößen direkt auf dem Flachdach aufnehmen, zum Einbauort transportieren und die Platten mit Hilfe des entsprechenden Klebstoffs nach Vorlage des Verlegeplans verkleben. Hierbei bestehen die Herausforderungen zum einen in der Navigation und Bewegungsplanung und zum anderen auch in Präzision und Geschwindigkeit der Ausführung der handwerklichen Arbeitsschritte.

Ein anderes Beispiel aus der internationalen Industrie ist der Malerroboter der Firma Okibo mit Sitz in Petach Tikwa, Israel (Okibo, 2021). Die Plattform ist mit einem Roboterarm ausgestattet, der mit Hilfe einer Vertikalachse zusätzlich verschoben werden kann.

2 Bisherige Erkenntnisse aus Forschung und Praxis zum Einsatz von Robotern im Bauwesen

Dadurch kann die Auslegerlänge des Roboterarms gering gehalten und ein günstigeres sowie leichteres Modell eingesetzt werden. Zusätzlich werden die Bewegungen und die Umgebung durch eine Vielzahl von Sensoren und komplexe Algorithmen überwacht und gesteuert, wodurch der Roboter in der Lage ist, seine Umgebung dreidimensional abzubilden. Außerdem werden in den selbstständig erstellten Arbeitsablaufplänen auch Lücken in Wänden erkannt und diese dementsprechend beim Streichen übergangen. Die mobile Plattform selbst lässt sich durch zwei Lenkrollen steuern und wird über zwei Gummirollen angetrieben. Das Gesamtkonzept ist für den Baustelleneinsatz ausgelegt, der Roboter kann sich autonom bewegen und somit eigenständig arbeiten. Der Hersteller hat außerdem Videos veröffentlicht, in denen ein Werkzeugwechsel von der Farbdüse zu einem Glätter zum Verputzen zu sehen ist (Okibo, 2019). Der Roboter ist somit modular einsetzbar.

Dieser Malerroboter der Firma Okibo wurde bereits von der Zweigstelle SID der Firma Ed. Züblin auf einer Baustelle in Esslingen für das Streichen von Wänden und Decken getestet, Abbildung 2. Weitere Beispiele für praxisorientierte Robotereinsätze wie der Mauerroboter SAM 100 oder der InSitu Fabricator werden bei Fuchs (2020, S. 3 ff.) beschrieben und erläutert.



Abb. 2 Okibo Roboter auf Züblin Baustelle Esslingen, Baden-Württemberg²

² Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=J28CnfAbNLY>

2.2. THEORETISCHE FELDSTUDIEN UND LITERATUR

Neben der Entwicklung praktischer Projekte widmen sich auch diverse theoretische Arbeiten dem Einsatz von Robotern im Bauwesen. Dabei kann die Planung und Konzeption spezieller Robotereinsätze durchgeführt werden. Oftmals wird auch eine Übersicht von verschiedenen Technologien und Verwendungsmöglichkeiten aufgestellt, um den Ausreichungsgrad und die Funktionalität verschiedener Systeme und Hersteller zu vergleichen.

Bock und Linner (2015, S. 125) beschreiben beispielsweise Methoden und Konzepte, um bereits bei der Projektplanung moderne Technologien und Produkte zu berücksichtigen. Sie geben dabei Vorschläge, wie diese eingesetzt und implementiert werden können. Außerdem verweisen sie auf den Einsatz von Automatisierungstechnik in anderen Branchen wie den Schiff- und Flugzeugbau. Darüber hinaus erläutern sie, wie die dort eingesetzten Methoden auf die Bauindustrie übertragen werden können.

Um die derzeitigen Trends und Entwicklungen in der Bauindustrie zu beschreiben, haben Bock und Linner (2016) eine umfassende Übersicht mit 200 verschiedenen STCRs in 24 Kategorien erstellt. Die Projekte reichen von kleinen unbemannten Drohnen zur Vermessung von Bauwerken bis hin zu großen, komplexen Robotern zum Einbau von Bewehrung. Dabei gibt es bereits marktreife Projekte aus der Industrie von Herstellern wie Volvo oder Kajima Cooperation. Es gibt aber auch laufende Hochschulprojekte, beispielsweise am Institute for Advanced Architecture of Catalonia (Bock und Linner, 2016, S.32 ff.).

Die Projektarbeit von Fuchs (2020) dient als Grundlage für die vorliegende Diplomarbeit, da dort bereits ein Vergleich zwischen dem Rohbau und dem Innenausbau für Hochbauten aufgestellt wurde. Dabei hat sich gezeigt, dass der Innenausbau wesentliche Vorteile besitzt. Beispielsweise ist der Einfluss von Temperatur und Witterung, im Gegensatz zu Rohbaustellen unter freiem Himmel, nahezu vernachlässigbar. Des Weiteren ist der Arbeitsraum durch die Taktung der Gewerke wesentlich übersichtlicher und es kann strukturierter geplant werden. Außerdem wurden im weiteren Verlauf der Projektarbeit die unterschiedlichen Gewerke des Innenaubaus im Hinblick auf eine mögliche Automatisierung bewertet und verglichen. Dabei wurde unter anderem die Anzahl und auch das Gewicht der verwendeten Werkzeuge und Materialien berücksichtigt. Auf diese Methodik und auch auf die Teilergebnisse der Projektarbeit wird im weiteren Verlauf der Diplomarbeit zurückgegriffen.

Die Bedeutung von Robotik im Bauwesen hat mittlerweile immens zugenommen, sodass Universitäten eigenständige Studiengänge zu diesen Fachgebieten anbieten. Beispielsweise gibt es an der RWTH Aachen den internationalen M.Sc. Studiengang „Construction and Robotics“ (RWTH Aachen, 2021).

2.3. ERARBEITETE GRUNDLAGEN FÜR EINEN ROBOTEREINSATZ

Durch die Baustellenbegehungen und die Zusammenarbeit mit den Praxispartnern wurden fünf Aspekte, welche im Folgenden genauer beschrieben werden, als Voraussetzungen für einen effizienten Robotereinsatz erarbeitet:

- Zugang zu einem BIM Modell
- Eigengewicht innerhalb der Eurocode Bemessungsgrundlagen
- Mechanische Belastbarkeit des Untergrunds
- Verlässliches Orientierungssystem
- Barrierefreier Arbeitsraum

Die Umsetzung eines Roboterkonzepts ist auch ohne die vollständige Erfüllung aller Voraussetzungen möglich, jedoch wird dadurch die Komplexität der Plattform und die Anforderungen an die technische Ausstattung gesteigert. Daher ist die Erfüllung eines Großteils der Voraussetzungen für die Beschleunigung der technischen Umsetzung erstrebenswert.

Zugang zu einem BIM Modell:

Die Idee des Building Information Modelling (BIM) umfasst die dauerhafte Abbildung und Nutzung der Projektinformationen in einer digitalen Datenbank. Unter anderem werden in einem solchen Modell Geometrie und Materialinformationen aber auch Planungsabschnitte und Projektstrukturen festgehalten und ausgetauscht. (Borrmann, König und Koch, 2018)

Um einen Roboter effizient einzusetzen, muss er in der Lage sein, auf die Informationen aus dem BIM Modell zuzugreifen und intern zu verarbeiten. Mit diesen Daten können durch die entsprechende Software Arbeitsablauf- und Bewegungspläne für den Roboter erstellt werden. Idealerweise findet der Informationsaustausch in beide Richtungen statt, sodass der Roboter wiederum auch Informationen in das Modell einspeist, um beispielsweise fertiggestellte Bereiche als solche im Modell zu kennzeichnen. Theoretisch wäre eine Umsetzung auch ohne den Informationsaustausch zwischen BIM Modell und Roboter möglich. In diesem Fall müssen jedoch die gesamten Umgebungsinformationen durch Kameras und Sensoren erfasst und verarbeitet werden. Dadurch würde die Komplexität von Hard- und Software immens gesteigert werden.

Um den Umfang und auch die Kosten eines solchen Robotereinsatzes niedrig zu halten, empfiehlt es sich, das BIM Modell als Grundlage zur Planung heranzuziehen. Hierbei ist außerdem auf die ausreichend große Detail- und Informationstiefe, eng. „level of detail“ (LoD) und „level of information“ (LoI), zu achten. Abhängig vom Arbeitsvorgang reicht dabei beispielsweise die Übergabe von Aussparungen in Wänden aus, oder es müssen

exakte Positionen von Fliesen, Fugen oder Schrauben übergeben werden. Die Spezifikationen des LoD und Lol sind exemplarisch in der EN ISO 19650 angegeben, sollten aber projektbezogen in der Planungsphase festgelegt werden.

In Bezug auf das Flachdach ist nicht zwingend ein BIM Modell notwendig. Für den Robotereinsatz müssen jedoch die entsprechenden Pläne zu Dachabmessungen und der Verlegeplan der Dämmplatten vorhanden sein, um den digitalen Informationsaustausch mit dem Roboter zu ermöglichen. Insbesondere bei einer ausschließlich zweidimensionalen (2D) Zeichnung ist zu klären, ob das LoD und Lol für einen effizienten Robotereinsatz ausreicht.

Eigengewicht innerhalb der Eurocode Bemessungsgrundlagen:

Neben der mechanischen Beanspruchung, muss auch die rein statische Belastung auf die Tragwerkskonstruktion möglichst gering gehalten werden. Durch das Gesamtgewicht des Roboters und der Auflagerfläche des Fahrwerks entstehen veränderliche Lasten. Nach Eurocode 1 und DIN V ENV 1991-2-1 sind Lasten von bis zu 2 kN/m² als Standardfall in Wohnungen abgedeckt. Diese Grenze sollte bei dem Design und der Planung der Plattform eingehalten werden, um keinen Mehraufwand für die statische Berechnung zu schaffen. Daher ist es ratsam zum einen die Gesamtmasse des Roboters gering zu halten. Dazu können Leichtbauroboter mit einem geringen Eigengewicht und ausreichend hoher Nutzlast gewählt werden. Und zum anderen muss die Auflagerfläche des Fahrwerks für eine optimale Lastverteilung sorgen. Die konkreten Zahlen und Kennwerte müssen im Einzelfall geprüft werden.

Mechanische Belastbarkeit des Untergrunds:

Bezüglich des Innenausbaus wird davon ausgegangen, dass die Plattform entweder die Rohbaudecke der Wohnungen oder den eingebauten Estrich befahren wird. Beton 20/25 oder höher ist dabei für Deckenplatten üblich, die Festigkeitsklasse und Richtwerte sind nach DIN 1045-2 festgelegt. Um den Widerstand gegen mechanische Beanspruchung zu erhöhen, kann die Anforderung an die Expositionsklasse des Betons auf bis zu XM3 angepasst werden. Sollte es dennoch zu geringfügigem Abrieb kommen, kann dieser durch die weiteren Aufbauschichten ausgeglichen werden. In Bezug auf die Estrichschicht ist auf die vollständige Trocknung und Festigkeitsentwicklung zu achten, dann kann die nach DIN 18560-1&3 angegebene Druck- und Biegezugfestigkeit, sowie der Verschleißwiderstand nach Böhme angesetzt werden. Durch die Erhöhung der Verschleißwiderstandsklasse, beispielsweise durch Zugabe von Hartstoffen auf die frische Estrichoberfläche, kann ebenfalls der mögliche Abrieb gemindert werden.

Für den Fall des Flachdachs gelten für die Stahlbetondecke ebenfalls die oben genannten Aspekte für Betonfestigkeit und Verschleißwiderstand. Da es sich zusätzlich um ein außenliegendes Bauteil handelt, sind die Anforderungen ohnehin größer als bei Zwischendecken. Daher sollten beim Befahren der Oberfläche wenig Abrieb oder mechanische

Beschädigungen entstehen. Für die jeweiligen Konstruktionsschichten des Flachdachs wie Dampfsperre oder Abdichtungsbahn ist ein Abgleich mit dem Datenblatt für die Druckfestigkeit erforderlich. Bezüglich des Abriebs empfiehlt sich ein realistischer Praxistest, da insbesondere die Temperaturen auf dem Flachdach und eine mögliche Erweichung des Materials zu berücksichtigen sind.

Verlässliches Orientierungssystem:

Damit der Roboter autonom arbeiten kann, muss er seine Position innerhalb des Gebäudes bzw. auf dem Dach bestimmen können. Die genaue Navigation und Positionierung sowie die Ausrichtung der Plattform ist für die fachgerechte Durchführung der Arbeitsschritte zwingendermaßen erforderlich. Je nach Ausführung und Programmierung des Gesamtsystems ist es denkbar, dass geringe Abweichungen bei der Positionierung durch die Gelenke und Achsen des Roboterarms kompensiert werden können. Hierbei ist auf den Abgleich der digitalen Information mit der tatsächlichen Umgebung des Roboters zu achten, um die Abweichungen möglichst exakt zu bestimmen. Für die Navigation und Orientierung der Plattform gibt es verschiedene technische Systeme. Für das Befahren von vorgegeben Strecken können z.B. auf dem Boden Markierungen oder Leitlinien angebracht werden. Die Firma FlexQube nutzt für ihre EQarts eine Farbmarkierung auf Kontrastbasis, siehe Abbildung 3. Dafür kann einfaches Klebeband in verschiedenen Farben genutzt werden, welches sich vom Untergrund unterscheidet. Dadurch wird die exakte Strecke abgeklebt und es können außerdem unterschiedliche Farben für langsame und schnelle Geschwindigkeitsbereiche eingesetzt werden. Der Hersteller Fusion-Systems nutzt im Gegensatz zu Farbmarkierungen, Drähte, die auf dem Untergrund verlegt werden, um die sog. MULIs zu navigieren. Durch die Drähte fließt dabei eine niedrige Spannung mit niedriger Frequenz, die mit Hilfe von internen Messgeräten erkannt wird und die Leitlinie für das Fahrzeug vorgibt. Neben Leitliniensystemen gibt es auch Möglichkeiten über Triangulation oder verschiedene Kommunikationstechnologie die Fahrzeuge zu navigieren.

Für Arbeiten unter freiem Himmel wie dem Flachdach wäre ein System mit GPS-Technologie denkbar. Für die Positionsbestimmung gehört es zu den am meisten genutzten Technologie. Die Genauigkeit wird jedoch durch viele Faktoren beeinflusst, unter anderem auch durch das Wetter und Atmosphärenverhalten, auf welche man als Endnutzer keinerlei Einfluss hat (Dudek und Jenkin, 2008, S.485). Ob die Genauigkeit des technischen Systems für die fachgerechte Ausführung der Arbeiten ausreicht, ist daher entsprechend zu prüfen.



Abb. 3 EQart der Firma Flexcube in der Handwerkskammer Dresden³

Barrierefreier Arbeitsraum:

Um die Bewegungen des Roboters möglichst wenig einzuschränken, sollte der Arbeitsbereich barrierefrei gestaltet werden. Theoretisch können mit dem entsprechenden Fahrwerk kleinere Unebenheiten wie Kabel oder Türschwellen überwunden werden, Treppenstufen oder Kanthölzer stellen dabei jedoch ein zu großes Hindernis dar. Außerdem sollte der Arbeitsbereich grob besenrein sein, um eine Ablagerung von Staub und Schmutz an Robotergelenken, Kabeln und Elektronik zu verhindern. Des Weiteren müssen die allgemeine Sauberkeit und Ordnung im Arbeitsbereich, insbesondere was Lagerflächen für Material und Werkzeuge anbelangt, gegeben sein. Für die meisten autonomen Transportfahrzeuge gibt es Richtwerte, welche Steigung sie bewältigen können. Trotzdem sollte ein Praxistest mit der konkreten Zuladung und dem entsprechenden Untergrund durchgeführt werden, um die Angaben zu verifizieren. Beispielsweise sind die MiR Transportfahrzeuge von UR in der Lage, eine Steigung von bis zu 5% zu bewältigen (Jugard+Künstler GmbH, 2021).

³ Quelle: Eigene Aufnahme

3 PROZESSANALYSE EINES ROBOTEREINSATZES

Der Gesamtprozess des Einsatzes eines mobilen Roboters auf einer Baustelle besteht aus einer Vielzahl von komplexen und zusammenhängenden Einzelschritten. Es gibt dabei zum einen Herausforderungen für die Baustellenlogistik, zum anderen aber auch für den Datenaustausch und dessen Schnittstellen. Weiterhin gibt es auch technische Hürden für die Ausführung der vorgesehenen Arbeiten. Derzeit gibt es keine Regularien oder DIN-Normen, die die Planung und die Umsetzung eines solchen Einsatzes strukturieren oder Empfehlungen vorgeben. Daher wurde im Folgenden exemplarisch eine Unterteilung in Teilprozesse durchgeführt und dabei jeweils die Probleme, Hindernisse und Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Wertschöpfungskette des Gesamtprozesses mit den sechs Teilschritten ist in Abbildung 4 dargestellt. Diese Unterteilung ist als Ansatz bzw. Vorschlag für Weiterentwicklung und Diskussion zu betrachten und nicht als feste Vorgabe.

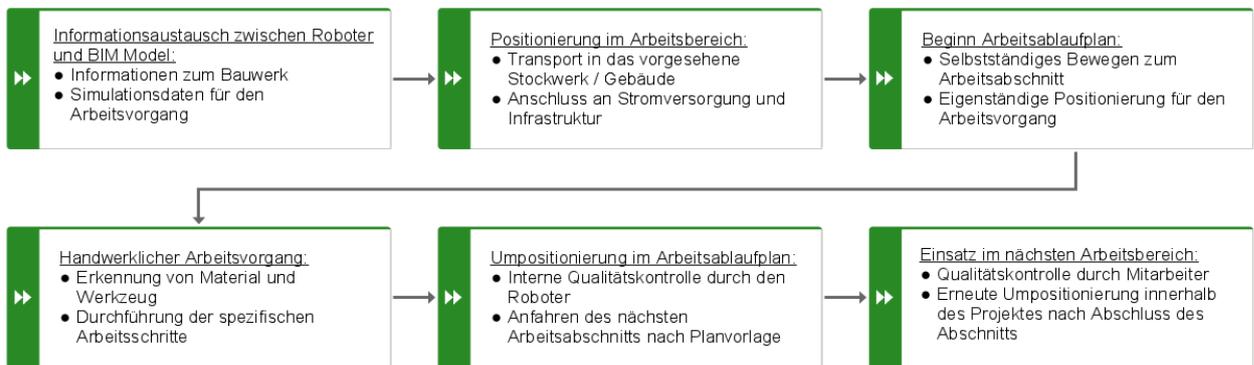


Abb. 4 Gesamtprozess Robotereinsatz⁴

3.1. INFORMATIONSAUSTAUSCH

Bevor der Roboter in einen Bauprojekt eingesetzt wird, empfiehlt es sich, größere Datenmengen und Informationen im Vorhinein in den internen Speicher der Roboterplattform zu laden. Somit kann dieser direkt nach Ankunft auf der Baustelle eingesetzt werden, ohne auf weitere digitale Konfigurationen zu warten. Wenn neben den erforderlichen Startinformationen auch sämtliche Projektdaten gespeichert werden, könnte der Roboter bereits autark ohne einen dauerhaften Datenaustausch arbeiten. Hierfür muss jedoch zwingend drauf geachtet werden, dass ab diesem Zeitpunkt keine Veränderungen in dem Arbeitsumfeld des Roboters vorkommen. Sollte sich beispielsweise der Arbeitsbereich verändern oder Materialien an einer anderen Stelle gelagert werden, müssen diese neuen Informationen an den Roboter übergeben werden. Außerdem muss bei dieser Vorgehensweise auf einen ausreichend großen Datenspeicher geachtet werden, um sämtliche

⁴ Quelle: Eigene Illustration

Projektinformationen vorab zu speichern. Die wichtigste Quelle für die Projektinformationen stellt dabei das bereits in Kapitel 2.3 beschriebene BIM Modell dar.

Ist der dauerhafte Informationsaustausch zwischen Roboter und Projektdatenbank geplant, können die notwendigen Informationen abschnittsweise übergeben werden. In diesem Fall sind die Daten zu dem Arbeitsbereich, in dem sich der Roboter während des Arbeitsvorgangs befindet, ausreichend. Arbeitet der Roboter beispielsweise im Erdgeschoss eines Gebäudes, so ist er zu diesem Zeitpunkt nicht auf Informationen über andere Stockwerke oder Gebäude angewiesen. Auf diese Weise kann die interne Datenmenge und die Verarbeitung reduziert werden. Der Großteil der Datenspeicherung und -verarbeitung kann dadurch auf ein dediziertes Rechenzentrum ausgelagert werden. Dieses könnte beispielsweise in den Büros der Bauleitung mit eingerichtet werden. Außerdem können durch den dauerhaften und gestaffelten Austausch auch kurzfristig Veränderungen an den Informationen vorgenommen werden. Der dauerhafte Datenaustausch kann entweder kabelgebunden oder kabellos über Mobilfunk sowie über kurze Strecken mit WLAN erfolgen. Die Funktionsweise einer solchen Dateninfrastruktur ist bei der Baustellen- und Projektplanung zu berücksichtigen.

3.2. POSITIONIERUNG DES ROBOTERS IM ARBEITSBEREICH

Nachdem der Roboter auf der Baustelle angeliefert wurde, muss er in den vorgesehenen Arbeitsbereich transportiert werden. Dieser Bereich umfasst mehrere Räume und Wohnungen innerhalb eines Stockwerks, in dem der Roboter für die geplante Taktung eingesetzt wird. Je nach Abmessungen und Gesamtgewicht der Plattform kommen für den Transport zwischen den Stockwerken Krane, Hebebühnen oder ggf. der hausinterne Aufzug in Frage. Nach DIN 18040-2 sollen im Wohnungsbau entweder Typ 2 oder Typ 3 Aufzüge verbaut werden. Somit könnte mit einem Typ 3 Fahrstuhl ein Gesamtgewicht von bis zu 1.275 kg zwischen den Stockwerken transportiert werden. Der Malerroboter der Firma Okibo kommt beispielsweise auf ein Gesamtgewicht von ca. 500 kg (Robotik Steckbrief Ed. Züblin AG, 2021). Der horizontale Transport, also die Bewegung innerhalb des Arbeitsbereichs und des Stockwerks, soll eigenständig durch den Antrieb der Plattform erfolgen. Hierbei ist insbesondere auf die Abmessungen der Plattform zu achten, um Wohnungs- und Zimmertüren durchfahren zu können. Die Breite von Innentüren ist in der DIN 18101 geregelt und von der Türhöhe abhängig. Im Wohnungsbau ist im Regelfall mit einer Breite von 86 cm oder 98,5 cm für einfache Türen zu rechnen. Bei bereits verbauten Türzargen ist außerdem auf die Breite der Zargen und das tatsächliche lichte Durchgangsmaß zu achten. Innerhalb des Arbeitsbereichs müssen außerdem die notwendigen Medien wie Strom oder auch Druckluft sowie Wasser angeschlossen werden. Je nachdem wie der Informationsaustausch gestaltet ist, muss auch ein Datenkabel hinzugefügt oder die kabellosen Sender und Empfänger aufgestellt werden. Für den Anschluss an die Baustelleninfrastruktur könnten die ohnehin genutzten Stromkästen verwendet werden.

Üblicherweise werden diese im Treppenhaus jedes Stockwerks aufgestellt, um die Stromversorgung für die Werkzeuge der Handwerker zu ermöglichen, siehe Abbildung 5.



Abb. 5 Stromkasten, Züblin Baustelle Dessauer Straße in Leipzig⁵

3.3. BEGINN DES ARBEITSABLAUFPLANS

Mit dem Einschalten des Roboters im Arbeitsbereich beginnt der Arbeitsablaufplan. In diesem Plan sind alle Arbeitsabschnitte des Bereichs festgelegt und die Lagerstätten für die jeweiligen Werkzeuge und Materialien vermerkt. Ein Arbeitsabschnitt ist dabei ein Teil des Arbeitsbereichs, er kann sich beispielsweise um eine Stütze handeln, die gestrichen werden muss oder eine Trockenbauwand, die geschliffen werden soll. Des Weiteren sind in dem Arbeitsablaufplan die Koordinaten der Positionierung sowie Angaben zur Ausrichtung der Roboterplattform für den handwerklichen Arbeitsvorgang hinterlegt. Außerdem muss die Navigation zwischen den Arbeitsabschnitten geplant und abgespeichert werden. Hierfür eignen sich verschiedene Ansätze, um entsprechende Navigationsalgorithmen für den Roboter zu erstellen. Unter anderem kann dafür die Graphentheorie eingesetzt werden, um beispielsweise mit einem Dijkstra Algorithmus den kürzesten gerichteten Pfad zwischen den Koordinaten zu ermitteln (Noltemeier, 2019, S.103).

⁵ Quelle: Eigene Aufnahme

3.4. DURCHFÜHRUNG DES ARBEITSVORGANGS

Sobald der Roboter sich in seinem Arbeitsabschnitt eingefunden hat, kann der Arbeitsvorgang beginnen. Um diesen Robotereinsatz zu planen und schlussendlich auch zu programmieren, muss zunächst der handwerkliche Prozess analysiert werden. Daraus ergeben sich einzelne Arbeitsschritte sowie notwendige Materialien und Werkzeuge. Je nachdem welche Arbeiten verrichtet werden, kann das Material dann beispielsweise entweder direkt auf der Plattform zwischengelagert werden oder es kann eine Art „Anhängers“ für das Ablegen eingesetzt werden, gleiches gilt für die Werkzeuge. Wird das Material nicht in direkter Nähe des Roboters gelagert, muss dieser immer wieder zum Ablageort zurückfahren, was zusätzliche Zeit und Leistung in Anspruch nimmt. Beim Ausbringen von fließendem Material wie Farbe oder Putz bietet sich ein Konzept mit einem Pump- und Fördergerät an, sodass nur der Schlauch an dem Roboter befestigt werden muss. Die Maschine wird zentral im Arbeitsbereich aufgestellt und das Material zum Roboter befördert (siehe Abbildung 6 und 7). Somit könnte ein bereits bestehendes Konzept mit geringem Aufwand an den Roboter angepasst werden. Die Düse zum Ausbringen des Materials kann anschließend am Endeffektor des Roboters befestigt werden. Für die Ausführung der verschiedenen Arbeiten muss sich die Plattform vor dem Bauteil positionieren und den erreichbaren Bereich abarbeiten. Der Roboter muss sich je nach Vorgang und Auslegerlänge dabei mehrfach umpositionieren bis beispielsweise ein Raum vollständig gestrichen ist. Hierfür muss ein Algorithmus erstellt werden, der diese Parameter berücksichtigt und einen spezifischen Arbeitsplan für das Bauteil und den Roboter erstellt. Außerdem müssen ggf. Stützsysteme ausgefahren werden, um die Stabilität und Kippsicherheit zu gewährleisten. Da die Gewerke aufeinander aufbauen, ist es sinnvoll den Roboter zunächst eine Aufgabe im gesamten Arbeitsbereich ausführen zu lassen bevor er neue Werkzeuge und Materialien für das anschließende Gewerk benötigt.

3 Prozessanalyse eines Robotereinsatzes



Abb. 6 Airless Gerät für Malerarbeiten, Züblin Baustelle Dessauer Straße in Leipzig⁶



Abb. 7 Putzmischpumpe, Züblin Baustelle Bernhard-Görling-Straße in Leipzig⁷

⁶ Quelle: Eigene Aufnahme

⁷ Quelle: Eigene Aufnahme

3.5. UMPOSITIONIERUNG NACH ARBEITSABLAUFPLAN

Nach Fertigstellung eines Abschnitts, beispielsweise dem Streichen eines Raums oder dem Verlegen von Dämmplatten auf einem Flachdach, muss sich der Roboter in den nächsten Abschnitt bewegen. Abhängig vom Anschluss der Versorgungsmedien, wie Strom, Wasser oder Druckluft müssen diese zunächst ab- und im neuen Arbeitsabschnitt wieder an die Roboterplattform angesteckt werden. Anschließend navigiert und bewegt sich der Roboter selbstständig zu seinem nächsten Arbeitsort und setzt dort die Arbeiten fort. Die Reihenfolge, in welcher der Roboter die verschiedenen Abschnitte abarbeitet, ist im Arbeitsablaufplan festgelegt. Zusätzlich sollte eine interne sowie externe Qualitätskontrolle durchgeführt werden, um die fachgerechte Ausführung der Arbeiten, sowie die Qualität der Leistung zu überprüfen. Diese könnte beispielsweise über interne Kameras und Sensoren oder über eine Begehung durch die Bauleitung erfolgen. Sollten dennoch Mängel auftreten, kann der Roboter in dem Abschnitt verbleiben und die Arbeiten erneut ausführen, bevor er sich weiterbewegt. Dadurch wird überflüssiges Hin- und Herfahren vermieden.

3.6. EINSATZ IM NÄCHSTEN ARBEITSBEREICH

Nachdem der Roboter die vorgesehenen Arbeiten in einem Arbeitsbereich erledigt hat, kann er in den nächsten Bereich umgesetzt werden. Wenn diese Bereiche in Stockwerke unterteilt sind, handelt es sich erneut um einen vertikalen Transport, der beispielsweise mit dem Aufzug durchgeführt werden kann. Für das Flachdach können Arbeitsbereiche einzelne Dächer sein oder bei großen Projekten Dachabschnitte sein. Im ersten Fall muss der Roboter durch einen Kran von einem Dach zum anderen umgesetzt werden, im zweiten Fall ist ggf. eine eigenständige Bewegung zum nächsten Arbeitsbereich möglich. Nachdem der Roboter seinen neuen Arbeitsbereich erreicht hat, beginnt der Zyklus mit Informationsaustausch und den weiteren Teilschritten von vorne. Abschließend ist zu beachten, dass der Roboter am Ende des Projekts aus dem letzten Arbeitsbereich herauskommen muss. Insbesondere wenn externe Kräne für den Transport eingesetzt wurden, können diese erst nach Abschluss des Robotereinsatzes zurück gebaut werden. Wurde der hauseigene Aufzug benutzt, ist darauf zu achten, dass der Ausgang des Gebäudes barrierefrei gestaltet wurde, um das Gebäude verlassen zu können. Ist eine Tiefgarage vorhanden, biete sich diese als zusätzlicher Ausgang an.

4 ANALYSE VON BAUPROZESSEN IM HINBLICK AUF AUTOMATISIERUNGSPOTENTIAL UND WERKZEUGEINSATZ

Bevor ein Prozess automatisiert werden kann, muss er analysiert und abstrahiert werden. Aus dieser Analyse ergeben sich die Anforderungen und Funktionsweise des Vorgangs. Im Anschluss kann ein technisches System konzipiert und entwickelt werden, das die unterschiedlichen physikalischen Einflüsse und Informationen aufnimmt sowie verarbeitet. Mit Hilfe dieser verarbeiteten Informationen können wiederum verschiedene mechanische Komponenten des Systems angesteuert und Bewegungen sowie Aktionen ausgeführt werden (Litz, 2013, S.4).

Um das Automatisierungspotential von Bauprozessen zu bewerten, wird im Folgenden eine solche Analyse beispielhaft für je zwei Bauprozesse im Arbeitsbereich des Innenausbaus sowie des Flachdachs durchgeführt. Die Methodik der Analyse ist an Fuchs (2020) angelehnt. Dabei werden zunächst die einzelnen Arbeitsschritte des Vorgangs sowie die verwendeten Werkzeuge und Materialien aufgezählt. Außerdem werden die notwendige Traglast und die Einschränkungen im Arbeitsbereich beschrieben. Um eine große Traglast zu erreichen, müssen die Roboter größer und schwerer gestaltet werden. Eine niedrige Traglast ist daher von Vorteil. Je größer außerdem die Einschränkungen des Arbeitsbereichs sind und je mehr Werkzeuge und Materialien für den Vorgang benötigt werden, desto schwieriger gestaltet sich die Automatisierung. Es müssen dementsprechend mehr äußere Faktoren berücksichtigt und technische Komponenten konzipiert werden. Die vier Prozesse werden abschließend in einer Matrix zusammengefasst.

Des Weiteren wird für die Überschneidung des Werkzeugeinsatzes eine zusätzliche Matrix erstellt. Dabei soll deutlich werden, bei welchen Prozessen die gleichen Werkzeugtypen bzw. -arten eingesetzt werden. Hierfür wird auf die vorangegangene studentische Arbeit von Fuchs (2020) zurückgegriffen, in welcher die weiteren Gewerke des Innenausbaus beschrieben werden. Da die Roboterplattform perspektivisch nicht nur mit einem Werkzeug ausgestattet und für einen einzelnen Vorgang eingesetzt werden soll, ist der modulare Aufbau der Plattform vorgesehen. Beispielsweise können Vorrichtungen für den Wechsel von Werkzeugen eingebaut oder direkt mehrere Werkzeuge an einem Roboterarm konfiguriert werden. Dadurch können verschiedene Aufgaben und Gewerke mit derselben Plattform bearbeitet werden.

4.1. BAUPROZESSE IM ARBEITSBEREICH INNENAUSBAU

Zum Innenausbau, insbesondere im Wohnungsbau, gehört eine Vielzahl von verschiedenen handwerklichen Prozessen, welche auch als Gewerke bezeichnet werden. Üblicherweise werden bei einem größeren Bauprojekt dazu mehrere unabhängige Subunternehmen durch einen Generalunternehmer beauftragt und von diesem der Gewerkeplan entworfen, strukturiert und kontrolliert. Zu den typischen Gewerken gehört beispielsweise das Verlegen und die Installation von Haustechnik, aber auch der Einbau von

Trockenbauwänden oder der sog. „Finish“, dt. die Fertigstellung, von Oberflächen. Dazu zählen unter anderem das Streichen und Verputzen von Decken und Wänden. Da sich in der Untersuchung von Fuchs (2020) bereits gezeigt hat, dass insbesondere dieser „Finish“ von Oberflächen ein hohes Automatisierungspotential besitzt, werden zwei dieser Prozesse im Folgenden nochmals aufgegriffen und analysiert. Die hier genutzten Bilder und Informationen stammen von verschiedenen Baustellen in Leipzig des Praxispartners Ed. Züblin.

4.1.1. SCHLEIFEN UND VERSPACHTELN VON TROCKENBAUWÄNDEN

Trockenbauwände gehören durch ihre schnelle und günstige Konstruktionsweise zum Standard für nicht tragende Wände im Innenausbau. Die Wandsysteme bestehen aus einer Unterkonstruktion aus Stahlblechen, auf welchen die Bepankungen angeschraubt werden. Abhängig von den Vorgaben und der Konstruktionsweise wird der Hohlraum mit Wärme-, Schall- oder Brandschutzdämmung ausgefüllt. Laut Tichelmann und Pfau (2012) sind dabei die gipsgebundenen Plattenwerkstoffe als Bepankungen am meisten verbreitet. Alternativ werden im Wohnungsbau auch Holzwerkstoffplatten eingesetzt, diese besitzen jedoch einige Nachteile, wie die Hitzebeständigkeit oder der geringere Widerstand gegen Feuchtigkeit. Für den Finish der Oberfläche gibt es außerdem vier Qualitätsstufen, welche die Verspachtelung der Plattenfugen festlegen. Die Stufe 2, welche im Folgenden erläutert wird, gilt dabei als Standardverspachtelung für Wände und Decken. Im Anschluss zum Spachteln, müssen die verspachtelten Flächen meistens abgeschliffen werden, um beispielsweise Spachtelgrate oder Abdrücke zu korrigieren. Dadurch wird die Gleichmäßigkeit der Oberfläche sowie der ebene Übergang zwischen den Platten wiederhergestellt.

Für den ersten Arbeitsschritt muss die angerührte Spachtelmasse in die Fugen eingearbeitet werden, üblicherweise wird dabei mit den senkrechten Fugen und den Schraubenlöchern der Trockenbauplatte begonnen. Um die Masse in die Fuge zu streichen, wird eine Kelle verwendet. Anschließend werden die Fugen mit dem Glätter quer zur Fugenrichtung abgezogen. Bei der Qualitätsstufe 2 sollte außerdem ein Fugenband eingearbeitet werden, um Risse in der Spachteloberfläche vorzubeugen. Dieses wird bei einem zweiten Spachtelgang auf die Spachtelmasse aufgelegt und dünn überspachtelt. Nachdem die Spachtelmasse ausreichend getrocknet ist, kann die Oberfläche geschliffen werden. Hierfür sollte ein feines Schleifpapier mit einer Körnung zwischen 80 – 180 je nach Oberfläche und Schleifgang verwendet werden. Die Arbeiten werden innerhalb der Wohnungen ausgeführt. Die Einschränkungen des Arbeitsbereichs sind deshalb primär von der Raumhöhe abhängig, da die Platten bis zur Decke verspachtelt und geschliffen werden müssen. Da von einer Raumhöhe von mindestens 2,40 m ausgegangen werden kann, werden die Einschränkungen als mittelmäßig eingestuft. Der Arbeitsraum sollte außerdem besenrein sein und es dürfen in den Fugen keine Rückstände von Dreck oder Staub verbleiben. Die nötige Traglast des Roboterarms ist gering, da weder die Werkzeuge noch das Material

4 Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz

ein großes Eigengewicht mit sich bringen. Die verspachtelten Schraubenlöcher und Fugen sind beispielhaft in Abbildung 8. zu erkennen.

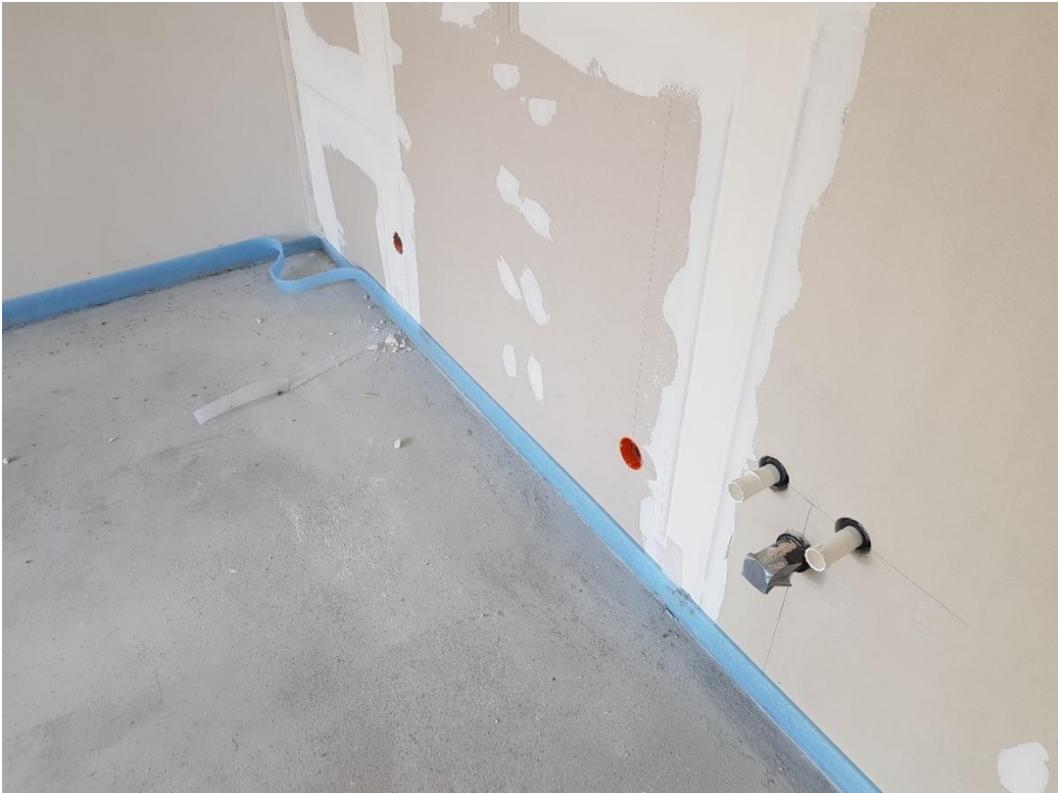


Abb. 8 Verspachteln von Fugen, Züblin Baustelle Bernhard-Göring-Straße in Leipzig⁸

Das Anbringen von Eckschienen und dauerelastischen Wandübergaben wird in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da es sich dabei um separate Vorgänge handelt, die nicht den Großteil des Gewerks abbilden. Diese Arbeiten könnten beispielsweise weiterhin durch Handwerker vorgearbeitet werden und der Roboter übernimmt im Anschluss die regelmäßigen Quer- und Längsfugen.

Insgesamt ergeben sich für das Verspachteln und Schleifen von Trockenbauwänden fünf Arbeitsschritte, wobei drei Werkzeuge und zwei Materialien eingesetzt werden. Die Einschränkung des Arbeitsbereichs ist mittelmäßig und die notwendige Traglast gering. Die Zusammenfassung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Zusammenfassung Verspachteln und Schleifen von Trockenbauwänden

	Arbeits-schritte	Werkzeuge	Materialien	Einschrän-kungen	Nötige Trag-last
Anzahl/Aus-maß	5	3	2	Mittelmäßig	Gering

⁸ Quelle: Eigene Aufnahme

4.1.2. STREICHEN VON WÄNDEN UND DECKEN

Für den optischen Finish der Oberflächen im Wohnungsbau werden häufig Farben oder Tapeten eingesetzt. Hierfür müssen verputzte Wände getrocknet und Trockenbauwände verspachtelt sowie geschliffen worden sein. Die Farbe kann konventionell per Farbrolle oder mit einem Airless-Gerät auf die Oberfläche aufgebracht werden. In der folgenden Analyse wird der Einsatz eines solchen Geräts angenommen. Außerdem wird für die Wandoberfläche eine Qualitätsstufe 2 Verspachtelung vorausgesetzt, die geschliffen, trocken und eben ist. Ebenso empfiehlt es sich, Anschlüsse der Haustechnik und Fensterrahmen abzukleben, um sie vor Farbspritzern zu schützen. Zusätzlich wird die Annahme getroffen, dass kein Malervlies als Untergrund für die Farbe an Wand oder Decke tapeziert werden muss.

Daraufhin kann als erster Schritt die Grundierung der Farbe aufgebracht werden. Dieser Tiefengrund muss insbesondere bei stark saugenden Materialien wie Putz oder Rigips aufgetragen werden. Hierfür kann bereits ein Airless-Gerät eingesetzt werden, jedoch nicht dasselbe wie für den Farbauftrag, da es einen extra Schlauch und Spritzpistole benötigt. Alternativ kann ein herkömmlicher Quast verwendet werden. Nach der Grundierung kann der erste Anstrich mit dem Farbsprühgerät erfolgen. Idealerweise wird dabei der Düsenkopf in einem konstanten Abstand mit einem 90° Winkel zur Wand kontinuierlich in eine Richtung bewegt. Je nach Deckungsgrad, Farbwirkung und Qualitätsanspruch kommt ein zweiter Anstrich hinzu, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Eine mit dem Airless-Gerät gesprühte Wand ist in Abbildung 9 dargestellt. Außerdem ist die Farbpistole zu erkennen, welche durch die Verlängerung leicht auch für hohe Wände und Decken verwendet werden kann. Bei einem Einsatz mit einem Roboter könnte auch nur der Düsenkopf der Farbpistole am Endeffektor befestigt werden. Der Malerroboter der Firma Okibo verzichtet beispielsweise auf eine sperrige Sprühpistole. Dabei muss der Roboter jedoch näher an der Wand stehen, um die Wand gleichmäßig streichen zu können. Der Arbeitsbereich beim Streichen verhält sich ähnlich zum Schleifen und Verspachteln, da ebenfalls bis zur Wandhöhe gestrichen werden muss. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn zusätzlich die Decken gestrichen werden sollen. Die Einschränkungen werden daher ebenfalls als mittelmäßig eingestuft. Es werden keine schweren Materialien oder Werkzeuge eingesetzt, da der Roboterarm nur den Düsenkopf des Airless-Geräts halten muss. Die notwendige Traglast wird daher als gering betrachtet.

4 Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz



Abb. 9 Farbsprühpistole und Handwerker, Züblin Baustelle Dessauer Straße in Leipzig⁹

Insgesamt sind für den Streichvorgang drei Arbeitsschritte sowie jeweils zwei Materialien und Werkzeuge notwendig. Die Einschränkungen des Arbeitsbereichs sind mittelmäßig und die nötige Traglast ist gering. Die Zusammenfassung ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Zusammenfassung Streichen von Decken und Wänden

	Arbeits- schritte	Werkzeuge	Materialien	Einschrän- kungen	Nötige Trag- last
Anzahl/Aus- maß	3	2	2	Mittelmäßig	Gering

⁹ Quelle: Eigene Aufnahme

4.2. BAUPROZESSE IM ARBEITSBEREICH FLACHDACH

Bereits vor ca. 8000 Jahren wurden im Gebiet der heutigen Türkei im großen Stil Flachdächer eingesetzt (Pech, Hubner und Zach, 2015, S.1). Insbesondere die Nutzung als zusätzliche Grünfläche war damals wichtig und erlebte mit einem der antiken Weltwunder, den hängenden Gärten von Babylon, ihren Höhepunkt. Auch heute ist die Begrünung einer der größten Vorteile des Flachdachs. So schreibt der Zentralverband der deutschen Dachdecker in seinem Faktenblatt zur Dachbegrünung, dass in Deutschland jährlich ca. 10 Millionen m² Dachfläche neu begrünt werden. Der Großteil entfällt dabei auf Flachdächer. Bei dem Bau von Wohnungen mit einem Flachdach ist insbesondere auf die Gewährleistung der Wärmedämmung zu achten, um die Energieverluste durch die Abgabe von Wärme durch die Dachkonstruktion zu mindern. Bei wasserempfindlichen Dämmplatten aus beispielsweise expandiertem Polystyrol-Hartschaum oder Mineralwolle spielt daher die Abdichtung der Dachkonstruktion und das Eindringen von Wasserdampf eine zentrale Rolle. Für Flachdächer gibt es dabei zwei maßgebende Konstruktionssysteme, zum einen das einschalige, nicht belüftete Warmdach und zum anderen das zweischalige, durchlüftete Kaldach. Der schematische Aufbau beider Konstruktionsweisen ist in Abbildung 10 dargestellt. Prinzipiell ist bei einem durchlüfteten Kaldach ein Luftaustausch für den Wasserdampf vorgesehen, weswegen eine zusätzliche tragende Konstruktion für den Hohlraum, beispielsweise in Form einer Holzschalung, eingebaut wird. Außerdem müssen wasserunempfindliche Dämmstoffe, wie beispielsweise extrudierter Polystyrol-Hartschaum, verwendet werden. Bei einem konventionellen Warmdach wird der Wasserdampf durch eine Dampfsperre am Eindringen in die Wärmedämmung gehindert. Zusätzlich zur Konstruktionsweise wird zwischen genutzten und nicht genutzten Dachflächen unterschieden. Die jeweiligen Anforderungen und Vorschriften sind in der ÖNORM B 2209-2 und 2220 geregelt. Des Weiteren wird für Flachdächer in der DIN 18531 ein Mindestgefälle von zwei Prozent sowie eine Maximalneigung von 10 Grad vorgegeben.

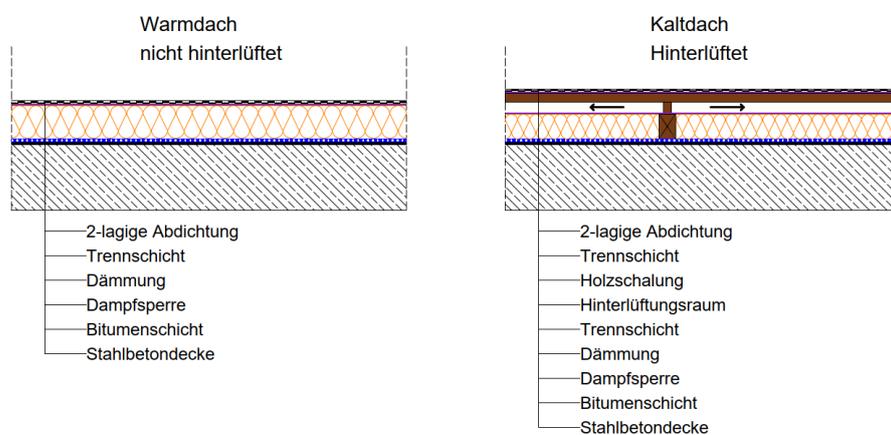


Abb. 10 Warm- und Kaldach schematischer Aufbau¹⁰

¹⁰ Quelle: Eigene Illustration

Im Folgenden wird eine Prozessanalyse für zwei Gewerke der Warmdachkonstruktion durchgeführt. Die dabei verwendeten Bilder und Informationen stammen zum Großteil von der Baustelle Thymianweg in Dresden des Praxispartners Dachdeckermeister Claus Dittrich GmbH & Co. KG. Die Unterkonstruktion für das Flachdach ist eine Stahlbetondecke mit Attika.

4.2.1. HAFTBRÜCKEN AUF BITUMENBASIS

Bitumen gilt als ein Abfallprodukt, dass bei der Veredelung von Rohöl anfällt. Durch den enormen Zuwachs der Erdölindustrie im 19. & 20. Jahrhundert wurde auch Bitumen als Werkstoff im großen Stil verfügbar. Laut der internationalen Vereinigung Eurobitume werden allein in Europa jährlich 15 Millionen Tonnen produziert (Eurobitume, 2021). In der Bauindustrie werden diese bitumenhaltige Baustoffe in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt, beispielsweise als Bindemittel im Straßenbau oder für schwarze Wann im Hochbau. Auch beim Bau von Flachdächer wird Bitumen verwendet. Beim Warmdach werden die sog. Haftbrücken, auch „Voranstriche“ genannt, auf die Stahlbetondecke aufgetragen und sorgen für die verbesserte Klebewirkung der aufbauenden Schichten mit dem Untergrund. Außerdem sind sie die erste Schicht des Abdichtungssystem, hierbei ist zwingendermaßen auf eine Verträglichkeit der Baustoffe zu achten. Die Haftbrücken können beispielsweise als Bitumenlösung oder -emulsion aufgetragen werden.

Zunächst werden die Rand- und Eckbereiche sowie Dacheinbauten des Flachdachs mit der Haftbrücke angestrichen. Im Anschluss kann das Material großzügig und vollflächig verteilt und glattgezogen werden. Hierfür wird das Material im Behälter kurz durchgemischt, ausgegossen um im Anschluss verstrichen. Je nach Herstellerangaben können dafür Walzen, Pinsel oder sogar Druckluftspritzgeräte eingesetzt werden. Somit sind zwei Arbeitsschritte notwendig. In Abbildung 11 ist die Verarbeitung mit einer Farbrolle dargestellt.



Abb. 11 Verarbeitung von Haftbrücke mit Farbrolle¹¹

¹¹ Quelle: <https://www.hagebau-ott.de/BEZA-Bitumen-Voranstrich-5-Plus-----20l-mKlemmdeckAuslaufstus-Schraubversch/p/75000300>

4 Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz

Bezüglich des Arbeitsbereichs für das Auftragen der Haftbrücke sind die Einschränkungen mittelmäßig. Zum einen wird der Arbeitsbereich durch die Abmessungen des Flachdachs begrenzt und zum anderen nimmt der Platz zum Manövrieren und Bewegen mit fortschreitender Arbeit ab. Es ist außerdem darauf zu achten, dass die Deckenoberfläche trocken und sauber ist, bevor die Material ausgegossen wird. Die notwendige Traglast ist gering, da nur das Werkzeug zum Abziehen vom Roboterarm gehalten werden. Übliche Größen für den Ankauf des Materials sind 10, 20 oder 30 L Eimer, diese könnten auf dem Roboter zwischengelagert werden. Auf der Baustelle des Praxispartners Dachdeckermeister Claus Dittrich GmbH & Co. KG kam ein Bitumen-Voranstrich auf Lösemittelbasis zum Einsatz, welches in 30 L Eimern geliefert wurde. Die Zusammenfassung der Prozessanalyse ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 Zusammenfassung Haftbrücken auf Bitumenbasis

	Arbeits-schritte	Werkzeuge	Materialien	Einschrän-kungen	Nötige Trag-last
Anzahl/Aus-maß	2	1	1	Mittelmäßig	Gering

Nachdem die Haftbrücke getrocknet ist, können weitere Konstruktionsschichten wie Dampfbremse und Dämmung aufgebaut werden. Für die Dampfbremse kommen Abdichtungsbahnen zum Einsatz, welche entweder ebenfalls auf Bitumenbasis oder auf Basis von Kunststoff hergestellt werden.

4.2.2. VERLEGEN UND KLEBEN VON WÄRMEDÄMMPLATTEN

Laut üblichen Merk- und Fachblättern liegt das Hauptaugenmerk der Flachdachkonstruktion darauf, die Funktionsfähigkeit der Dämmung zu gewährleisten. Die darunter und darüber liegenden Konstruktionsschichten sollen dabei die Dämmung vor Feuchtigkeit und mechanischen Beschädigungen schützen (BASF, 2017).

Typische Wärmedämmplatten für Flachdächer bestehen beispielsweise aus expandiertem Polystyrol Schaum (EPS) oder Polyurethan (PUR). Generell wird zwischen synthetischen und organischen Dämmmaterialien unterschieden. Die Dämmplatten werden dabei in standardisierten Größen hergestellt. Für EPS-Dämmplatten sind 100 cm x 50 cm oder 100 cm x 100 cm typische Ausführungsgrößen. Die Plattendicke kann ebenfalls je nach Hersteller, mit Dicken von 10 mm bis hin zu 300 mm, variiert werden (EU-Baustoffhandel, 2021). Die notwendige Plattendicke bemisst sich dabei anhand des U-Wert des Materials und des für die Konstruktion geforderten Zielwertes. Laut dem aktuellen Gebäudeenergiegesetz wird für Dachflächen pauschal ein maximaler U-Wert von 0,24 W/m²K gefordert (Baunetz-Wissen, 2021c). In Tabelle 4 sind einige typische Plattendämmstoffe sowie die Wärmeleitfähigkeit und das Gewicht zusammengestellt. Je geringer dabei der Wert der Wärmeleitfähigkeit ist, desto besser dämmt das Material. Die Kennwerte

4 Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz

wurden dem Online-Lexikon „BaunetzWissen“ des Architekturmagazins „BauNet“ entnommen und dienen der Orientierung (BaunetzWissen, 2021a, 2021b, 2021d, 2021e). Die exakten Werte der jeweiligen Platte und des jeweiligen Werkstoffs hängen vom Hersteller ab. Die angenommenen Abmessungen der Platte betragen beispielhaft 100 cm x 100 cm x 10 cm und resultieren in einem Plattenvolumen von 0,1 m³. Auf der Baustelle des Praxispartners Dachdeckermeister Claus Dittrich GmbH & Co. KG kamen EPS-Dämmplatten der Firma Philippine GmbH & Co. Dämmstoffsysteme KG zum Einsatz.

Tabelle 4 Vergleich von Plattendämmstoffen

	Expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS)	Extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS)	Polyurethan Hartschaum (PUR)	Mineralwolle (MW)
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,020 - 0,045	0,035 - 0,040	0,024 - 0,029	0,030 - 0,050
Rohdichte ρ [kg/m ³]	15 - 30	25 - 45	~30	~150
Plattengewicht [kg]	1,5 - 3,0	2,5 - 4,9	~3	~15

Die Materialien unterscheiden sich außerdem in ihrem Einsatzbereich. Beispielsweise werden XPS-Dämmplatten stets oberhalb der Dichtungsebene lose verlegt. Diese Konstruktionsweise wird als Umkehrdach bezeichnet, da die beiden Schichten getauscht werden und die Dämmung im Nassen liegt. Dabei müssen die Platten stets durch eine Auflast gehalten werden, um ein Herauslösen oder Lockern der Konstruktionsschichten zu verhindern. Für den konventionellen Warmdachaufbau kommen hingegen EPS, PU oder Mineralwolle in Frage. Im weiteren Verlauf werden die konkreten Teilschritte zum Verbau von EPS-Dämmplatten am Beispiel des Thymianswegs in Dresden beschrieben.

Bevor die Dämmplatten verlegt werden können, muss das notwendige Material für die Konstruktion auf das Dach verladen und dort verstaut werden. Da auf einem Flachdach nur begrenzt Lagerfläche zur Verfügung steht, muss platzsparend gearbeitet werden. Hierfür wird üblicherweise zunächst auf einer Seite des Dachs die Dämmung verlegt und diese mit den Abdichtungsbahnen versiegelt. Im Anschluss kann auf dieser Seite Material zwischengelagert und die andere Seite bearbeitet werden. Nachdem die Dämmplatten angeliefert wurden, werden sie zunächst wie in Abbildung 12 dargestellt, kompakt vor dem Gebäude gelagert. Die Zwischenlagerung auf dem Flachdach, nachdem die erste Seite der Dämmfläche verklebt wurde, ist links auf der Abbildung 13 zu erkennen. Auf der rechten Seite der Abbildung 13 wurden bereits die ersten Platten der ebenen Dämmelage verlegt.

4 Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz



Abb. 12 Lagerung von EPS-Dämmplatten, Dachdecker Dittrich Baustelle Thymianweg in Dresden¹²



Abb. 13 Zwischenlagerung von Material und Verbau der Dämmplatten, Dachdecker Dittrich Baustelle Thymianweg in Dresden¹³

¹² Quelle: Eigene Aufnahme

¹³ Quelle: Eigene Aufnahme

Bevor die erste ebene Dämmschicht gelegt werden kann, müssen die Aussparungen in der Attika herausgeschnitten und Fertigteile für die Dachabläufe eingesetzt werden. Diese Durchläufe sind im Verlegeplan vermerkt und müssen im Vorhinein eingebaut werden, da sie im späteren Konstruktionsverlauf nicht mehr zugänglich sind. Dabei wird der Durchlauf eingesetzt und mit einer passgenauen Dämmplatte versehen. Des Weiteren ist bei Dachöffnungen wie Fenstern oder Rauch- und Wärmeabzugsanlagen auf die korrekte Ausführung der Dampfsperre zu achten, da diese am Rand nach oben gezogen werden muss. Nachdem die Vorarbeiten abgeschlossen sind, können die standardisierten ebenen Dämmplatten verklebt werden. Dazu wird zunächst der Kleber auf die Dampfsperre aufgebracht, beispielsweise mit einer Schaumpistole. Anschließend werden die Platten einzeln aufgelegt und festgedrückt. Je nach Plattentyp, Klebstoff und Windstärken reicht das Eigengewicht der Platte dafür aus, andernfalls müssen die Platten zusätzlich beschwert werden, beispielsweise durch eine Rolle der Abdichtungsbahnen. Die nachfolgende Platte wird im selben Verfahren bündig an die vorherige angesetzt. Um Versatz zwischen den parallel verlaufenden Bahn zu erzeugen, wird für den Anfang jeder zweiten Reihe eine bereits zugeschnittene Platte verwendet. Nachdem die erste waagerechte Dämmelage gelegt worden ist, wird die Gefälledämmung eingebaut. Hierfür gibt es einen festen Verlegeplan, um die notwendigen Neigungen und Kehlen herzustellen. Dadurch wird das anfallende Regenwasser zu den Dachabläufen geleitet und kann dort abfließen. Die Platten werden auf die gleiche Weise wie die erste Lage verklebt, der Klebstoff wird nun auf die ebene Dämmelage aufgebracht und die Gefälleplatten auf diese aufgelegt und festgedrückt. Die Platten sind zur Orientierung mit Nummern und der Gefällerichtung markiert. Der Verlegeplan für eines der Flachdächer des Thymianwegs ist in Abbildung 14 dargestellt. Nachdem die Dämmplatten verlegt wurden, wird die erste Abdichtungsbahn aufgebracht. Hierbei handelt es sich meistens um eine kaltverklebte Bitumenbahn, die zweite Abdichtungsbahn als Oberlage kann daraufhin heiß verschweißt werden. Abschließend können eine Kiesschüttung oder weitere Schichten zur Dachbegrünung aufgebracht werden.

4 Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz

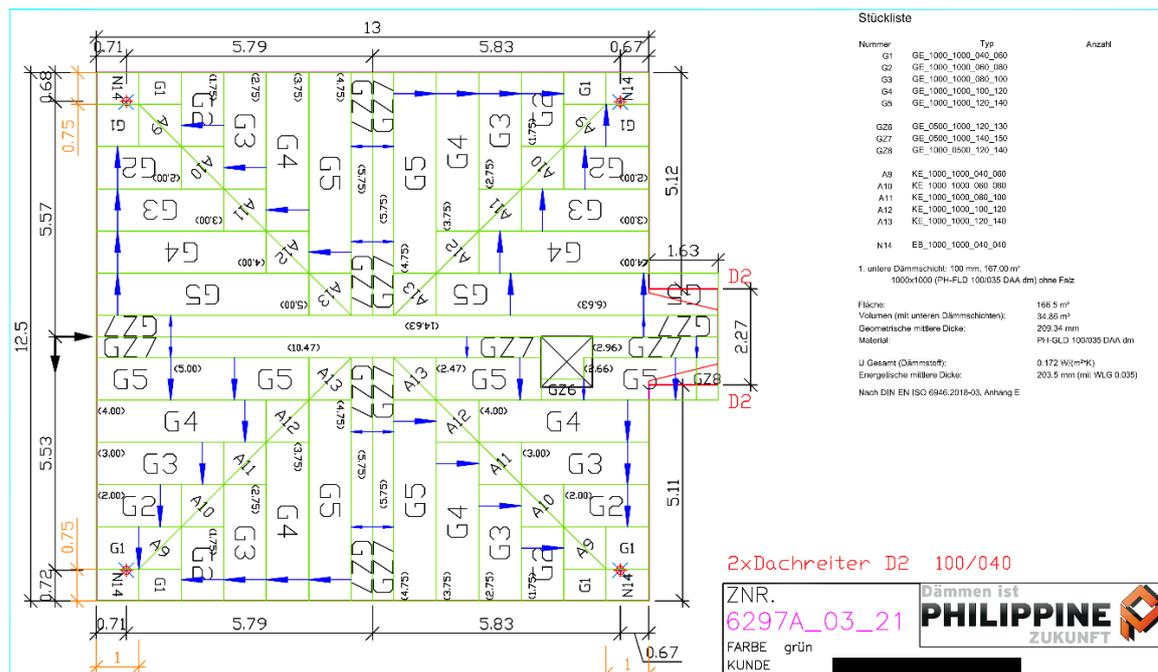


Abb. 14 Verlegeplan Gefälledämmung, Dachdecker Dittrich Baustelle Thymianweg in Dresden¹⁴

Zusammenfassend sind für den Einbau einer einzelnen Dämmplatte drei Arbeitsschritte notwendig. Zunächst wird die Platte aus der Packung entnommen und zum Einbauort transportiert. Anschließend wird Kleber auf den Untergrund aufgetragen und abschließend die Platte aufgelegt und festgedrückt. Für diesen Vorgang sind nur die beiden Materialien Kleber und Dämmplatte notwendig. Als Werkzeuge werden konkret eine Schaumpistole sowie ein Dämmstoffschneider, der die Platten mit Hilfe eines elektrischen Drahtes schneidet, verwendet. Des Weiteren muss ein komplexer Greifer für das Halten der Platten konzipiert werden. Dieser wird deswegen als zusätzliches Werkzeug betrachtet. Die erforderliche Traglast ist vom Dämmmaterial der Platten abhängig und wird als mittelmäßig eingestuft. Insbesondere bei großflächigen Platten aus Mineralwolle ist eine höhere Traglast als bei Platten aus EPS oder XPS notwendig, da Mineralwolle je nach spezifischen Eigenschaften und Hersteller eine Rohdichte von bis zu 500 kg/m³ erreichen kann (Baunetz Wissen,2021).

In Bezug auf den Arbeitsbereich gibt es jedoch große Einschränkungen, zum einen ist die Fläche zum Manövrieren begrenzt und zum anderen schrumpft die freie Arbeitsfläche mit laufendem Baufortschritt. Der Arbeitsraum wird zusätzlich durch die Zwischenlagerung der vielen verschiedenen Materialien, die für den Gesamtprozess notwendig sind, eingeschränkt. Dieses Problem könnte durch eine effiziente Lagerungsmethodik und Anpassung der Lieferungszeiten behoben werden, beispielsweise durch die Adaption von Lean Prinzipien (Fuchs, 2019, Seite 23). In Abbildung 15 ist die Zwischenlagerung von diversen Materialien und Werkzeugen auf der Baustelle Thymianweg zu erkennen.

¹⁴ Quelle: Dachdeckermeister Dittrich, Johannes Dittrich

4 Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz



Abb. 15 Arbeitsbereich Flachdach, Dachdecker Dittrich Baustelle Thymianweg in Dresden¹⁵

Für die Automatisierung mit Hilfe eines Roboters sind mindestens drei Werkzeuge notwendig, die der Roboter modular austauschen und wechseln kann. Zum einen ein Greifsystem, mit dem die Dämmplatten gegriffen und platziert werden können. Außerdem muss ein Dispenser für den Kleber konzipiert werden, um ihn auf den Untergrund aufzubringen. Des Weiteren ist eine Komponente für das Zuschneiden von Material vorzusehen. Diese ist jedoch optional und wird nicht benötigt, wenn der Roboter nur gleichmäßige Platten großflächig verbauen soll oder mit bereits zugeschnittenen Platten gearbeitet wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5 Zusammenfassung Verlegen von Dämmplatten

	Arbeits-schritte	Werkzeuge	Materialien	Einschrän-kungen	Nötige Trag-last
Anzahl/Aus-maß	3	3	2	Groß	Mittelmäßig

¹⁵ Quelle: Eigene Aufnahme

4.3. VERGLEICH UND AUSWERTUNG DER BAUPROZESSE IN BEZUG AUF DAS AUTOMATISIERUNGSPOTENTIAL

Um die hier analysierten Gewerke übersichtlich vergleichen und bewerten zu können, werden sie in einer Matrix zusammengefasst. Hierfür werden Automatisierungspunkte für die untersuchten Bewertungskriterien vergeben und die Punkte des Gewerks anschließend aufsummiert. Für jedes der Bewertungskriterien wird zunächst ein Bereich für den Bewertungswert erstellt und anhand dessen die Automatisierungspunkte vergeben. Das Schema beruht auf der Methodik von Fuchs (2020), bei der bereits Gewerke des Innenausbaus bezüglich ihres Automatisierungspotentials bewertet wurde. Diese Methodik wurde aufgegriffen und angepasst, die Richtwerte für die Bewertungswerte und die Automatisierungspunkte ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6 Bewertungskriterien und Automatisierungspunkte

	Bewertungswert	Automatisierungspunkte
Arbeitsschritte	1 - 2	3
	3 - 4	2
	5+	1
Werkzeuge	1	3
	2	2
	3+	1
Materialien	1	3
	2	2
	3+	1
Einschränkungen	Gering	3
	Mittelmäßig	2
	Groß	1
Traglast	Gering	3
	Mittelmäßig	2
	Groß	1

Je mehr Punkte in Summe von einem Gewerk erreicht werden, desto größer ist das theoretische Automatisierungspotential. Die Matrix mit den Gewerken, den Bewertungskriterien sowie den erreichten Punkten ist in der nachfolgenden Abbildung 16 dargestellt. Die Auswertung des Vergleichs der Gewerke und ihres Automatisierungspotentials ist auf der darauffolgenden Seite aufgeführt. Das Automatisierungspotential wird durch den Anteil der erreichten Punkte folgendermaßen bewertet:

Tabelle 7 Einstufung Automatisierungspotential

Erreichte Punktzahl in %	50	50 - 70	70 - 90	90<
Einstufung des Automatisierungspotential	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch

4. Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz

	Verspachteln und Schleifen von Trockenbau	Punkte	Wand- und Deckenfarbe aufbringen	Punkte	Aufbringen der Haftbrücke (Warmdachkonstruktion)	Punkte	Verlegen und Kleben von Wärmedämmplatten (Warmdachkonstruktion)	Punkte
Anzahl der Arbeitsschritte	5	1	3	2	2	3	3	2
Anzahl der Werkzeuge	3	1	2	2	1	3	3	1
Anzahl der Materialien	2	2	2	2	1	3	2	2
Einschränkungen des Arbeitsbereichs	Mittelmäßig	2	Mittelmäßig	2	Mittelmäßig	2	Groß	1
Notwendige Traglast	Gering	3	Gering	3	Gering	3	Mittelmäßig	2
Automatisierungspotential	Mittel	9/15 Punkte (60%)	Hoch	11/15 Punkte (73,3%)	Sehr hoch	14/15 Punkte (93,3%)	Mittel	8/15 Punkte (53,3%)

Abb. 16 Automatisierungsmatrix¹⁶

¹⁶ Quelle: Eigene Darstellung

4. Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz

Durch die Zusammenfassung in der Matrix wird ersichtlich, dass aus den vier Gewerken das Aufbringen von Farbe sowie das Aufbringen der Haftbrücke auf dem Flachdach die größten Automatisierungspotentiale besitzen. Den besten Wert mit 14 von 15 möglichen Punkten und 93% erzielt dabei das Aufbringen der Haftbrücke und wird mit Sehr hoch bewertet. Für das Aufsprühen von Farben wurde ein Wert mit 73% ermittelt und das Potential des Gewerks als „Hoch“ eingestuft. Die beiden anderen Gewerke haben hingegen nur eine Punktzahl im mittleren Bereich mit 60 % sowie 53% erreicht. Ihr Automatisierungspotential wird daher nur mit „Mittel“ eingestuft. Das Verlegen von Dämmplatten auf dem Flachdach hat insgesamt den niedrigsten Wert mit 8 von 15 Punkten erzielt. Im Folgenden werden die einzelnen Gewerke nochmals ausgewertet und die Bewertung kritisch betrachtet, sowie weitere Randbedingungen für eine Automatisierung benannt.

Aufbringen von Haftbrücken:

Für das Verstreichen der Haftbrücke wird nur ein Material und ein Werkzeug benötigt, dadurch könnte eine Roboterplattform auch ohne einen Werkzeugwechsel den Prozess abarbeiten. Dennoch müsste eine Vorrichtung konzipiert werden, um das Material durchzumischen und auszukippen. Dabei wäre es von Vorteil, diese Komponente an der Plattform selbst zu montieren, um den Roboterarm mit dem Werkzeug zum Verstreichen des Materials auszurüsten. Idealerweise ist die Vorrichtung außerdem in der Lage, die Durchflussmenge exakt zu steuern und zu messen. Wird für das Ausbringen des Materials ebenfalls der Roboterarm verwendet sind, insgesamt zwei Werkzeuge notwendig und das Automatisierungspotential verschlechtert sich. Bezüglich des Arbeitsbereichs ist außerdem davon auszugehen, dass der Roboter frisch verstrichenes Material nicht überfahren darf. Andernfalls könnte es zu Ablagerungen am Fahrwerk und zu dauerhaften Schäden kommen. Daher ist ein durchdachter Arbeitsablaufplan notwendig, um den Roboter am Ende des Arbeitsabschnitts umsetzen zu können. Des Weiteren muss hinterfragt werden, ob sich eine Automatisierung des Gewerks aus wirtschaftlicher und zeitlicher Hinsicht rentiert. Der Zeitaufwand für die Ausführung der Haftbrücke ist nach Aussage des Praxispartners Dachdeckerfirma Dachdeckermeister Claus Dittrich GmbH & Co. KG gering. Pauschal werden für den Vorgang Arbeitszeiten mit ca. 3 Minuten pro m² Dachfläche veranschlagt. Je größer die Abmessungen des Dachs sind, desto kleiner wird außerdem der Zeitaufwand pro m². Im Vergleich zu diesem geringen Zeitaufwand, könnte die Konfiguration und der Anschluss eines Roboters mehr Zeit in Anspruch nehmen als die Arbeiten selbst. Deswegen ist ein Konzept nur für die Automatisierung dieses Prozesses eher unattraktiv.

Wand- und Deckenfarbe aufbringen:

Durch den Einsatz eines Airless-Geräts lässt sich das Gewerk aus technischer Sicht einfach automatisieren. Für die logistische Planung des Mischgeräts gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten. Entweder wird die Vorrichtung auf der Plattform eingebaut und mitbewegt oder sie wird stationär im Arbeitsbereich aufgestellt und der Schlauch zum Roboter

zugeführt. Bei ersterem steigt das Gesamtgewicht der Plattform sowie die nötige Stromleistung. Wird das Gerät im Arbeitsbereich aufgestellt, muss darauf geachtet werden, dass der Schlauch nicht überfahren wird. Soll sowohl der Tiefengrund als auch die Deckfarbe mit demselben Airless-Gerät aufgetragen werden, müssen außerdem unterschiedliche Schläuche und Sprühdüsen verwendet werden, um eine Durchmischung und Verunreinigung der Materialien zu verhindern. Des Weiteren muss eine Komponente zur Qualitätskontrolle der Oberflächengestaltung eingebaut werden. Dies könnte beispielsweise anhand der ausgebrachten Farbmenge überprüft werden oder der Deckungsgrad der Oberfläche wird durch eine Kamera oder einen Sensor kontrolliert. Auf diese Weise beginnt der Roboter erst mit dem nächsten Arbeitsabschnitt, wenn ausreichend Material auf die Oberfläche aufgetragen wurde. Ein weiterer Vorteil des Gewerks ist, dass ein vergleichbarer Prozess bereits in der Automobilindustrie automatisiert wurde. Dort wird durch Roboter millimetergenau Lack auf die Oberfläche der Autokarosserie aufgetragen. Diese Technik kann mit entsprechenden Anpassungen modifiziert und auf die Bauindustrie angepasst werden.

Verspachteln und Schleifen von Trockenbauplatten:

Bei der Bewertung dieses Gewerks wurden streng genommen zwei separate Prozesse zusammen bewertet, weil sie aus handwerklicher Sicht zusammengehören. Dadurch ist das Automatisierungspotential des Prozesses insgesamt schlechter ausgefallen ist. Werden die beiden Prozesse getrennt voneinander bewertet, steigt dementsprechend für den einzelnen Vorgang das Automatisierungspotential. Für das Verspachteln könnte eine Roboterplattform ähnlich dem Entwurf von Okibo konzipiert werden. Wird auf ein Fugenband verzichtet, steigt das Automatisierungspotential zusätzlich. In diesem Fall muss nur ein Material verbaut werden, wofür ebenso nur ein Werkzeug notwendig ist. Um hingegen das Fugenband fachgerecht abzurollen und einzubauen ist ein ausgeklügeltes Werkzeug notwendig, welches in der Lage ist das Band abzurollen und an der gewünschten Länge abzuschneiden. Um die Qualitätskontrolle für den Prozess durchzuführen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen könnte die Spachtelmasse pro laufenden Meter Fuge pauschal überschlagen und mit der Ausbringungsmenge des Materials gegen gerechnet werden. Dabei müsste dennoch eine abschließende Qualitätskontrolle durch einen Facharbeiter oder die Bauleitung durchgeführt werden, um die Qualität der Fugen zu bestätigen. Alternativ könnte diese Kontrolle über Kameras erfolgen, die erkennen, ob die Fuge ausreichend gefüllt ist. Auf diese Weise wird ähnlich wie beim Streichen sichergestellt, dass der Roboter erst einen Arbeitsabschnitt erfolgreich abarbeitet, bevor er mit dem nächsten beginnt. Auch das Schleifen der Trockenbauwände würde sich gut für eine Automatisierung eignen, da nur ein Werkzeug und kein zusätzliches Material notwendig ist. Beispielsweise könnte dieselbe Roboterplattform, die die Platten zunächst verspachtelt, ihr Werkzeug austauschen und anschließend die Fugen abschleifen. Die Verknüpfung beider Gewerke bietet sich außerdem an, da der Arbeitsbereich identisch ist. Ob sich die Entwicklung einer Roboterplattform, die ausschließlich Schleifarbeiten ausführt, rentiert, ist

4 Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz

insbesondere aus wirtschaftlicher Sicht fraglich. Sollten die Schleifarbeiten durch einen Roboter durchgeführt werden, ist außerdem auf die Qualitätskontrolle zu achten, da die Oberfläche der Trockenbauplatten nicht beschädigt werden darf.

Verlegen und Kleben von Wärmedämmplatten:

Eine Möglichkeit, das Automatisierungspotential für das Verlegen der Dämmplatten zu verbessern, ist ausschließlich bereits zugeschnittene oder ganze Platten durch den Roboter verlegen zu lassen. Auf diese Weise entfällt das Werkzeug für das Zuschneiden. Dementsprechend muss nur noch das Werkzeug für das Auftragen des Klebstoffs und ein Greifer für die Platten konzipiert werden. Dabei spielen insbesondere die Oberfläche und das Gewicht der Dämmplatten eine zentrale Rolle. Je nach Beschaffenheit kommen hierfür Vakuumgreifer oder mechanische Systeme in Betracht. Die Einschränkungen innerhalb des Arbeitsbereichs lassen sich durch eine effiziente Planung und Baustellengestaltung verringern, wodurch sich im Umkehrschluss das Automatisierungspotential verbessert. Ein weiterer Faktor, der eine Automatisierung erschwert, ist das Verlegen der Gefälledämmung. Da auf Grund der Druckfestigkeit die Dämmplatten nicht vom Roboter befahren werden können, muss nach einer ebenen Dämmlage im Anschluss die zweite Lage direkt auf diese aufgebaut werden. Hierfür muss ein intelligenter Verlegealgorithmus entwickelt werden und die Dämmplatten dem Roboter korrekt zugeladen werden. Außerdem muss auf eine ausreichend große Auslegerlänge des Roboters geachtet werden. Je nach Versatz der Plattenbahnen ist es notwendig, dass der Roboterarm eine Strecke von bis zu einer Plattenbreite überbrücken muss, um die Gefälledämmung auf die erste Dämmlage aufzukleben. Im ungünstigsten Fall müssen zusätzliche Stützsysteme ausgefahren werden, um die Lastausmittlung durch den Roboterarm zu kompensieren. Bezüglich des Informationsaustausches ist bei der Verwendung von 2D-Verlegeplänen außerdem zu überprüfen, ob das LoD und LoI für die Simulation und die Ausführung eines effizienten Robotereinsatzes ausreicht. Nach Auskunft des Praxispartners Dachdeckermeister Claus Dittrich GmbH & Co. KG ist es außerdem unüblich für die ebene Dämmlage einen Verlegeplan zu erstellen. Dieser ist jedoch als äquivalent zum BIM Modell zwingend erforderlich, um den Verlegealgorithmus zu entwickeln.

4.4. GEGENÜBERSTELLUNG VERSCHIEDENER BAUPROZESSE IN HINBLICK AUF DEN WERKZEUGEINSATZ

Durch einen modularen Aufbau der Roboterplattform soll diese nicht nur ausschließlich für ein Gewerk, sondern für mehrere Prozesse und Aufgaben eingesetzt werden. Das größte Hindernis stellen dabei die vielen aufgabenspezifischen Werkzeuge dar. Aus technischer Sicht ist es kaum möglich, den Roboterarm der Plattform gleichzeitig mit unzähligen Werkzeugen auszurüsten. Es bietet sich daher an, eine technische Schnittstelle für den Wechsel von Werkzeugen zu implementieren. Auf diese Weise kann mit einer Art Werkzeugmagazin gearbeitet werden und der Roboter für den jeweiligen Vorgang ausgestattet werden. Um herauszufinden, welche Werkzeuge ohnehin bei mehreren Prozessen eingesetzt werden, wird die folgende Übersicht erstellt. Aus dieser ergibt sich, welche Werkzeuge für einen Robotereinsatz entwickelt werden sollten, um gleichzeitig mehrere Arbeitsbereiche abdecken zu können. Für die Übersicht werden zum einen die in dieser Diplomarbeit analysierten Gewerke und zum anderen auch eine Auswahl der Gewerke des Innenausbaus herangezogen, die bereits von Fuchs (2020) untersucht wurden. Zunächst werden kurz die untersuchten Werkzeugkategorien und die Einsätze im jeweiligen Gewerk erläutert. Abschließend wird daraus eine Matrixübersicht für die Werkzeuge erstellt und diese ausgewertet.

Es werden die folgenden Werkzeugeinsätze in den Gewerken untersucht:

- Greifen von Plattenelementen
- Extrudieren von Material mit Mischpumpe
- Dispenser für Klebstoff
- Airless Spritzgerät
- Glätten von Material
- Zuschneiden von Werkstoffen
- Abschleifen von Oberflächen

Des Weiteren werden dabei die folgenden Gewerke betrachtet:

- Anbringen von Innenputz
- Estricharbeiten
- Einbau Bodenbelag
- Verlegen von Fliesen
- Verspachteln und Schleifen von Trockenbauwänden
- Wand- und Deckenfarbe aufbringen
- Aufbringen der Haftbrücke (Warmdachkonstruktion)
- Verlegen und Kleben von Wärmedämmplatten (Warmdachkonstruktion)

4.4.1. GREIFEN VON PLATTENELEMENTEN

In der Technischen Mechanik werden Platten als Bauelemente beschrieben, die eine geringe Dicke im Vergleich zur Länge und Breite besitzen. Des Weiteren sollen sie vor allem orthogonal zur Plattenebene belastet werden, beispielsweise durch das Begehen oder eine feste Auflast. Plattenwerkstoffe kommen vielfach im Bauwesen zum Einsatz. Für den Finish von Fußböden werden unter anderem Parkett-, Laminat- und Vinylböden eingebaut, welche als Platten verlegt werden können. Diese unterscheiden sich dabei in den verfügbaren Abmessungen und dem Eigengewicht. Auch Fliesen werden als Platten an Wänden oder Decken verlegt, diese besitzen auf Grund ihres Materials häufig ein höheres Eigengewicht als die Bodenbeläge. Ebenso wird die in dieser Diplomarbeit untersuchte EPS-Wärmedämmung für Flachdächer als Plattenware verbaut. Bei dieser sind wiederum größere Abmessungen als bei Bodenbelägen oder Fliesen üblich. Im Baualltag können alle diese Plattenwerkstoffe per Hand gehalten werden. Damit jedoch ein Robotergreifer diese unterschiedlichen Werkstoffe sicher halten und verbauen kann, müssen die jeweiligen Abmessungen, das Gewicht und die Oberflächenbeschaffenheit berücksichtigt werden.

4.4.2. EXTRUDIEREN VON MATERIAL MIT MISCHPUMPE

Mischpumpen haben die Aufgabe, Baumaterialien verbaufertig anzumischen und werden üblicherweise direkt mit einer Förderpumpen kombiniert. Ein Einsatzbereich ist beispielsweise das Aufbringen von Innenputz. Dabei wird das trockene Putzmaterial durch die Maschine angemischt und kann direkt mit einem Schlauch auf die Wand- oder Deckenoberfläche aufgebracht werden. Um Fliesen im Dünnbettmörtel zu verlegen, wird der Mörtel konventionell in einem Eimer angerührt und mit einer Kelle aufgetragen. Hierfür könnte alternativ ebenfalls eine Mischpumpe eingesetzt werden, um den Fliesenmörtel anzumischen und auf die Oberfläche aufzubringen. Für das Anmischen und Fördern von Estrich werden ähnliche Mischmaschinen wie für den Putz eingesetzt. Dabei werden die Ausgangsstoffe des Estrichs in der Maschine vermengt und anschließend wird das Endprodukt zum Einbauort befördert. Auf Grund der unterschiedlichen Viskosität und der Konsistenz der Materialien wird für Putz und Estrich üblicherweise jeweils eine separate Maschine verwendet. Für eine Automatisierung der Gewerke könnte die Entwicklung einer höherwertigen Maschine, die beide Materialien mischen und fördern kann, von Vorteil sein.

4.4.3. DISPENSER FÜR KLEBSTOFF

Um einen kraftschlüssigen Verband herzustellen, müssen diverse Elemente mit dem Untergrund verklebt werden. Werden beispielsweise Linoleum oder Vinyl als Bodenbelag eingebaut, müssen diese verleimt werden. Dabei gibt es materialspezifische oder Universalklebstoffe, welche mit einem Zahnspachtel aufgetragen und verstrichen werden können. Unter anderem werden 1-Komponentenkleber auf Silanbasis oder auch 2-

Komponenten PU-Kleber sowie Dispersionsklebstoffe verwendet. Beim Verlegen der EPS-Wärmedämmplatten wird oftmals WDVS-Schaumkleber eingesetzt, um die Dämmplatten mit der Unterlage zu verkleben. Dieser Klebeschäum muss mit Hilfe einer Schaumpistole aufgebracht werden. Für einen Einsatz mit einem Roboter muss daher eine Vorrichtung konzipiert werden, mit welcher unterschiedliche Klebstoffe auf die jeweilige Oberfläche in der gewünschten Dicke aufgetragen werden können. Dabei muss das unterschiedliche Fließverhalten berücksichtigt werden, sodass mit dem Werkzeug verschiedene Klebstoffe verarbeitet werden können.

4.4.4. AIRLESS SPRITZGERÄT

Die Airless Spritzgeräte erfüllt eine ähnliche Aufgabe wie die Fördergeräte der Mischpumpen. In beiden Fällen wird Material durch eine Maschine in einen Schlauch gepumpt und auf Wände oder Decken aufgetragen. Ein Airless Spritzgerät mischt dabei jedoch keine verschiedenen Materialien an und ist auf ein reines Arbeitsmaterial angewiesen. Es findet lediglich eine Durchmischung des Füllmaterials zur besseren Verarbeitbarkeit statt. In Bezug auf Leistung und Gesamtgewicht handelt es sich bei den Airless Geräten um eine deutlich kleinere Ausführung als bei Mischpumpen. Der typische Einsatz von Airless-Geräten ist für das Aufbringen von Wand- und Deckenfarbe. Um Spachtelmasse für den Trockenbau aufzubringen, können ebenfalls spezielle Airless-Geräte verwendet werden. Für das Auftragen der Haftbrücken für die Flachdachkonstruktion ist ebenfalls der Einsatz eines Airless Geräts vorstellbar.

4.4.5. GLÄTTEN VON MATERIAL

Häufig muss Material, welches auf eine Oberfläche aufgetragen wurde, geglättet werden. Beispielsweise muss die Spachtelmasse bei Trockenbau mit Hilfe eines Glätters in die Fugen eingearbeitet und glattgestrichen werden. Ebenso muss Innenputz nach dem Aufbringen abgezogen werden, um eine ebene und gleichmäßige Oberfläche herzustellen. Hierfür können beispielsweise Reibebretter oder Alulatten eingesetzt werden. Um einen ebenen Fußbodenaufbau zu erreichen, muss auch frisch eingebauter Zementestrich, bevor er aushärtet, mit Richtscheiten und sog. Estrichschwertern geglättet werden. Eine Ausnahme bildet dabei der Einbau von selbst nivellierendem Flüssigestrichen. Die jeweiligen Werkzeuge der Gewerke unterscheiden sich vor allem in der Größe und Form des Werkzeugs. Prinzipiell handelt es sich dabei jedoch immer um ein Blech mit einem Handgriff.

4.4.6. ZUSCHNEIDEN VON WERKSTOFFEN

Plattenartigen Element müssen für den passgenauen Einbau regelmäßig vor Ort zugeschnitten werden. Beim Verlegen von Fliesen muss zum einen der Rand- und Eckbereich oftmals zugeschnitten werden und zum anderen müssen Aussparungen für Heizkörper oder Röhre in die Fliesen gebohrt werden. Bei einem einfachen Fliesenschneider wird ein

Hartmetallrad eine Schiene entlanggeführt, wodurch Druck auf die Oberfläche ausgeübt wird. Die Fliese bricht anschließend entlang dieser Schnittlinie. Beim Einbau von Vinylböden können die Teilstücke mit einem einfachen Cuttermesser zugeschnitten werden. Parkett muss hingegen mit einer Säge, beispielsweise einem Fuchsschwanz, zugeschnitten werden. Um kleine Dämmplatten aus Styropor zuzuschneiden kann ein Dämmstoffmesser verwendet werden. Für das Zuschneiden großen EPS-Dämmplatten wird hingegen ein elektrischer Dämmstoffschneider mit Ständervorrichtung eingesetzt. Dieser kam auch auf der Baustelle Thymianweg in Dresden zum Einsatz. Die Platten werden in den Ständer eingelegt, eingemessen und mit dem heißen Draht abgeschnitten.

4.4.7. ABSCHLEIFEN VON OBERFLÄCHEN

Estriche sollten insbesondere dann abgeschliffen werden, wenn diese entweder als Untergrund für weitere Fußbodenaufbauten dienen oder wenn es sich um Sichtestrich handelt. Als Werkzeug kann beispielsweise ein sog. Diamantrotierteller oder eine Estrichschleifmaschine verwendet werden. Die Körnung wird dabei an den Oberflächenanspruch angepasst. Je feiner die fertige Oberfläche sein soll, desto feiner muss das Schleifwerkzeug gewählt werden. Die Fugen zwischen Trockenbauplatten sollten nach dem Verspachteln ebenfalls abgeschliffen werden, um die Gleichmäßigkeit der Oberfläche zu gewährleisten und um Makel zu beheben. Hierfür kann beispielsweise übliches Schleifpapier oder eine Schleifgiraffe verwendet werden.

4.4.1. WERKZEUGMATRIX

Um die Überschneidungen dieser Werkzeugkategorien in den unterschiedlichen Gewerken aufzuzeigen, werden diese in einer Matrix zusammengefasst. In der ersten Zeile werden hierfür die untersuchten Werkzeuge und in der ersten Spalte die Gewerke aufgeführt. Die Werkzeugeinsätze werden anhand der zuvor durchgeführten Betrachtung markiert. Die Summe dieser Einsätze des jeweiligen Werkzeugs ist in der letzten Zeile zusammengefasst. Zusätzlich werden die Werkzeugkategorien mit mehr Einsätzen farblich hervorgehoben. Die Matrix ist in der Abbildung 17 auf der folgenden Seite dargestellt.

4. Analyse von Bauprozessen im Hinblick auf Automatisierungspotential und Werkzeugeinsatz

	Greifen von Plattenelementen	Extrudieren von Material mit Mischpumpe	Dispenser für Klebstoff	Airless Spritzgerät	Glätten von Material	Zuschneiden von Werkstoffen	Abschleifen von Oberflächen
Anbringen von Innenputz		X			X		
Estricharbeiten		X			X		X
Einbau Bodenbelag	X		X			X	
Verlegen von Fliesen	X	X				X	
Verspachteln und Schleifen von Trockenbauplatten				X	X		X
Wand- und Deckenfarbe aufbringen				X			
Aufbringen der Haftbrücke (Warmdachkonstruktion)				x			
Verlegen und Kleben von Wärmedämmplatten (Warmdachkonstruktion)	X		X			X	
Anzahl von Einsätzen	3	3	2	3	3	3	2

Abb. 17 Werkzeugmatrix¹⁷

¹⁷ Quelle: Eigene Illustration

4.4.2. AUSWERTUNG DER WERKZEUGMATRIX

Aus der Matrix wird ersichtlich, dass bei fünf der insgesamt sieben Werkzeugkategorien jeweils drei Gewerke und bei den verbliebenen zwei Kategorien nur zwei Gewerke zutreffen. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass bei einigen Werkzeugen die Überschneidungen zwar vorhanden sind, diese im Detail aber hinfällig sind. Beispielsweise trifft zwar bei drei Gewerken das Zuschneiden von Material zu, dabei werden jedoch verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften zugeschnitten. Daher unterscheiden sich ebenfalls die spezifischen Werkzeuge in die Form und Funktionsweise. Solange kein Universalwerkzeug für das Zuschneiden mehrerer Materialien vorhanden ist, muss für jeden Werkstoff ein mit dem Roboterarm kompatibles Werkzeug vorhanden sein. Ähnlich verhält es sich mit den Mischpumpen, den Airless-Spritzgeräten und den Dispensern für Klebstoffe. Auch bei diesen muss zunächst das Materialverhalten der verschiedenen Baustoffe untersucht werden, um eine Komplettlösung für mehrere Verwendungszwecke zu entwickeln. Das Abschleifen von Oberflächen wird zwar bei weniger Gewerken eingesetzt, die Funktionsweise des Werkzeugs ist jedoch identisch. Durch die Auswahl des Schleifpapiers und das Anpassen der Geschwindigkeit oder der Umdrehungszahl lassen sich die Parameter für das jeweilige Gewerk modifizieren. Ein am Roboterarm befestigtes Schleifwerkzeug könnte daher für mehrere Gewerke sinnvoll eingesetzt werden. Für das Glätten von Estrich oder Putz könnte ebenfalls ein modifizierbares Werkzeug entwickelt werden, mit welchem unterschiedliche Materialien fachgerecht abgezogen und geglättet werden können.

Im weiteren Verlauf der Diplomarbeit werden außerdem spezifische Anforderungen an Werkzeuge ermittelt, die sich aus dem konkreten Einsatz ergeben. Diese Untersuchung wird für das Greifen von Plattenelementen sowie das Aufbringen von fließfähigen Stoffen.

5 ANFORDERUNGEN UND SPEZIFIKATIONEN VON WERKZEUGMODULEN

Für die vollständige Herstellung der verschiedenen Bauleistungen und Prozesse sind viele unterschiedliche Werkzeuge notwendig. Diese können spezifisch für das jeweilige Gewerk oder vielseitig einsetzbar sein. Beispielsweise muss bei nahezu jedem Vorgang ein Bauteil per Hand gehalten, gedreht oder platziert werden. Diese unterscheiden sich jedoch in Beschaffenheit, Abmessungen und Gewicht, daher kann nicht das gleiche Greifwerkzeug für alle Vorgänge eingesetzt werden. Jede dieser Aufgaben stellt spezielle Anforderungen und Randbedingungen an eine Umsetzung mit einem Roboter. Um diese Zusammenhänge zu beschreiben, wird zunächst die Konfiguration eines Werkzeugs, sowie die Eingabe von Wegpunkten und Strecken am Beispiel von Universal Robots (UR) beschrieben. Außerdem werden die typischen Unterteilungen der Werkzeuggruppen von Industrierobotern aufgeführt und erläutert. Im weiteren Verlauf werden außerdem die spezifischen Anforderungen an das Werkzeug und den Roboter zusammengefasst, wie sie sich aus der jeweiligen Prozessanalyse ergeben.

5.1. KONFIGURATION VON ENDEFFEKTOREN UND WEGPUNKTEN

Der Endeffektor bildet das Ende der kinematischen Kette des Gesamtsystems und ist eine der wichtigsten Komponenten des Roboters. In der Robotik wird oft die Analogie zum menschlichen Arm gezogen und der Endeffektor als die Roboterhand bezeichnet, welche am Ellbogen des Roboters befestigt ist. Bevor ein Werkzeug als Endeffektor an einem Roboterarm genutzt werden kann, muss es angeschlossen und konfiguriert werden. Bei den Robotern von UR werden die unterschiedlichen Werkzeuge an den Toolflansch des sog. Handgelenks an- und abgeschraubt. Außerdem müssen je nach Werkzeugtyp die zusätzlichen Medien, beispielsweise Druckluft, angeschlossen werden. Für die Konfiguration des Werkzeugs gibt es notwendige und optionale Einstellung. Es muss beispielsweise zwingendermaßen der Tool Center Point (TCP) in Relation zum Tool Flansch festgelegt werden. Der TCP ist dabei der Arbeitspunkt des Werkzeugs und darf nicht mit dem Schwerpunkt verwechselt werden. Bei kommerziellen Werkzeugherstellern können diese Kennwerte direkt aus den technischen Datenblättern entnommen werden. Zusätzlich bietet UR ein Feature an, um den TCP über Mehrfachpositionierung an einem Fixpunkt in Relation zum Toolflansch zu bestimmen. Neben dem TCP muss auch das Gesamtgewicht des Werkzeuges sowie der Gesamtschwerpunkt in das Roboterprogramm eingegeben werden. Auf diese Weise wird der sichere Umgang mit dem Werkzeug gewährleistet. Diese Kennwerte

können ebenfalls entweder aus den Datenblättern entnommen oder mit Hilfe von UR Features ermittelt werden. Optionale Einstellungen für die Werkzeuge sind beispielsweise das Erstellen einer sog. Werkzeugkugel. Dabei wird eine Sicherheitszone um das gesamte Werkzeug als zusätzliche Maßnahme für den Kollisionsschutz festgelegt.

Nachdem das Werkzeug am Toolflansch richtig montiert und eingestellt wurde, kann ein Programm für den Arbeitszyklus formuliert werden. Als Programmierumgebung für den UR wird das angeschlossene Teach Pendant verwendet. Mit diesem wird das Roboterprogramm geschrieben und Bewegungen, wie das Fahren in Richtung einer Achse oder die geradlinige Bewegung zwischen zwei Punkten, programmiert. Zur Optimierung empfiehlt es sich, die Zykluszeit eines Arbeitsvorgangs zu minimieren. Dafür können beispielsweise Verschleifpunkte an Eckenpunkten von Wegstrecken definiert werden. Die Bewegungen werden dadurch abgerundet, wodurch das Werkzeug im Gegensatz zu einer geradlinigen Bewegung nicht vollständig abgebremst und erneut beschleunigt. Werden muss Bei der Optimierung der Zykluszeit muss dennoch auf die externen Faktoren, wie die Zulieferungszeiten und die Verarbeitbarkeit des Materials geachtet werden. Diese Parameter geben die Grenzen für Bewegungsgeschwindigkeiten und somit für den Gesamtprozess vor. Neben der Online-Programmierung, bei der der Roboter vor Ort „angelernt“ wird, kann auch externe Software für die Offline-Programmierung genutzt werden. Dabei werden Bewegungsmuster und Abläufe digital simuliert und anschließend an den Roboter exportiert. In Kapitel 6 wird dieser Vorgang am Beispiel von Autodesk Fusion 360 und der Übergabe von NC-Dateien erläutert.

5.2. GREIFER UND WERKZEUGTYPEN FÜR ROBOTER

In der Literatur werden drei Möglichkeiten benannt, um den Endeffektor eines Roboterarms auszustatten. Diese Unterteilung wird beispielsweise sowohl von Hesse und Malisa (2016) als auch von Pott und Dietz (2019) vorgenommen. An den Endeffektor kann entweder ein Greifer, ein Arbeitswerkzeug oder ein Messgerät angebracht werden. Laut Pott und Dietz (2019, S.35) stellen dabei die Greifwerkzeuge, durch ihren Einsatz in der Handhabungstechnik, den größten Anteil der Endeffektoren. Sie werden bei der Hälfte aller Roboterprozesse eingesetzt, um Werkstück zu greifen und zu bewegen. In der Fertigungstechnik kommen wiederum diverse Werkzeuge zum Einsatz, um Werkstücke auf unterschiedliche Arten zu bearbeiten. So kann beispielsweise Material abgefräst, Löcher gebohrt oder Oberflächen abgeschliffen werden. Um hingegen Vorgänge nur zu beobachten oder Messungen durchzuführen, kann ein Kamerasystem am Endeffektor des Roboters installiert werden. Für die verschiedenen Werkzeuge werden außerdem weitere Komponenten wie Schläuche für Zulaufmaterialien oder die Stromkabel benötigt. Diese zusätzlich notwendigen Gerätschaften und die Gesamtheit der Roboterumgebung werden als Peripherie bezeichnet (Hesse und Malisa, 2016). Insbesondere bei den Werkzeugen mit hohem Stromverbrauch oder Werkzeuge, die mit Druckluft betrieben werden, stellt die

Planung und die Versorgung mit den entsprechenden Medien eine zusätzliche Herausforderung dar. Im stationären Einsatz in Produktionshallen ist die Medienversorgung wesentlich leichter umzusetzen als mit einer mobilen Roboterplattform.

Im Folgenden werden die drei Kategorien für Endeffektoren nochmals genauer erläutert.

5.2.1. GREIFSYSTEME

Greifsysteme haben die Aufgabe Werkstücke aufzunehmen, zu halten und zu bewegen. Sie werden anhand ihres Wirkprinzips in Gruppen unterteilt. Die Greifer können dabei entweder mechanisch, pneumatisch, elektromagnetisch oder formschlüssig Kräfte auf das Werkstück ausüben. Den Großteil der Greifsysteme mit ca. 90%, machen dabei die mechanischen und Sauggreifer aus (Pott und Dietz, 2019, S. 39). Elektromagnetische und anderweitige Greifer finden in der Industrie hingen nur bei spezifische Aufgaben Verwendung und werden hier nicht genauer beleuchtet.

Bei mechanischen Greifern wird das Werkstück über Druckkräfte gehalten, die auf die Oberfläche des Werkstücks aufgebracht werden. Bei diesem kraftschlüssigen Griff ist vor allem die Gewichtskraft des Werkstücks und der Reibungskoeffizient des Materials an den Greifbacken zu berücksichtigen. Anhand der Anzahl der Greifbacken, auch Finger genannt, kann anschließend die nötige Druckkraft ermittelt werden. Dabei ist auf die Festigkeit und Verformbarkeit der Werkstoffe zu achten, werden schwere duktile Materialien verwendet können durch die aufgebrachte Druckkraft Verformungen verursacht werden. Bei derartigen Werkstoffen eignen sich beispielsweise Greifer, die mit einem formschlüssigen Griff arbeiten. Dabei wird das Werkstück aufgenommen und über Auflagerkräfte gehalten. Durch die zusätzliche Auflagerfläche wird kein Druck auf das Material außer der Normalen der Gewichtskraft ausgeübt. Das Werkstück kann dabei fest umschlossen oder lose gehalten werden. Für mechanische Greifer gibt es verschiedene Ausführungen, beispielsweise den typischen Backengreifer mit zwei Fingern und einem parallelen Griff oder Klemmgreifer mit drei Fingern und einem zentrischen Griff. In Abbildung 18 ist beispielhaft ein Backengreifer der Firma OnRobot mit parallelem Griff dargestellt.

Bei pneumatischen oder Vakuumgreifern wird über eine Druckdifferenz zwischen der Umgebung und dem Luftdruck im Sauger künstlich ein Unterdruck erzeugt. Die Kraft, mit der das Werkstück angesaugt wird, resultiert dabei aus dem Vakuumniveau und der Saugerfläche. Die Greifer gibt es als einzelne Saugnäpfe, die punktuell Kraft ausüben, oder als Flächensauger, welche aus mehreren Saugpipetten zusammengesetzt sind. Die Form der einzelnen Pipetten kann dabei rund oder oval sein. Bei dem in Abbildung 19 dargestellten Vakuumgreifer von der Firma Schmalz sind die beiden Saugnäpfe beispielsweise oval. Der Antrieb der Sauger erfolgt entweder elektrisch oder über sog. Ejektoren, die mit Hilfe von Druckluft in der Lage sind, ein sehr hohes Vakuumniveau zu erzeugen. Vakuumgreifer eignen sich insbesondere um Werkstoffe mit empfindlichen, aber festen Oberflächen anzuheben. In der Automobilindustrie werden sie beispielsweise eingesetzt, um

Autokarosserien anzuheben. Würde ein mechanischer Greifer eingesetzt werden, müsste dieser breit genug sein, um die Kanten der Karosserie zu fassen. Außerdem bestünde die Gefahr, dass die Oberfläche des Werkstücks beschädigt wird.



Abb. 18 OnRobot Backengreifer, Jugard+Künstner
Zweigstelle Gera¹⁸



Abb. 19 Schmalz Vakuumbreifer, Jugard+Künstner
Zweigstelle Gera¹⁹

Des Weiteren gibt es auch Systeme, die sowohl mit einem Vakuumbreifer als auch einem mechanischen Greifer ausgestattet sind. Dadurch können ohne einen Werkzeugwechsel beide Greifer eingesetzt werden, um unterschiedliche Materialien zu handhaben.

Der in Abbildung 20 dargestellte Yaskawa Roboterarm aus der Handwerkskammer (HWK) in Dresden ist beispielsweise mit einem einzelnen Saugnapf und einem Backengreifer ausgestattet.

¹⁸ Quelle: Eigene Aufnahme

¹⁹ Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 20 Yaskawa Roboter mit Kombigreifer, Handwerkskammer Dresden²⁰

5.2.2. ARBEITSWERKZEUGE

Für die spezifischen Arbeiten, die in der Industrie mit Hilfe von Robotern durchgeführt werden, gibt es ein breites Spektrum an möglichen Werkzeugen. Es können sowohl kleine Handwerkzeuge wie Schweißbrenner oder Schleifwerkzeuge automatisiert werden, als auch größere Maschinenwerkzeuge wie beispielsweise Fräsgeräte. Nach der Handhabung ist das Verschweißen einer der größten Einsatzbereiche für Roboterwerkzeuge (Pott und Dietz, 2019, S. 36). Abhängig vom zu automatisierenden Prozess können Werkzeuge für die unterschiedlichen Schweißbahnen und Schweißmethoden gewählt werden. In Abbildung 21 ist ein Roboter mit Schweißwerkzeug sowie das Ausmaß und der Anschluss der notwendigen Peripherie für den Schweißvorgang zu erkennen. Die Kabel werden durch Halterungen an der Seite des Roboters sicher zum Roboter und zum Werkzeug geführt.

²⁰ Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 21 Schweißwerkzeug an Roboter, HWK Dresden²¹

Für die Bearbeitung von Werkstücken und das Abtragen von Material werden Bohr-, Fräs- und Entgratungsspindel eingesetzt. Diese können schnell und präzise die Werkstücke formen und nachbearbeiten. Für den finish der Oberflächen können außerdem Schleifwerkzeuge eingesetzt werden, um Unebenheit zu korrigieren. Die vom Roboter verwendeten Werkzeuge sind den ursprünglichen Handwerkzeugen nachempfunden und lediglich für den Einsatz durch einen Roboter modifiziert. Gleiches gilt für Werkzeuge zum Auftragen von Farben, Lack oder Klebstoffen. In der Fertigungsindustrie werden diese Werkzeuge außerdem oft stationär eingesetzt. Dabei wird nicht der Roboter, sondern das Werkstück entsprechend bewegt. Diese Methode kann beispielsweise für das Aufbringen von Klebstoff auf lange Werkstücke genutzt werden. Für den Einsatz auf der Baustelle mit einem mobilen Roboter können aus offensichtlichen Gründen keine stationären Werkzeuge verwendet werden. Bei den Werkstücken, die bearbeitet werden sollen, handelt es sich nicht um kleine oder mittelgroße Metallteile, sondern um Trockenbauwände oder Bauteile aus Stahlbeton.

²¹ Quelle: Eigene Aufnahme

5.2.3. MESSGERÄTE

Neben Greifern und Werkzeugen können auch spezialisierte Messgeräte an Robotern angebracht werden. Hierfür gibt es diverse Produkte, wie Sensoren, Laserscanner oder Kameras, die an den Endeffektor des Roboters angeschlossen werden können. Die Messgeräte werden vor allem für die Überwachung und Kontrolle von Prozessen oder Werkstücken eingesetzt. Häufig werden dabei Messgeräte eingesetzt, die zwischen dem Toolflansch und einem weiteren Werkzeug eingebaut sind. Auf diese Weise kann gleichzeitig eine Überwachung und die Bearbeitung eines Prozesses stattfinden. Beispielsweise ist in Abbildung 22 eine Kamera von Robotiq zu sehen, die zwischen dem Toolflansch des Roboters und dem Werkzeug eingebaut wurde. Die Kamera kann neben der Überwachung auch als digitale Signalquelle für das Roboterprogramm verwendet werden. Dadurch werden die Optionen des Programmbaums um visuelle Informationen und Feedback erweitert. Die Kamera erkennt beispielsweise Farben oder Konturen, welche wiederum für das Programmieren von Abfragen und Schleifen eingesetzt werden können. Die Möglichkeiten zur Prozessgestaltung und Kontrolle werden durch das zusätzliche Messgeräte erweitert.



Abb. 22: Robotiq Backengreifer, Jugard+Künstner Zweigstelle Gera²²

²² Quelle: Eigene Aufnahme

5.3. SPEZIFIKATION FÜR WERKZEUGE ZUM EINBAU VON PLATTENELEMENTEN

Wie bereits in Kapitel 4.4.1 erläutert wurde, sind für das Verlegen von Plattenelementen mit Hilfe eines Greifsystems insbesondere die Abmessung der Platte, das Eigengewicht und die Oberflächenbeschaffenheit ausschlaggebend. Für die Handhabung von EPS-Dämmplatten und Fliesen für den Innenausbau werden nun die im Vorhinein beschriebenen Greifsysteme in Betracht gezogen. Um diese Systeme zu spezifizieren, werden die jeweiligen Arbeitsprozesse und die typischen Materialeigenschaften berücksichtigt. Im Folgenden werden die konkreten Hindernisse, Vor- und Nachteil sowie mögliche Konzepte für die verschiedenen Greifer erläutert.

5.3.1. EPS-DÄMMPLATTEN

Für die Spezifikation möglicher Greifsystem wird hier nur der horizontale Einbau von EPS-Dämmplatten bei Flachdachkonstruktionen betrachtet. Die Platten werden dabei aufgenommen und waagrecht verlegt. Für die Spezifikation des Greifsystems werden die in Kapitel 4.2.2 angenommenen Abmessungen mit 100 cm x 100 cm x 10 cm beibehalten. Das Gewicht einer solchen Platte liegt je nach Hersteller und spezifischen Eigenschaften zwischen 1,5 kg bis 3 kg.

Wird ein mechanischer Backengreifer eingesetzt, ist das Greifen von liegenden Platten nicht möglich. Um die Platte an zwei Rändern zu greifen, müsste der Hub zwischen den Backen genauso groß wie die Plattenbreite sein. Derartige Hubgrößen sind nicht standardmäßig verfügbar, könnten jedoch als Sonderanfertigung hergestellt werden. Eine mögliche Lösung wäre daher keine liegenden, sondern stehende Platten entlang der Dicke zu greifen. In diesem Fall bemisst sich der Hub des Greifwerkzeugs an der Plattendicke, im angeführten Beispiel sind dies 10 cm. Mit dieser Haltetechnik muss die Platte jedoch für den Einbau wieder waagrecht gedreht werden. Des Weiteren muss die Haltekraft über eine ausreichend große Backenfläche aufgebracht werden, um keine Schäden an der Platte zu verursachen. Zusätzlich ist beim Drehen der Platte ggf. die Biegesteifigkeit zu berücksichtigen. Wird die Platte durch den Greifer entlang der Dicke gehalten, kann das statische System vereinfacht als einseitig gelagerte Platte und im weiteren Sinne sogar als zweidimensionaler Kragarm betrachtet werden. Die daraus resultierende Durchbiegung ist am anderen Ende der Platte am stärksten. Bei noch größeren als den angenommenen Abmessungen und einem höherem Eigengewicht kommt es im schlimmsten Fall zu einem Abbrechen der Platte oder einer dauerhaften Verformung.

Alternativ zu einem mechanischen Greifer kann auch ein pneumatischer Greifer eingesetzt werden, um die liegende Platte zu greifen. Ein Vorteil des Vakuumbreifers gegenüber dem Mechanischen ist, dass die liegende Platte für den Einbau nicht mehr gedreht werden muss. Die Platte kann direkt auf die Dampfsperre aufgeklebt werden. Hierfür ist

jedoch zu testen, ob die Oberflächenbeschaffenheit der EPS-Dämmplatten den Einsatz eines Vakuumgreifers zulässt. Durch die poröse Oberfläche strömt möglicherweise Außenluft in den Saugnapf und es kann kein konstanter Unterdruck aufgebaut werden. Bei dem Anheben einer Dämmplatte handelt es sich um einen Lastfall mit horizontaler Saugkraft und vertikaler Krafrichtung. Die dafür notwendige Haltekraft wird anhand der folgenden Formel (5.1) berechnet. Die Kennwerte sind einem Berechnungsbeispiel der Firma J. Schmalz GmbH entnommen (2021).

$$F_{TH} = m * (g + a) * S \quad (5.1)$$

F_{TH} = theoretisch Haltekraft [N]

m = Masse [kg]

g = Erdbeschleunigung $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

a = Beschleunigung der Anlage $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

S = Sicherheitsfaktor

Im vorliegenden Fall mit einer Masse von 3 kg, einer angenommenen Beschleunigung der Anlage von $5 \frac{m}{s^2}$ sowie dem Sicherheitsfaktor von 2,0 auf Grund der Porosität ergibt sich die Haltekraft F_{TH} zu ca. 88,86 Newton. Diese Berechnung ist für einen einzelnen Sauggreifer. Wird ein Flächensauger eingesetzt, sinkt die jeweilige notwendige Haltekraft.

Als dritte Option zu einem mechanischen oder Vakuumgreifer könnte ein Nadelgreifer getestet werden. Bei diesem werden überkreuzende Nadeln in das Werkstück hineingefahren und das Werkstück gegriffen. Hierbei wird dementsprechend die Oberfläche geringfügig beschädigt. Daher ist zum einen zu testen, ob die notwendige Griffkraft über Nadelgreifer erreicht werden kann und zum anderen, ob die Beschädigungen der Plattenoberfläche die Funktionsweise der Dämmung beeinträchtigt.

5.3.2. FLIESEN

Bei Fliesen wird prinzipiell zwischen künstlich hergestellten Platten, beispielsweise gebrannter Keramik, und natürlichen Platten unterschieden. Des Weiteren werden Fliesen je nach Verwendung in Boden- und Wandfliesen unterteilt. Die Wandfliesen werden in geringeren Dicken ausgeführt, da sie häufig nur als Verkleidung angebracht werden. Die Bodenfliesen müssen hingegen Nutzlasten durch Begehung aushalten und werden daher dicker dimensioniert. Im Innenausbau werden häufig Keramikfliesen eingesetzt, diese werden nochmals in Fein- und Grobkeramik unterteilt. Für Boden- oder Wandfliesen

werden jedoch ausschließlich Feinkeramiken verwendet (Borgmeier und Braunreiter, 2009, S.33). Die Abmessungen können je nach Hersteller und Fliesentyp variieren. Üblich sind quadratische Maße wie 30 cm x 30 cm oder 60 cm x 60 cm sowie Rechtecke mit beispielsweise 120 cm x 60 cm. Die Dicke der Fliesen ist ebenfalls unterschiedlich und wird entsprechend der Nutzung gewählt. Standardmaße für Fliesen im Innenbereich liegen zwischen 8 mm bis 11 mm.

Das Aufnehmen von Fliesenplatten mit einem mechanischen Greifer kann auf Grund der Hubbreite nur entlang der Dicke erfolgen. Der Hub für das Greifen an den Rändern ist zwar geringer als bei den EPS-Dämmplatten, übersteigt aber trotzdem die üblichen Maße für Hubbreiten von Backengreifern. Ähnlich wie bei den EPS-Platten muss das liegend gelieferte Fliese für die Aufnahme aufgestellt werden. Auf Grund des höheren Eigengewichts der Fliesen im Vergleich zu den Dämmplatten kann es bei großen einseitig gegriffenen Fliesen zum Abbrechen des Materials kommen. Bei dem Einbau von Wandfliesen würde außerdem der mechanische Greifer an der Wand anstoßen und die Platte kann nicht bündig an die anliegenden Platten gelegt werden. Durch das mechanische Greifen können außerdem Schäden an der Oberfläche der Fliese entstehen.

Wird hingegen ein Vakuumgreifer eingesetzt, wird sowohl die Beschädigung der Oberfläche vermieden als auch der Einbau von Wandfliesen ermöglicht. Hierbei empfiehlt es sich einen Flächensauger einzusetzen, um die Platte gleichmäßig und sicher zu greifen. Die notwendige Haltekraft für einen Saugnapf kann ebenfalls berechnet werden. Hierfür wird beispielhaft eine Feinsteinzeugfliese mit den Abmessungen 60 cm x 30 cm x 0,8 cm angenommen. Bei einem üblichen Gewicht von 20 kg / m² Fliesenfläche ergibt sich ein Gewicht von 3,6 kg. Für die Berechnung der Haltekraft wird der ungünstige Lastfall durch den Einbau einer Wandfliese angenommen. Bei dieser wirkt die Gewichtskraft nicht parallel, sondern senkrecht, zum Saugnapf. Die notwendige Haftkraft ergibt sich anhand der folgenden Formel:

$$F_{TH} = (m/\mu) * (g + a) * S \quad (5.2)$$

F_{TH} = theoretisch Haltekraft [N]

m = Masse [kg]

g = Erdbeschleunigung $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

a = Beschleunigung der Anlage $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

S = Sicherheitsfaktor

μ = Reibwert

Mit dem Eigengewicht der Fliese von 3,6 kg, einer angenommenen Beschleunigung der Anlage von $5 \frac{m}{s^2}$, einem Reibwert $\mu = 0,5$ für raue Oberflächen sowie einem durch den Lastfall vorgeschriebenen Sicherheitsfaktor von 2 ergibt sich F_{TH} zu ungefähr 213 N. Um diese theoretische Haltekraft zu verteilen, sollte ein Flächensauger mit mehreren Saugpipetten eingesetzt werden. Dadurch kann die jeweilige Saugkraft und das zu erzeugende Vakuum reduziert werden.

5.4. SPEZIFIKATION VON WERKZEUGEN FÜR DAS AUFSPRÜHEN VON BAUMATERIALIEN

Um Baumaterialien auf Oberflächen aufzusprühen, müssen sie mit Hilfe von Druckkraft über eine Öffnung herausgedrückt werden. Hierfür gibt es diverse technische Systeme und Möglichkeiten. Die erforderliche Kraft steht dabei in Relation zu rheologischen Größen wie dem Verformungs- und Fließverhalten oder der Viskosität. Je geringer beispielsweise die Viskosität ist, desto weniger fließfähig ist das Material. Außerdem ist die innere Reibung zwischen den Teilchen stärker und für die Verformung, hier das Aufsprühen des Materials, wird mehr Kraft benötigt.

5.4.1. WAND- UND DECKENFARBE

Für das Aufsprühen von Farben und Lacken gibt es verschiedene Möglichkeiten, welche sich unter anderem an der Viskosität der Materialien orientieren. Beispielsweise wird bei Druckluftspritzpistolen der Materialstrom über Druckluft zerstäubt, wodurch Farbtröpfchen entstehen und auf die Oberfläche aufgebracht werden. Diese Methode eignet sich für Flüssigkeiten mit niedriger bis mittlerer Viskosität. Hochviskose Flüssigkeiten können hingegen beispielsweise mit Airless-Spritzpistolen verarbeitet werden. Dabei wird das Material unter Hochdruck und ohne Luft zerstäubt. Dadurch kommt es unter anderem zu einer geringeren Nebelbildung als bei Druckluftspritzpistolen. Für das Aufbringen von Wand- und Deckenfarben werden solche Airless-Geräte und Spritzpistolen eingesetzt. Das Werkzeug umfasst dabei nur die Spritzpistole mit der Farbdüse. Für die Durchführung der Arbeitsvorgänge sind jedoch weitere technische Systeme notwendig. Zu dieser Peripherie des Roboters gehören unter anderem Systeme zum Lagern, Anmischen und Wechseln von Farben sowie die Pumpen und Schläuche, mit denen die Farbe zum Werkzeug befördert wird. Abhängig von der Planung und Konzeption der Roboterplattform können die Teilsysteme der Peripherie auf die Plattform integriert und dort verbaut werden oder sie werden extern eingerichtet und das Material zum Roboter geführt. Der Vorteil der Integration ist, dass die Peripherie immer automatisch durch den Roboter in den nächsten Arbeitsbereich mitgenommen wird. Bei der externen Lagerung muss das gesamte System beim Umsetzen des Roboters ebenfalls abgebaut und im neuen Arbeitsbereich wieder aufgebaut werden. Durch die Integration der Systeme steigt jedoch der Umfang und Stromverbrauch der Plattform.

Bei großen Wand- und Deckenhöhen sollte die Roboterplattform außerdem um eine Linearachse erweitert werden. Durch eine Hubsäule, auf welcher der Roboterarm fixiert wird, kann der Arbeitsradius des Roboters und somit auch der des Werkzeugs erweitert werden. Dadurch kann ein kleinerer Robotertyp mit geringerem Eigengewicht und niedrigeren Anschaffungskosten eingesetzt werden. Bei der Wahl des Roboters, des Werkzeugs und den frei liegenden Komponenten ist zusätzlich auf eine adäquate IP-Schutzart zu

achten geachtet. Diese gibt Auskunft über die Widerstandsfähigkeit gegenüber Fremdkörpern, Berührung und Wasser. Die IP-Schutzart setzt sich aus zwei Kennziffern zusammen. Die erste Ziffer steht im Zusammenhang zum Schutz vor Fremdeinwirkung, die zweite kennzeichnet den Schutz gegenüber Wasser. Die Kennziffern und Unterteilungen werden in der DIN EN Norm 60529 geregelt. Um einen dauerhaften Schutz vor Ablagerungen an den Gelenken und den technischen sowie elektronischen Komponenten des Roboters zu gewährleisten, sollte der Roboterarm mit einer Schutzhülle versehen werden. Auf diese Weise kommen weder Fremdkörper noch Flüssigkeiten mit dem Roboter in Berührung. In Abbildung 23 ist dies beispielhaft an einem UR mit übergezogener Schutzhülle dargestellt.



Abb. 23 UR mit Schutzhülle, Jugard+Künstner Zweigstelle Gera²³

²³ Quelle: Eigene Aufnahme

5.4.2. WDVS-KLEBESCHAUM

Der schnellste Weg ein Werkzeug für den Auftrag von Klebeschaum an einen Roboter anzupassen, ist, das bereits vorhandene Werkzeug entsprechend zu modifizieren. Standardmäßig wird der Klebeschaum mit einer Schaumpistole aufgebracht, auf die eine Klebeschaumkartusche aufgeschraubt wird. Die Dose steht unter Druck und über die Betätigung des Abzugs wird das Material an der Spitze der Pistole herausgedrückt. Alternativ können kommerziell verfügbare Dosiersysteme aus der Industrie für den Robotereinsatz, unter Berücksichtigung des Arbeitsvorgangs und dem verwendeten Material, angepasst werden. Bei diesen Systemen wird im Gegensatz zur Dose der Druck über das sog. Endloskolben-Prinzip erzeugt. Mit einer rotierenden Verdrängerpumpe wird das Material an die Spitze des Werkzeugs gefördert und kann dort präzise aufgetragen werden (ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH, 2021). Wird die übliche Schaumpistole für den Robotereinsatz modifiziert und an den Toolflansch angeschraubt, gibt es zwei denkbare Szenarien für die Materialzufuhr. Zum einen können die herkömmlichen Dosen verwendet und durch den Roboter auf die Pistole aufgeschraubt werden. In diesem Fall muss jedoch ein Magazin für die Kartuschen sowie eine technische Komponente für das An- und Abschrauben der Dosen geplant werden. Ein Vorteil hiervon wäre, dass die gleichen Dosen sowohl vom Handwerker als auch vom Roboter verwendet werden können und keine Spezialanfertigungen oder Sonderbestellungen notwendig sind. Jedoch steigt durch das Magazin und die Wechsellösung die Komplexität und der Stromverbrauch der Plattform. Auf der anderen Seite kann auf eine externe Druckluftzufuhr oder ein mechanisches Fördersystem verzichtet werden, da die Dosen selbst unter Druck stehen. Der Roboter muss lediglich mechanischen Druck auf den Abzug ausüben.

Die andere Methode ist, ein kommerzielles Pump- und Fördersystem an den WDVS-Klebeschaum anzupassen. Bei der Auswahl dieses Systems sind die Materialeigenschaften und die Verarbeitbarkeit des Klebstoffs zu berücksichtigen. Da das Material standardmäßig in Dosen geliefert wird, muss eine Lösung für die Zufuhr des Klebstoffs in die Dosieranlage konzipiert werden. Wird ein solches Fördersystem verwendet, ist es ebenso möglich anstelle der Schaumpistole ein Dosiergerät mit Verdrängerpumpe einzusetzen. In Absprache mit den Herstellern des Klebstoffs können außerdem alternative Liefercontainer entworfen werden, die das Einspeisen in das Dosiersystem erleichtern. Wird beispielsweise das Volumen der einzelner Container erhöht, verringert sich die Anzahl der Dosen im Magazin. Außerdem kann eine größere Fläche bearbeitet werden, bevor ein Dosenwechsel durchgeführt werden muss.

Des Weiteren ist die Entwicklung eines alternativen Klebstoffs möglich, der nicht als Schaum, sondern als flüssiges Material aufgebracht werden kann. Für die Verarbeitung könnten dann ähnliche Werkzeuge wie für das Aufbringen von Wand- und Deckenfarbe eingesetzt werden.

6 Robotertest mit Universal Robots zum Schleifen einer Trockenbauplatte

Bevor ein Vorgang mit Hilfe eines Roboters durchgeführt werden kann, sollte der Prozess simuliert werden. Dabei wird ein digitales Abbild der Realität erstellt und der Vorgang dort simuliert. Je detaillierter und realistischer das digitale Abbild ist, desto hochwertiger sind die Ergebnisse der Simulation. Auf diese Weise können effiziente Machbarkeitsstudien durchgeführt werden, um zu überprüfen, ob der Prozess sich wie vorgesehen automatisieren lässt. Des Weiteren können Probleme und Komplikationen, wie verschränkte Zykluszeiten oder Kollisionen, im Vorhinein erkannt und gelöst werden. Oftmals kann die Simulation außerdem direkt genutzt werden, um den tatsächlichen Roboter zu steuern. Viele Hersteller bieten dafür eigene Software an, um in einer digitalen Umgebung einen Vorgang zunächst zu simulieren, bevor er von seinem physischen Gegenstück ausgeführt wird. Beispielsweise bietet Universal Robots (UR) die Software URSim an, um in dieser die UR-Leichtbauroboter programmieren und simulieren zu können (Universal Robots, 2021). Ebenso bietet die Firma KUKA die firmeneigene Applikation KUKA.Sim an, um mit dieser Simulationen und Offline-Programmierung durchzuführen (KUKA, 2021).

Im Zuge der Bearbeitung der Diplomarbeit wurde die Handwerkskammer (HWK) Dresden als weiterer Praxispartner hinzugewonnen. Dadurch hat sich die Möglichkeit ergeben, neben der in der Aufgabenstellung des Diploms geforderten Simulation, im dortigen Robotiklabor einen praktischen Test mit einem Leichtbauroboter von UR durchzuführen. In Absprache mit den Betreuern der Diplomarbeit wurde daher anstelle des Programms „Rhino 3D“ und dem Plugin „Grasshopper“ das Modellierungsprogramm „Autodesk Fusion 360“ für die Simulation verwendet. Dadurch könnten die Simulationen als Grundlage für den physischen Robotertest genutzt werden. Mit Hilfe des sog. Post-Processing wurde dafür ein maschinennaher Quellcode erzeugt, um den UR Roboter in der HWK anzusteuern. Als Test wurde das Schleifen einer Trockenbauplatte konzipiert. Zunächst wurde der Vorgang simuliert und im Anschluss an einer echten Platte mit einem an dem Roboterarm befestigten Schleifgerät durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Dokumentation und Analyse der Arbeitsschritte von der Simulation zum Robotertest sowie den notwendigen Konfigurationen und Einstellungen als auch den Datenschnittstellen. Die Qualität und Sinnhaftigkeit der Schleifarbeit als solche ist dabei kein Hauptpunkt. Es wurde der Schleifvorgang gewählt, weil das Werkzeug vor Ort verfügbar und direkt einsatzbereit war. Im Folgenden wird die Vorgehensweise von der Simulation des Schleifens bis hin zum tatsächlichen Robotertest aufgeführt und erläutert sowie abschließend ausgewertet und kritisch hinterfragt.

6.1. SIMULATION IN AUTODESK FUSION 360

Als Vorarbeit für den praktischen Schleiftest wurde zunächst eine Modellierung mit anschließender Simulation mit Hilfe des Programms Autodesk Fusion 360 durchgeführt. Mit diesem Programm können Werkstücke und Werkzeuge modelliert sowie bearbeitet werden. Deswegen wird Fusion 360 vor allem für die Produktentwicklung und -fertigung eingesetzt. Innerhalb des Arbeitsbereichs „Konstruktion“ gibt es beispielsweise verschiedene Möglichkeiten, geometrische Volumenkörper und Flächen zu erstellen, zu extrudieren oder zu verschneiden. Außerdem können Materialeigenschaften und Texturen der Körper bearbeitet werden. In Anschluss können die mechanischen Konstruktionen für eine realistische Abbildung gerendert werden, es kann aber auch beispielsweise der Arbeitsvorgang mit dem Werkstück als Animation angezeigt werden. Des Weiteren kann das physikalische Verhalten des Werkstücks unter spezifischen Einsatzbedingungen ermittelt werden. Das Programm bietet vielzählige Möglichkeiten, um dynamische Komponenten und komplexe Geometrien zu erstellen. Für die Modellierung der Trockenbauplatten wurde nur ein Bruchteil dieser Funktionen eingesetzt. Insgesamt wurde die Platte zweimal modelliert und bearbeitet.

6.1.1. MODELLIERUNG DES WERKSTÜCKS

Als digitales Gegenstück zur physischen Trockenbauplatte wurde ein 300 mm breiter, 500 mm langer und 20 mm hoher Quader erstellt. Hierfür wurden die Modellierungsfunktionen des Arbeitsbereichs „Konstruktion“ von Fusion 360 verwendet. Zunächst wurde die Grundfläche angelegt und diese anschließend extrudiert. Der dadurch erstellte Körper soll einen Ausschnitt einer Trockenbauplatte repräsentieren. Die Abmessungen des Ausschnitts wurden festgelegt, um einen ausreichend großen Schleifbereich auf der Platte bereit zu stellen und gleichzeitig genug Randabstand für die Fixierung der tatsächlichen Platten zu lassen. Die Materialeigenschaften des Quaders sind für den Arbeitsvorgang nicht relevant, da der Vorgang nur auf der Oberfläche des Werkstücks stattfindet und kein Material abgetragen wird. Daher wurden die Standardeinstellungen des Programms beibehalten. Für die Simulation des ganzflächigen Schleifens wurde zusätzlich ein geschwungener Werkzeugpfad mit Verschleifpunkten entlang der Platte erstellt, um einen flüssigen Werkzeugverlauf zu erzeugen und die Zykluszeit zu verbessern. Der Pfad wurde an den Durchmesser des Schleifwerkzeugs angepasst und händisch erstellt. Hierfür wurde die Skizzenfunktion genutzt, um Hilfslinien auf der Oberfläche des Körpers zu zeichnen. Die modellierte Platte mit dem blauen Werkzeugpfad ist in Abbildung 24 dargestellt. Um den Werkzeugpfad für das Schleifen von Fugen vorzugeben, wurde sowohl eine Querruge als auch eine Längsfuge als Skizze angeordnet. Die Platte sowie der in schwarz markierte Werkzeugpfad für das Fugenschleifen sind in Abbildung 25 dargestellt.

6 Robotertest mit Universal Robots zum Schleifen einer Trockenbauplatte

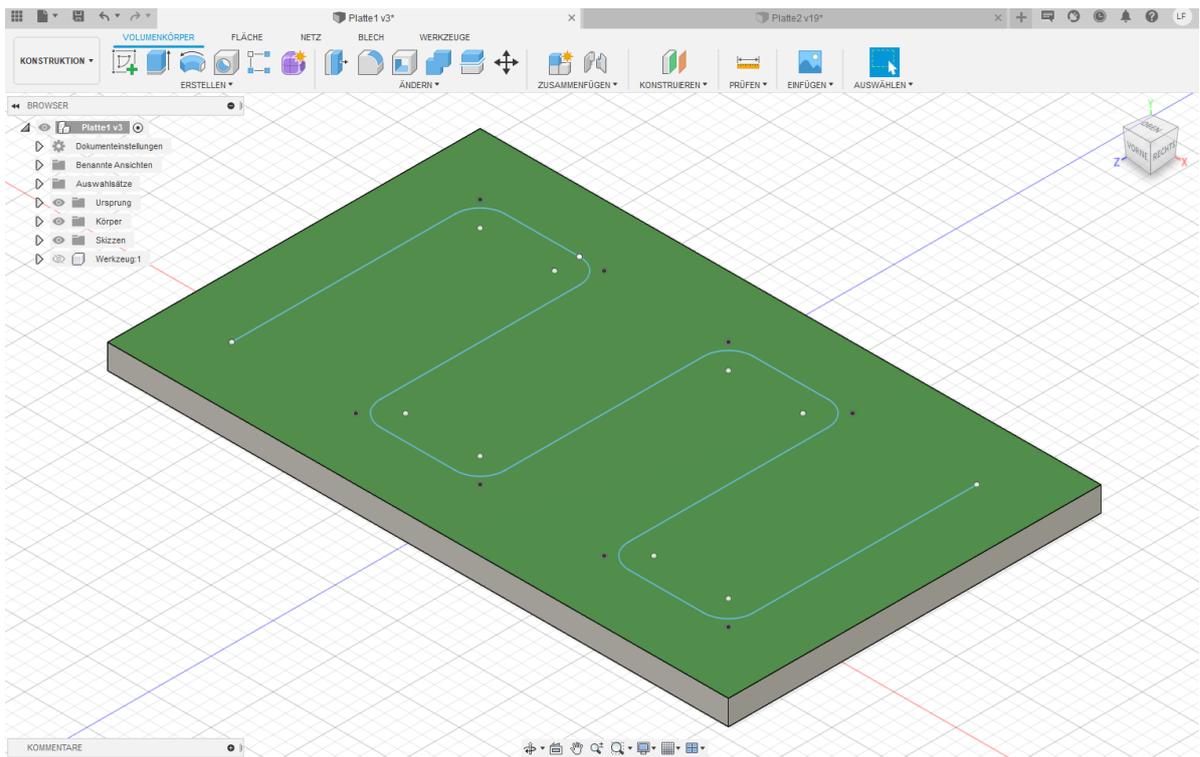


Abb. 24 Modellerte Platte für ganzflächiges Schleifen, Autodesk Fusion 360²⁴

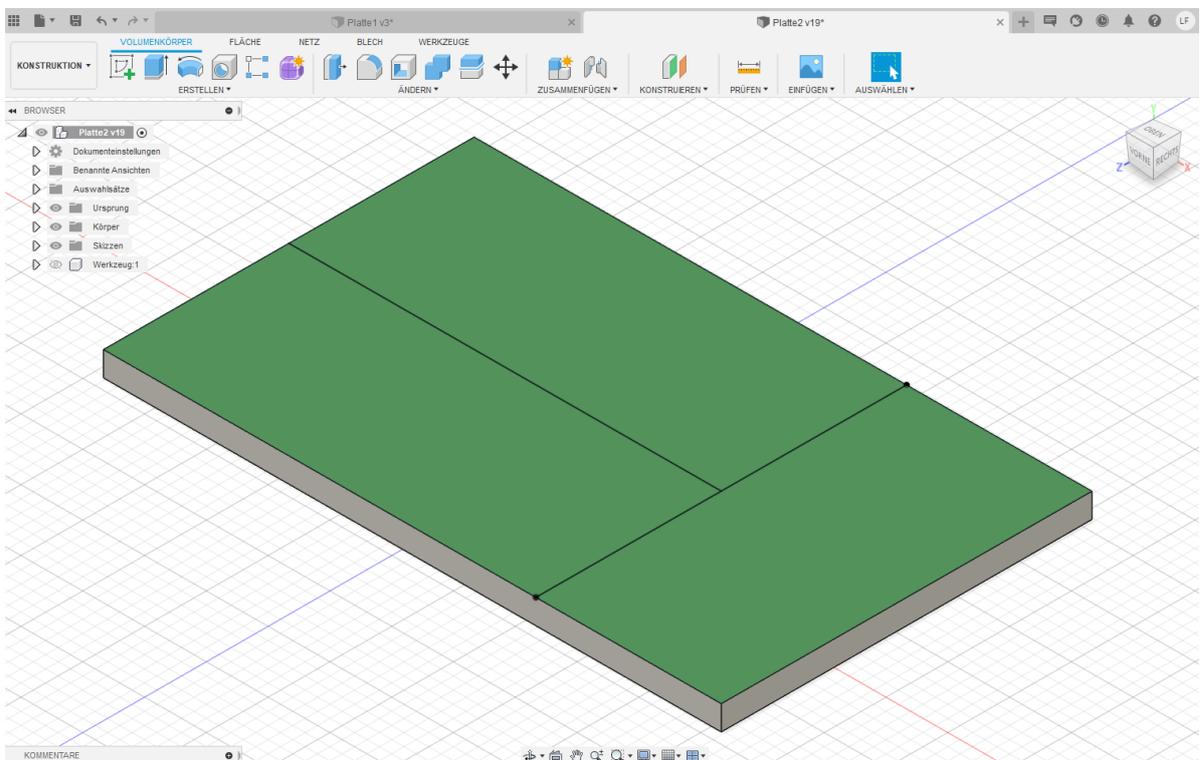


Abb. 25 Modellerte Platz für das Fugenschleifen, Autodesk Fusion 360²⁵

²⁴ Quelle: Eigene Aufnahme

²⁵ Quelle: Eigene Aufnahme

6.1.2. MODELLIERUNG DES WERKZEUGS

Das Programm Fusion 360 verfügt über eine große Werkzeugbibliothek mit verschiedenen Bohrern, Fräsen, Schneidwerkzeugen oder Tastern. Neben diesen vorinstallierten und bereits konfigurierten Werkzeugen gibt es außerdem die Möglichkeit, eigene neue „Formwerkzeuge“ zu modellieren. Dabei können jedoch nur rotationssymmetrische Querschnitte für Fräsen oder Bohrer erstellt werden. Dafür musste die Hälfte des symmetrischen Querschnitts modelliert werden sowie diverse Einstellungen für beispielsweise die Umdrehungen pro Minute oder die Schnittgeschwindigkeit festgelegt werden. Da keine vorinstallierten Schleifwerkzeuge in dem Programm zur Verfügung standen, wurde ein Formwerkzeug für die Simulationen modelliert und als Bohrer konfiguriert. Dazu wurde der Querschnitt des Werkzeugs skizziert, aus welchem das Programm automatisch die vollständige Form generiert. Die maßgebende Abmessung ist dabei der Durchmesser des tatsächlichen Schleifwerkzeugs mit 14 cm, dieser wurde zunächst am echten Werkzeug abgemessen und im Anschluss in dem Programm eingetragen. Des Weiteren wurden Dummy-Variablen für die erforderlichen Werkzeugeinstellungen eingeben, damit das Werkzeug vollständig konfiguriert und einsatzfähig ist. Da es sich bei dem Versuchswerkzeug um ein Schleifgerät und keinen Bohrer handelt, werden diese Variablen beim Import in das UR-Programm ignoriert ohne Komplikationen zu verursachen. In Abbildung 26 sind das Modell und das tatsächliche Werkzeug zu sehen. Der untere Teil des tatsächlichen Werkzeugs verhält sich elastisch und kann um wenige Millimeter zusammengedrückt werden.

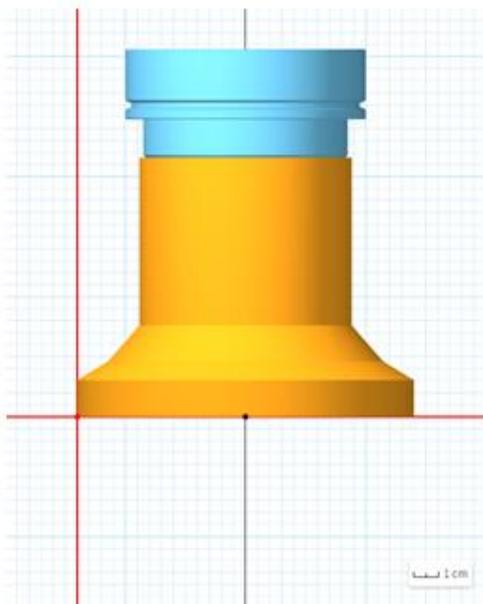


Abb. 26 Modelliertes und echtes Schleifwerkzeug²⁶

²⁶ Quelle: Eigene Illustration

6.1.3. SIMULATION UND POST-PROCESSING

Nachdem das Werkzeug und die Platten modelliert wurden, konnten zwei Werkzeugsimulationen durchgeführt werden. Hierfür wird der Arbeitsbereich „Fertigen“ von Fusion 360 genutzt. Für die Bearbeitung der Werkstücke und Simulation der Werkzeuge bietet Fusion 360 eine Fülle von Bewegungsmustern und Variationen an. Beispielsweise können komplexe dreidimensionale Konturen abgefräst werden oder parallele Bahnen mit versetzten Höhen bearbeitet werden. Ein Großteil dieser Funktionen ist jedoch auf die komplexe Anwendung von Fräswerkzeugen und Bohrern ausgelegt. Für die Schleifvorgänge wurde deshalb die schlichte Simulationsmethode „Projektion“ ausgewählt. Dabei fährt der TCP des Werkzeugs einen auf einer Oberfläche definierten Pfad ab.

Der erste Schritt für die Simulation ist das Erstellen eines sog. „Setups“. Für das Setup muss der Operationstyp, in diesem Fall Fräsen, festgelegt werden. Als optionale Einstellung können Maschinen kommerzieller Hersteller als spezifische Arbeitsumgebung ausgewählt werden. Beispielsweise können CNC-Fräsmaschinen von Haas oder Hurco oder auch 3D-Drucker von Creality als Arbeitsumgebung verwendet werden. Hierbei wird erneut der Fokus auf Fertigungstechnik von Fusion 360 ersichtlich. Neben dem Operationstyp muss auch der zu bearbeitende Körper ausgewählt und der Ursprung des Koordinatensystems sowie die Orientierung der Achsen festgelegt werden. Dies ist insbesondere wichtig, wenn sich das Koordinatensystem des Werkstücks vom globalen Koordinatensystem unterscheidet. Für die Simulation beider Schleifvorgänge wurde das Koordinatensystem auf einen Eckpunkt der modellierten Trockenbauplatte gelegt. Im Anschluss an die Setupeinstellungen kann die Simulationsfunktion konfiguriert werden. Für diese muss das Bearbeitungswerkzeug und dessen Metadaten sowie der Werkzeugpfad ausgewählt werden. Des Weiteren können zusätzliche Parameter wie Sicherheitshöhen für den Vorgang oder die Anfahr- und Wegfahrbewegungen des Werkzeugs festgelegt werden. Für die Simulation der Schleifvorgänge waren außer des Werkzeugs und des Werkzeugpfades keine zusätzlichen Einstellungen notwendig. Als erste Simulation wurde das Schleifen der gesamten Platte durchgeführt. In Abbildung 27 ist in der oberen Ecke das Koordinatensystem mit X-Achse in Rot, Y-Achse in Grün sowie der Z-Achse in Blau zu erkennen. Außerdem wird der Eintrittsort des Werkzeugs durch einen kleinen roten Pfeil auf der Oberfläche markiert und der Austrittsort durch einen grünen Pfeil. Die roten Vektoren entlang des Werkzeugpfades geben die Pfadrichtung des Werkzeugs an. Das Werkzeug beginnt am linken Rand und fährt den Pfad entlang der Vektoren ab. Diese Bewegung wird anschließend vom Programm als Animation dargestellt, wodurch sich überprüfen lässt, ob das Werkzeug wie gewünscht arbeitet. Insbesondere bei Simulationen, bei denen durch das Werkzeug Material vom Werkstück abgetragen wird, ist dies von Vorteil. In Abbildung 28 sind die Simulationseinstellungen des Fugenschleifens zu erkennen. Die Orientierung des Koordinatensystems ist identisch, da es sich um die gleiche Platte und dasselbe Werkzeug handelt. Zunächst wird die große Längsfuge und im Anschluss die beiden kurzen Querfugen abgefahren.

6 Robotertest mit Universal Robots zum Schleifen einer Trockenbauplatte

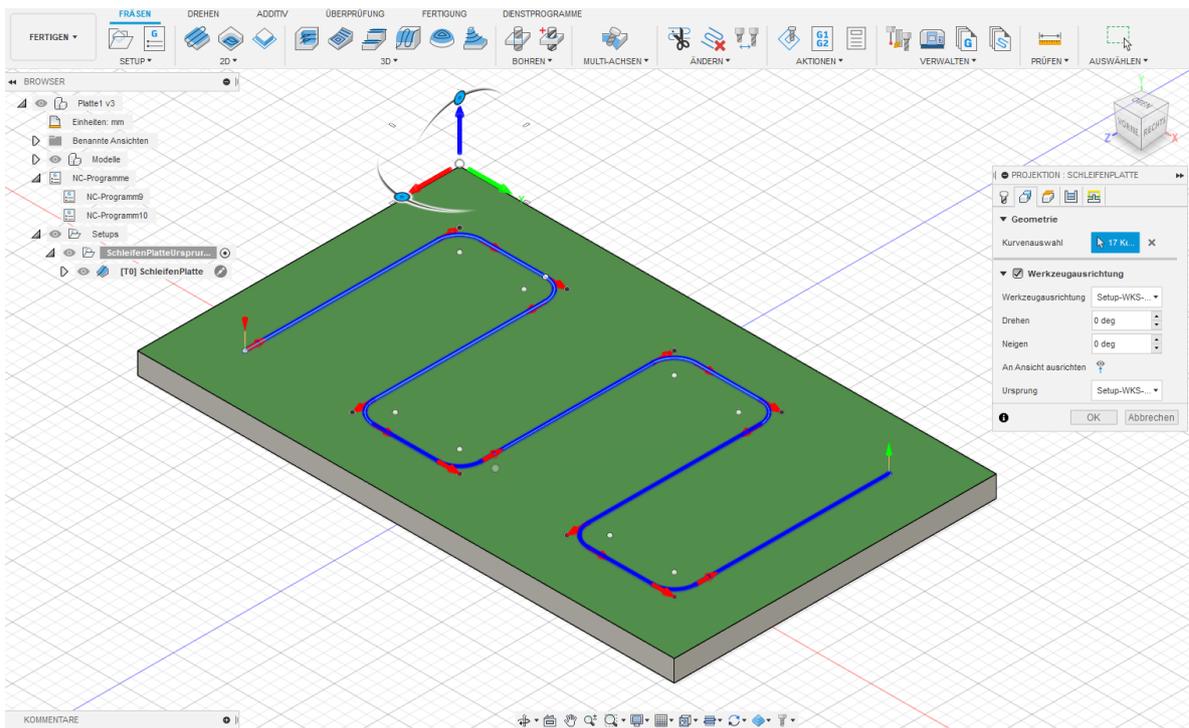


Abb. 27 Simulation zum Schleifen der gesamten Platten, Autodesk Fusion 360²⁷

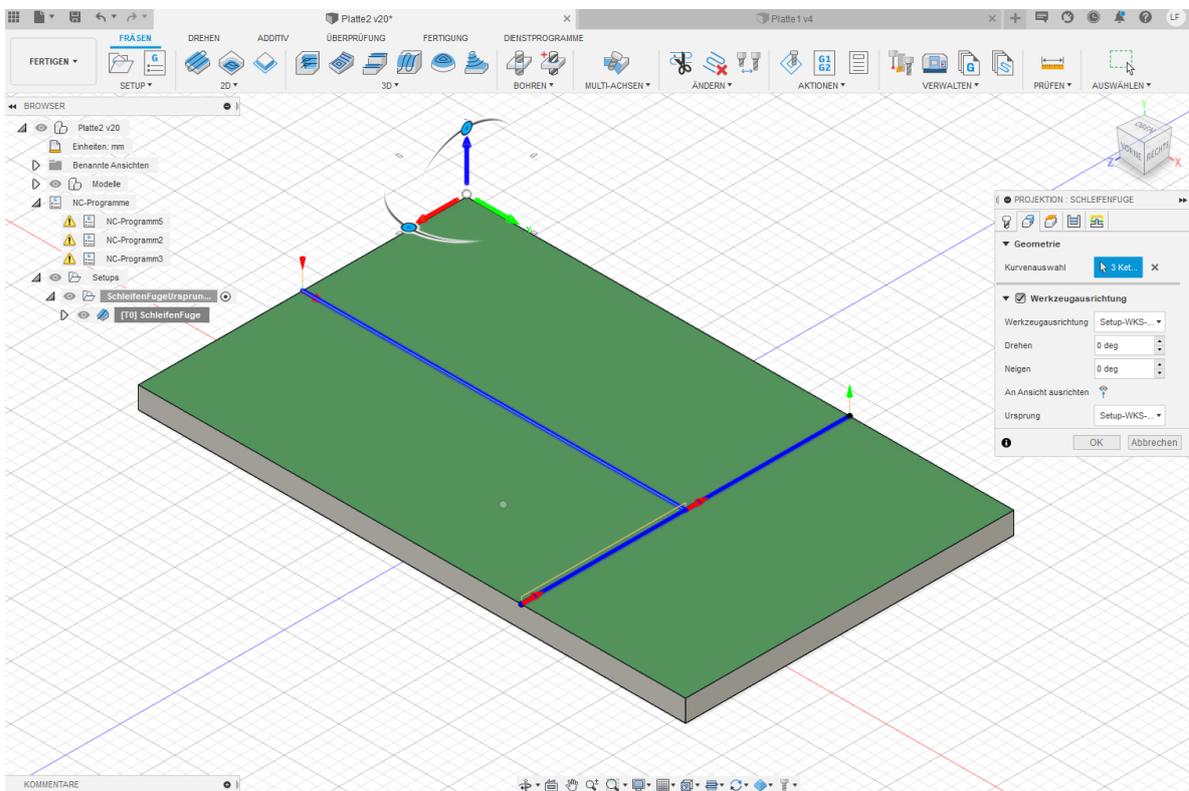


Abb. 28 Simulation zum Schleifen der Fugen, Autodesk Fusion 360²⁸

²⁷ Quelle: Eigene Aufnahme

²⁸ Quelle: Eigene Aufnahme

Um die Simulationen abschließend für den Robotertest nutzen zu können, müssen die Daten aus dem Programm in ein für den Roboter lesbares Format exportiert werden. Diese Nachbearbeitung der Daten, eng. Post Processing, ist in Fusion 360 direkt über den Befehl „Postprozess“ möglich. Auf diese Weise kann aus den Setups des Arbeitsbereichs „Fertigen“ ein mit Hilfe der Programmiersprache „G-Code“ eine NC-Datei erzeugt werden, um maschinennahen Quellcode zu generieren und zu exportieren. Auch hierfür gibt es eine interne Bibliothek, die es ermöglicht, für verschiedene Hersteller Quellcode mit maschinenspezifischen Informationen zu erzeugen. Auch für UR bietet Fusion 360 einen eigenen Post Prozessor an, mit welchem der G-Code für den UR5e der HWK generiert wurde. Wie in Abbildung 29 auf der rechten Seite dargestellt können dabei diverse zusätzliche Einstellungen beispielsweise Modifikationen zum TCP oder ein Versatz des Koordinatensystems in die NC-Datei aufgenommen werden.

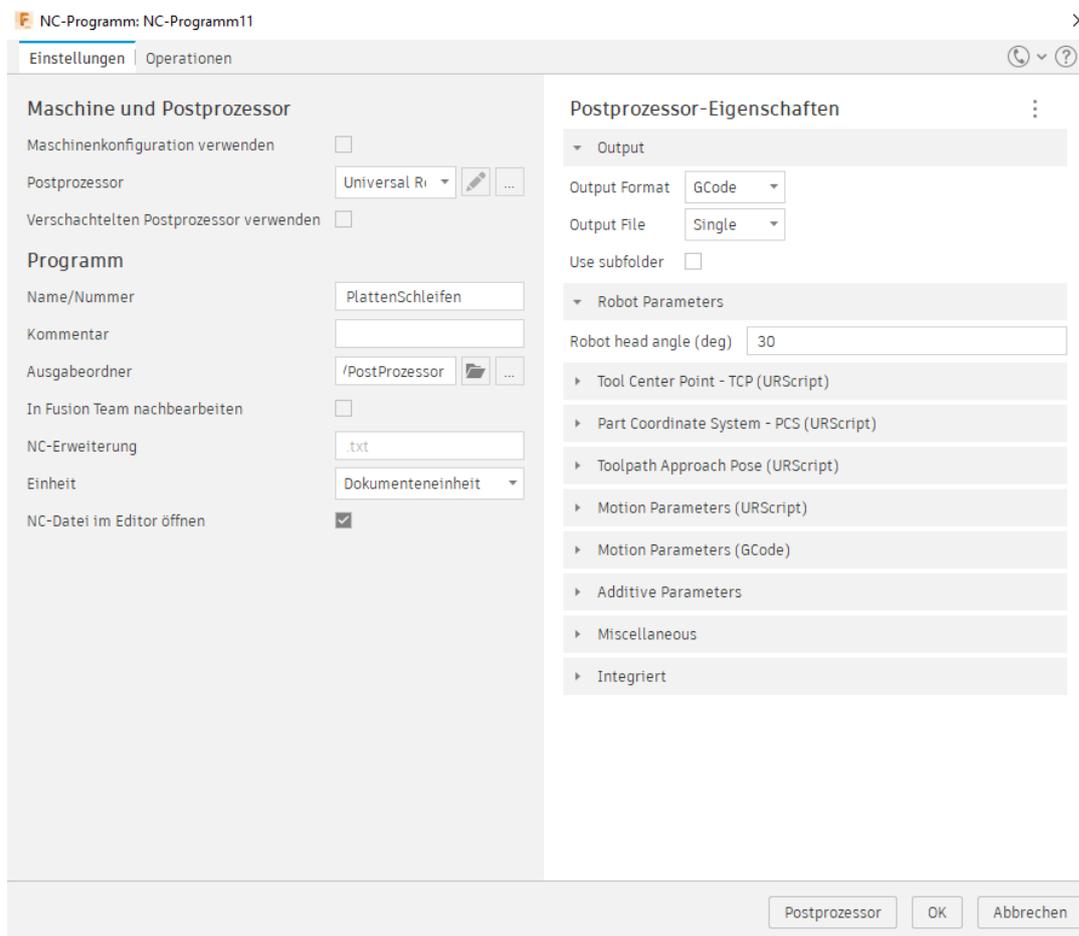


Abb. 29 UR Postprozessor, Autodesk Fusion 360²⁹

Auf diese Weise wurde die Simulation exportiert und für den Roboter aufbereitet. Für das Schleifen der gesamten Platte wurden ein Quellcode von 336 Zeilen erzeugt, für das Fugenschleifen hingegen nur 33 Zeilen. Der große Unterschied um den Faktor 10 kommt

²⁹ Quelle: Eigene Aufnahme

unter anderem durch die Verschleifpunkte und Krümmung sowie den längeren Werkzeugpfad für das Schleifen der gesamte Platte zu Stande. In dem Quellcode sind neben den obligatorischen Informationen zum Programm und dem Erstellungsdatum die Abfolge der Koordinaten, die der TCP des Roboters abfahren soll. Dabei wird das interne Koordinatensystem des verwendeten Setups als Bezug für die Wegpunkte herangezogen. Ein Ausschnitt des Quellcodes für das Schleifen der gesamten Platte ist in dem folgenden Quelltext dargestellt.

Quelltext 1"LF-Diplom-GanzePlatte.nc"

Quelle: Fuchs Lukas

```
1  %
2  (G-code output for Universal Robots' Remote TCP & Toolpath URCap)
3  (Generated by AUTODESK Fusion 360 CAM 2.0.10940)
4  (Post version: 43352)
5  (Creation date: Thursday, September 09, 2021 11:12:11)
6  N1 G90
7  N2 G21
8  (Spindle Speed      = 1 RPM)
9  (Tool                = 0)
10 (Toolpath name      = Projektion1_2)
11 (Head angle         = 30 deg)
12 N3 G00 X251. Y51. Z15. F100
13 (First Toolpath Point)
14 N4 X251. Y51. Z4.
15 (Lead In Move Starts)
16 N5 G01 X251. Y51. Z-1. F1
17 (Cutting Move Starts)
18 N6 X71. Y51. Z-1.
19 N7 X70.128 Y51.019 Z-1.
20 N8 X69.257 Y51.076 Z-1.
21 N9 X68.389 Y51.171 Z-1.
22 N10 X67.527 Y51.304 Z-1.
23 N11 X66.671 Y51.474 Z-1.
```

```
24 N12 X65.824 Y51.681 Z-1.  
25 N13 X64.986 Y51.926 Z-1.  
26 N14 X64.16 Y52.206 Z-1.  
27 N15 X63.346 Y52.522 Z-1.  
28 N16 X62.548 Y52.874 Z-1.  
29 N17 X61.765 Y53.26 Z-1.  
30 N18 X61. Y53.68 Z-1.  
31 N19 X60.254 Y54.132 Z-1.  
32 N20 X59.528 Y54.617 Z-1.  
33 N21 X58.825 Y55.133 Z-1.  
34 N22 X58.144 Y55.679 Z-1.
```

In dem Quellcode ist beispielsweise in den Zeilen 8 bis 11 der Export der Werkzeugeinstellungen erkennbar. Ab Zeile 18 werden die Wegpunkte des Werkzeugpfades definiert. Das ist daran zu erkennen, dass diese Punkte alle die gleiche Z-Koordinate besitzen und damit auf einer Ebene liegen. Des Weiteren unterscheiden sich dabei die X- und Y-Koordinaten der einzelnen Wegpunkte kaum, was auf eine Vielzahl von Wegpunkten hindeutet und die Codelänge erklärt. Die beiden vollständigen Quellcodes sind im Anhang beigefügt.

6.2. VERSUCHSAUFBAU UND VORBEREITUNG

Bevor die Roboterversuche durchgeführt werden können, müssen verschiedene Vorarbeiten erledigt werden. Zum einen müssen die Trockenbauplatten vorbereitet und auf dem Robotertisch eingespannt werden und zum anderen muss der Universal Roboter 5 e-Series (UR5e) konfiguriert sowie das Roboterprogramm für das Schleifen geschrieben werden. Die Vorbereitung, der Aufbau und die Versuche selbst wurden vor Ort in der HWK Dresden durchgeführt. Im Folgenden werden diese Vorbereitungsschritte genauer erläutert.

6.2.1. VORBEREITUNG DER TROCKENBAUPLATTE

Bei den Trockenbauplatten, die für den Versuch eingesetzt werden, handelt es sich um imprägnierte Gipskartonplatten mit einer Dicke von 20 mm, wie sie in Feuchträumen verbaut werden. Die Platten stammen von der Dresdner Baustelle Annenhöfe des Praxispartners Ed. Züblin. Zunächst wurde auf der Platte der Arbeitsbereich abgemessen und gekennzeichnet. Dieser Bereich entspricht der modellierten Platte mit einer Länge von 500 mm und einer Breite von 300 mm. Des Weiteren wurde zur besseren Übersicht das Koordinatensystem mit positiver X- und Y-Achse eingezeichnet. Die Orientierung der im Roboter konfigurierten Achsen muss identisch mit dem Koordinatensystem in Fusion 360 sein. Eine der Platten ist in Abbildung 30 dargestellt, wobei der Bereich lotrecht abgemessen und per Bleistift eingezeichnet wurde. Der Koordinatenursprung ist in der oberen Ecke markiert.



Abb. 30 Vorbereitete Trockenbauplatte für den Schleifvorgang³⁰

³⁰ Quelle: Eigene Aufnahme

Im Anschluss wurde die Platte horizontal auf der Arbeitsfläche des Robotertischs eingespannt. Dadurch wird ein Verrutschen der Platten verhindert. Hierfür wurden mit einem Schraubendreher zwei Aluprofile aus dem Robotertisch herausgelöst und Spannwerkzeuge eingeschraubt, um mit diesem die Trockenbauplatte, wie in Abbildung 31 erkennbar, zu fixieren. Der handwerkliche Vorgang im Innenausbau wird an Platten vorgenommen, die vertikal an Aluprofile geschraubt sind. Ein vertikaler Einspann war auf Grund der Beschaffenheit des Robotertischs und den Spannwerkzeugen nicht möglich.



Abb. 31 Einspannung Trockenbauplatte auf Robotertisch³¹

³¹ Quelle: Eigene Aufnahme

6.2.2. KONFIGURATION DES UNIVERSAL ROBOTS

Nach den Vorbereitungen der Trockenbauplatten wurde der UR5e konfiguriert. Um die Schleifvorgänge durchführen zu können, sind drei zusätzliche Einstellungen unter dem Menüpunkt „Installation“ im Teach Pendant des Roboters angelegt worden. Zum einen musste die Arbeitsebene definiert und zum anderen das Schleifwerkzeug konfiguriert werden. Außerdem musste die NC-Datei für den Werkzeugpfad per USB-Stick importiert werden.

Als erstes wurde die Arbeitsebene des jeweiligen Schleifvorgangs definiert, welche die Oberfläche der eingespannten Trockenbauplatte digital abbildet. Über das schrittweise Anfahren von Achsen oder Punkten mit dem TCP des Werkzeugs werden Informationen zur Ebene hinterlegt. Je genauer der TCP dabei anliegt, desto besser ist die Ebene definiert. Da der exakte TCP des Schleifgeräts schwer zu erkennen ist, wurde, um die Genauigkeit zu verbessern, anstelle des Schleifwerkzeugs ein zusätzliches Werkzeug mit einem spitz zulaufenden TCP angeschlossen und konfiguriert. Hierfür wurde ein Greifer der Firma Robotiq genutzt, um einen Innensechskant mittig zu halten. Dadurch konnte, wie in Abbildung 32 zu erkennen ist, die genaue Verschiebung des TCPs in Richtung der Z-Achse des Werkzeugs eingemessen und hinterlegt werden. Im Anschluss wurde für die Konfiguration der Ebene zunächst der Ursprung des Koordinatensystems mit dem TCP angefahren. Hierfür wurde die Spitze des Werkzeugs auf den markierten Ursprung der Trockenbauplatte gelegt. Im Anschluss musste die positive X- und Y-Achse der Ebene abgefahren werden. Dazu wurde der TCP entlang der im Vorhinein eingezeichneten Achsen bewegt. Der Vorgang ist in Abbildung 33 dargestellt. Alternativ kann eine Ebene auch über die Eingabe bzw. das Abfahren von drei Fixpunkten, die in der Ebene liegen, bestimmt werden.



Abb. 32 Modifizierter Robotergreifer für Installation der Arbeitsebene³²

³² Quelle: Eigene Aufnahme

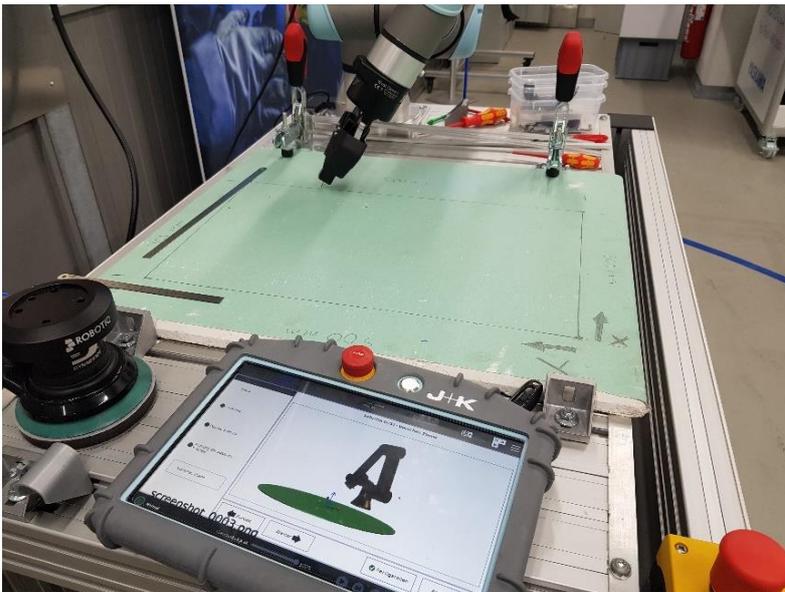


Abb. 33 Installation der Arbeitsebene UR5e, Abfahren der Achsen³³

Nachdem die Ebene konfiguriert wurde, kann diese intern unter dem Reiter „Installation“ des Teach Pendant verwaltet werden. Die Ebene kann nun dauerhaft für verschiedene Roboterprogramme genutzt und angepasst werden. Dabei wird, wie in Abbildung 34 auf dem Teach Pendant zu sehen ist, der Ursprung und die Relation der Ebene zum Roboter schematisch dargestellt.

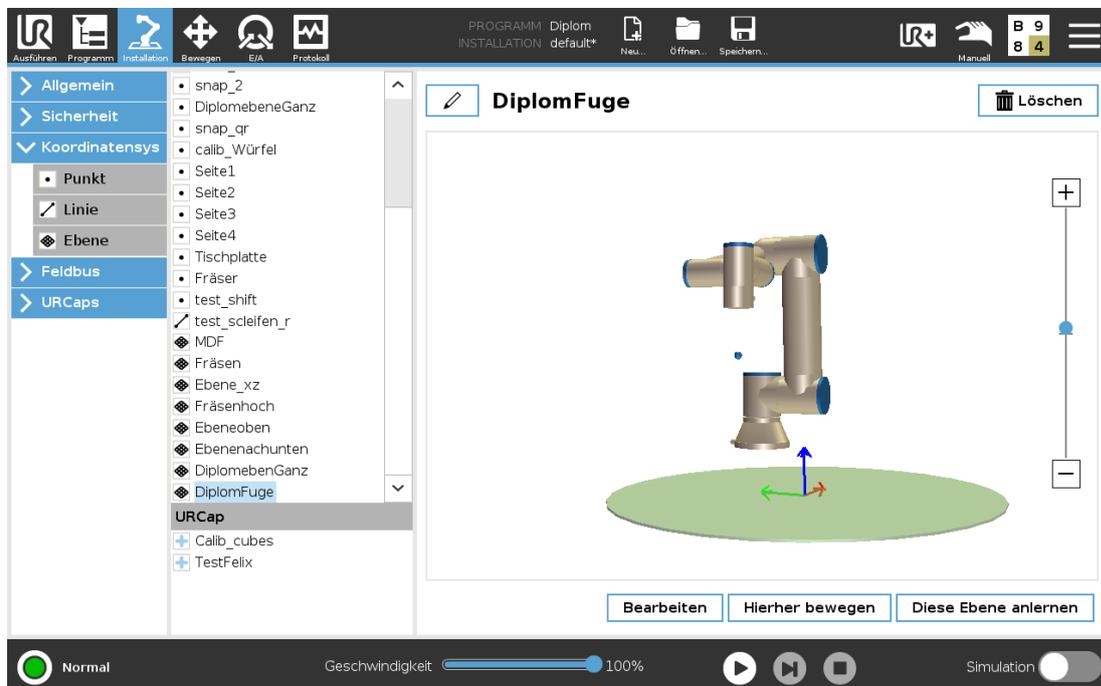


Abb. 34 Ebenenvorschau Teach Pendant UR5e³⁴

³³ Quelle: Eigene Aufnahme

³⁴ Quelle: Eigene Aufnahme

Als zweiter Schritt wurde die aus den Simulationen generierte NC-Datei in den UR5e geladen. Dafür besitzt das Teach Pedant einen USB-Anschluss, um unter anderem USB-Massenspeicher anzuschließen. Die NC-Datei Dateien müssen dabei im Stammverzeichnis des Speichermediums und in dem NC-Dateiformat vorliegen. Die Option zum Import von Werkzeugpfad-Dateien befindet sich ebenfalls unter dem Reiter „Installation“ und wird in Abbildung 35 dargestellt. Die Werkzeugpfade sind im Anschluss dauerhaft für alle Programme verwendbar.

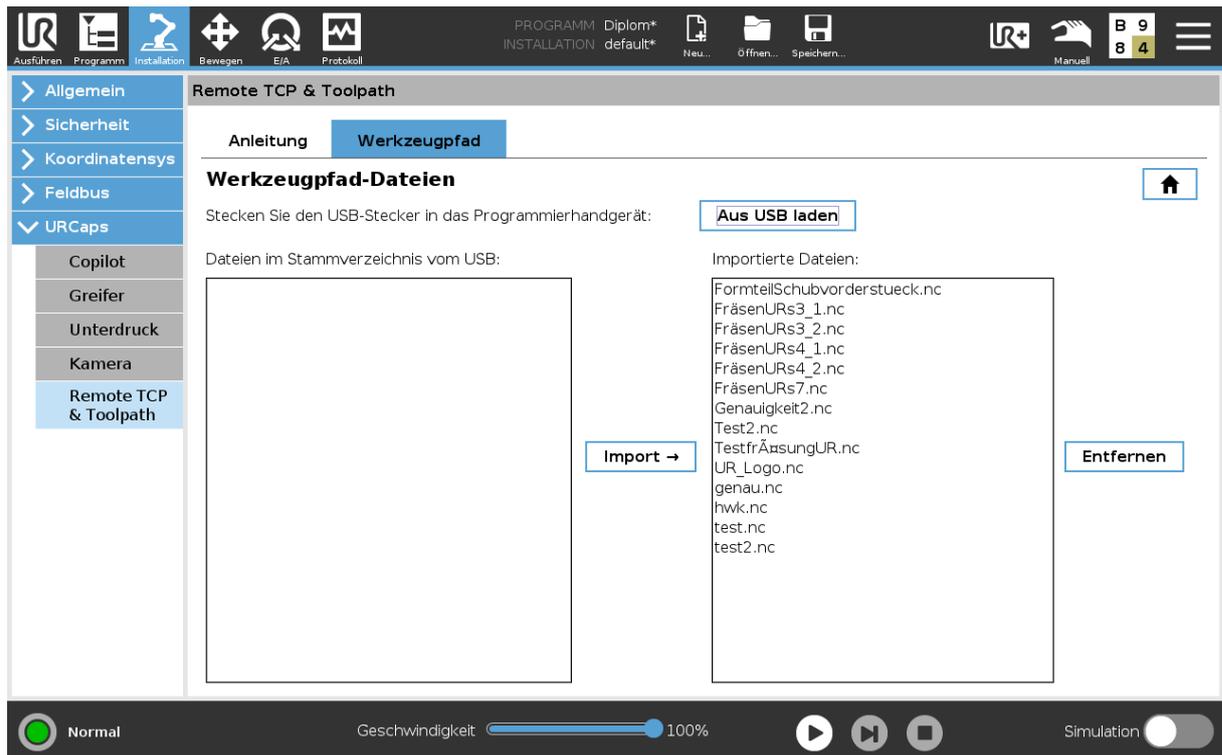


Abb. 35 Import von Werkzeugpfad-Dateien UR5e³⁵

Abschließend wurde das Schleifgerät von Robotiq an den Roboter angeschlossen und konfiguriert. Zunächst wurde die Verkleidung und anschließend das Werkzeug selbst mit einem Innensechskant angeschraubt. In dem Menüpunkt „TCP“ unter dem Reiter „Installation“ können neue Werkzeuge hinzugefügt und die bestehenden verwaltet werden. Damit das Werkzeug für den Schleifvorgang eingesetzt werden kann, muss nach Herstellerangaben die Z-Achse in Richtung des Toolflansches orientiert sein. Standardmäßig zeigt bei der Installation von neuen Werkzeugen mit dem UR5e diese Z-Achse jedoch vom Toolflansch weg. Deswegen wurde ein Rotationsvektor für die X-Achse von 180° eingestellt, um die Achse in die korrekte Richtung zu drehen. Außerdem wurde die Verschiebung des TCPs zunächst per Hand eingemessen und eingespeichert. Die Verschiebung in der Z-Achse von 114 mm und der Rotationsvektor sowie eine Vorschau des TCPs ist in Abbildung 36 erkennbar.

³⁵ Quelle: Eigene Aufnahme

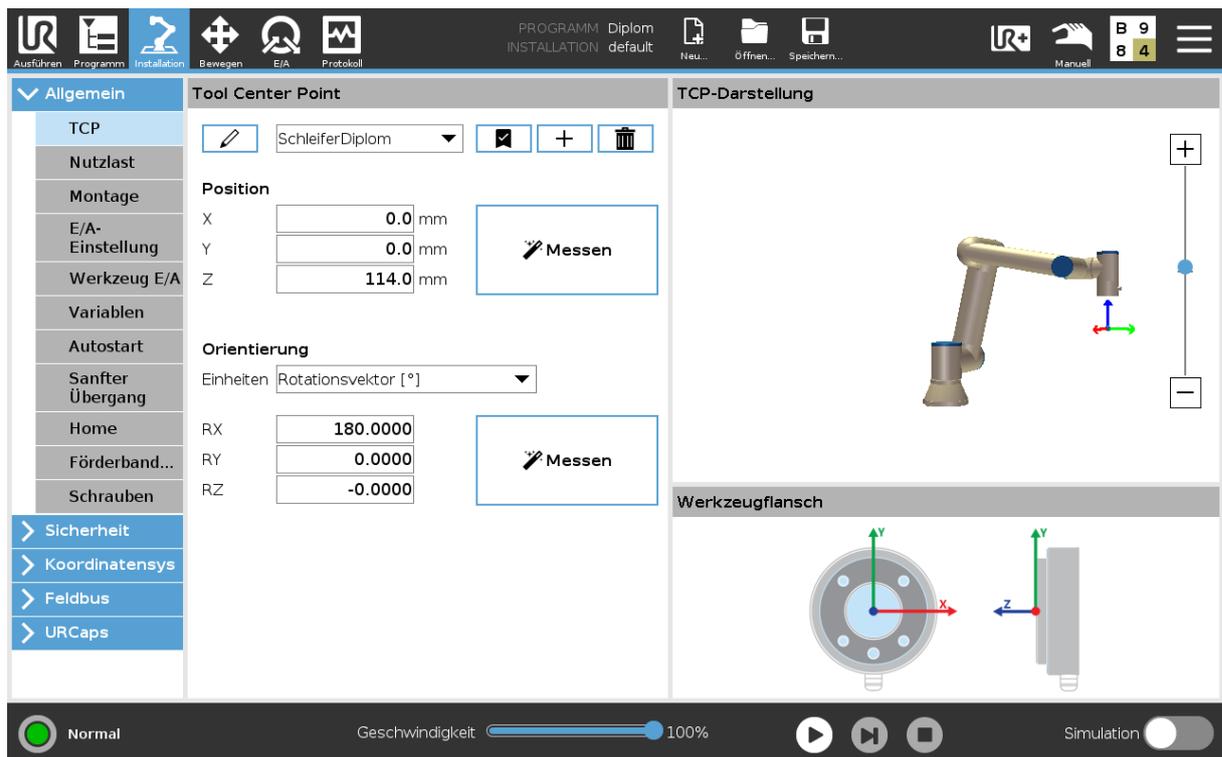


Abb. 36 Kennwerte des Schleifwerkzeugs UR5e³⁶

6.2.3. ROBOTERPROGRAMM

Nachdem die Konfigurationen unter dem Reiter „Installation“ abgeschlossen wurden, konnte das Roboterprogramm geschrieben werden. Hierfür wurde der Reiter „Programm“ des UR5e genutzt, in diesem werden sämtliche Programme abgespeichert und verwaltet. Der Programmbaum für das Roboterprogramm der Schleifvorgänge ist dazu in Abbildung 37 dargestellt, der Code ist für beide Tests identisch. Zunächst wartet das Programm in Zeile 2 auf ein Eingangssignal, welches als Input-1 hinterlegt ist. Durch den Knopfdruck von Input-1 wird das angeschlossene Werkzeug gestartet und das Programm beginnt. Das Programm kann ausschließlich durch Knopfdruck gestartet werden, wodurch ein versehentliches Starten verhindert wird. Im Anschluss fährt der Roboter zunächst in seine neutrale Grundposition, wenn er sich nicht bereits in dieser befindet. Die Grundposition befindet sich über der Platte mit ausreichend Abstand, um den Zugang zur Platte vor und nach dem Schleifvorgang zu ermöglichen. In Zeile 6 wird der Befehl „Werkzeugpfad_FahreP“ aufgerufen. Dieser teilt dem Roboter mit, dass er einen importierten Werkzeugpfad mit dem TCP abfahren soll. Dazu muss in dieser Zeile der gewünschte TCP ausgewählt werden. Des Weiteren wurde eine Werkzeuggeschwindigkeit von 40 mm/s eingestellt. Im Anschluss werden in Zeile 7 weitere Parameter für den Werkzeugpfad eingestellt. Auf der rechten Seite der Abbildung 37 ist dabei das Dropdownmenü zur Auswahl

³⁶ Quelle: Eigene Aufnahme

6 Robotertest mit Universal Robots zum Schleifen einer Trockenbauplatte

des Werkzeugpfades und der Arbeitsebene zu sehen. Diese müssen für den jeweiligen Schleifvorgang abgestimmt sein. Für die NC-Datei „SchleifenFugen.nc“ muss, wie in der Abbildung erkennbar, die Arbeitsebene „DiplomFuge“ ausgewählt werden. Im Umkehrschluss gilt das gleiche für das Schleifen der gesamten Platte. Außerdem können in Zeile 7 die Werkzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung nochmals angepasst werden. Nachdem der Werkzeugpfad vollständig abgefahren wurde, bewegt sich der Roboter in seine Grundposition zurück und das Schleifgerät wird abschließend automatisch ausgeschaltet. Insgesamt umfasst das Roboterprogramm nur 10 Zeilen und es kann dauerhaft über das Teach Pendant des UR5es aufgerufen sowie verwaltet werden. Das Programm kann durch den Play-Button in der unteren Leiste, wie in Abbildung 37 zu sehen ist, gestartet werden.

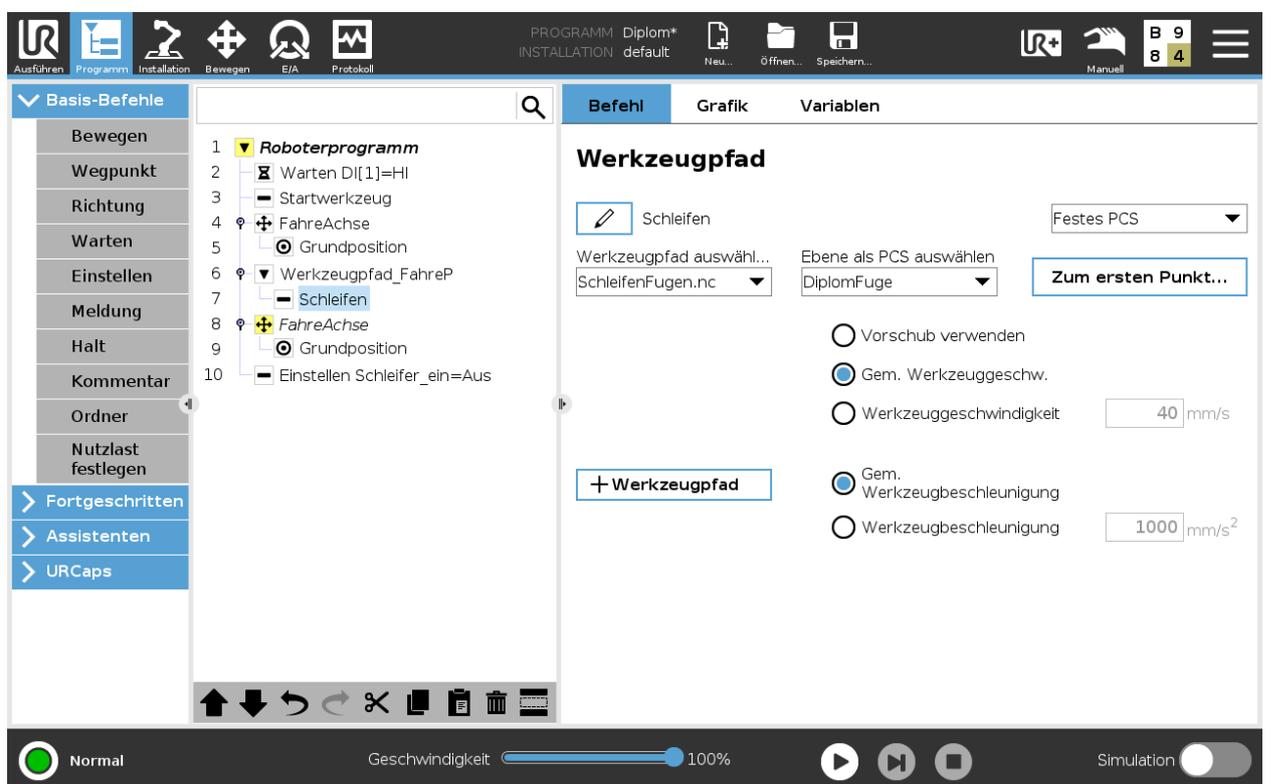


Abb. 37 Roboterprogramm zum Schleifen UR5e³⁷

³⁷ Quelle: Eigene Aufnahme

6.3. TESTDURCHFÜHRUNG

Bei dem UR5e, der für die Durchführung der Tests in der HWK eingesetzt wurde, handelt es sich um einen sog. kollaborativen Roboter, der mit Menschen zusammenarbeiten soll. Durch seine vielseitigen Einsatzmöglichkeiten kommt er in verschiedensten Branchen zum Einsatz und gehört zu den meist verkauften kollaborativen Robotern weltweit (Jugard+Künstner GmbH, 2021). Der Roboter besitzt sechs Gelenke, welche sich jeweils um 360° drehen können und deckt dadurch einen Arbeitsradius von 850 mm ab. Die maximale Traglast beträgt 5 kg bei einem Gesamtgewicht des Roboters von 20,6 kg. Die Steuerung des Roboters erfolgt über das Teach Pendant, welches mit dem Steuergerät verbunden ist. In diesem Steuergerät werden ebenfalls sämtliche digitale Ein- und Ausgänge sowie die Steuersignale und die Stromversorgung des Roboters angeschlossen und verarbeitet. Je nach Einsatz können die UR5e beispielsweise an Förderbändern fixiert oder in Roboterzellen eingehaust werden. Der Roboter in der HWK ist fest auf einem sog. Robotertisch aus Aluminium ohne Sicherheitszelle befestigt. Auf diesem Robotertisch wurden auch die Schleifarbeiten dieser Diplomarbeit durchgeführt. In Abbildung 38 ist der UR5e beim Sortieren von Holzwürfeln anhand von Farben zu sehen.



Abb. 38 UR5e in der HWK Dresden³⁸

³⁸ Quelle: Eigene Aufnahme

Als Werkzeug wurde das Schleifkit des Herstellers Robotiq mit einem Sockeldurchmesser von 5 Zoll eingesetzt. Das Werkzeug ist in der Lage, komplexe Oberflächen aus diversen Materialien wie Holz, Kunststoff oder Metall zu bearbeiten (Robotiq, 2019). Zunächst wurde die Halterung an den Toolflansch des UR5e und anschließend das sog. Orbitalwerkzeug angeschraubt. Im Anschluss wurde ein feines Schleifpapier mit einer Körnung von 120 aufgebracht. Der Test wird im Gegenzug zum handwerklichen Vorgang auf einer horizontalen anstelle einer vertikalen Ebene durchgeführt. Der Schleifvorgang ist dennoch repräsentativ, da der Roboter durch seine Gelenke ebenso in der Lage ist, eine senkrechte Arbeitsebene zu bearbeiten. Abschließend wurde der Druckluftschlauch an das Schleifgerät angeschlossen und der Hahn an der Druckluftzufuhr aufgedreht. Der eingestellte Luftdruck betrug 6 bar. Im Folgenden wird die Durchführung der beiden praktischen Schleifversuche mit dem UR5e und dem Schleifkit erläutert.

6.3.1. SCHLEIFEN DER PLATTENFLÄCHE

Der Test wurde am 9. September 2021 in der HWK durchgeführt. Dabei wurden für das Schleifen der Plattenfläche die entsprechenden Einstellungen und Konfigurationen des UR5e für Ebene, Werkzeug sowie den Werkzeugpfad ausgewählt. Als erstes wurde der Test ohne die Trockenbauplatte durchgeführt, um zu testen, ob die Ebene richtig eingestellt und der Werkzeugpfad korrekt abgefahren wird. Nachdem dies erfolgreich verifiziert wurde, konnte die Trockenbauplatte erneut auf dem Robotertisch eingespannt werden. Bei der ersten Durchführung fiel jedoch auf, dass der TCP des Schleifwerkzeugs zu nah am Toolflansch konfiguriert wurde. Das Werkzeug fuhr den vorgegebenen Werkzeugpfad ab, berührte aber dabei nicht die Oberfläche der Trockenbauplatte. Der TCP wurde im Anschluss angepasst und der Test erneut durchgeführt. Bei diesem zweiten Test wurde die Oberfläche der Platte erfolgreich durch das Schleifgerät bearbeitet. Des Weiteren wurde durch das Abschleifen geringfügig Material von der Oberfläche der Trockenbauplatte abgetragen und als Staub freigesetzt. Ein Ausschnitt des Schleifvorgangs ist in Abbildung 39 dargestellt.

Die Gesamtlänge des Werkzeugpfades resultiert aus der in Abbildung 40 dargestellten Skizze sowie der Gleichung 6.1. Insgesamt betrug die Pfadlänge für das Schleifen der Plattenfläche ca. 150 cm. Die benötigte Zykluszeit vom Drücken des Startknopfs bis zur Rückkehr in die Ausgangsposition des Werkzeugs betrug 45 Sekunden.

$$\text{Pfadlänge} = 5 * 200 \text{ mm} + 4 * 60 \text{ mm} + 8 * \frac{1}{4} * \pi * 40 \text{ mm} = 1491,23 \text{ mm} \quad (6.1)$$

6 Robotertest mit Universal Robots zum Schleifen einer Trockenbauplatte



Abb. 39 Robotertest Schleifen der Platte³⁹

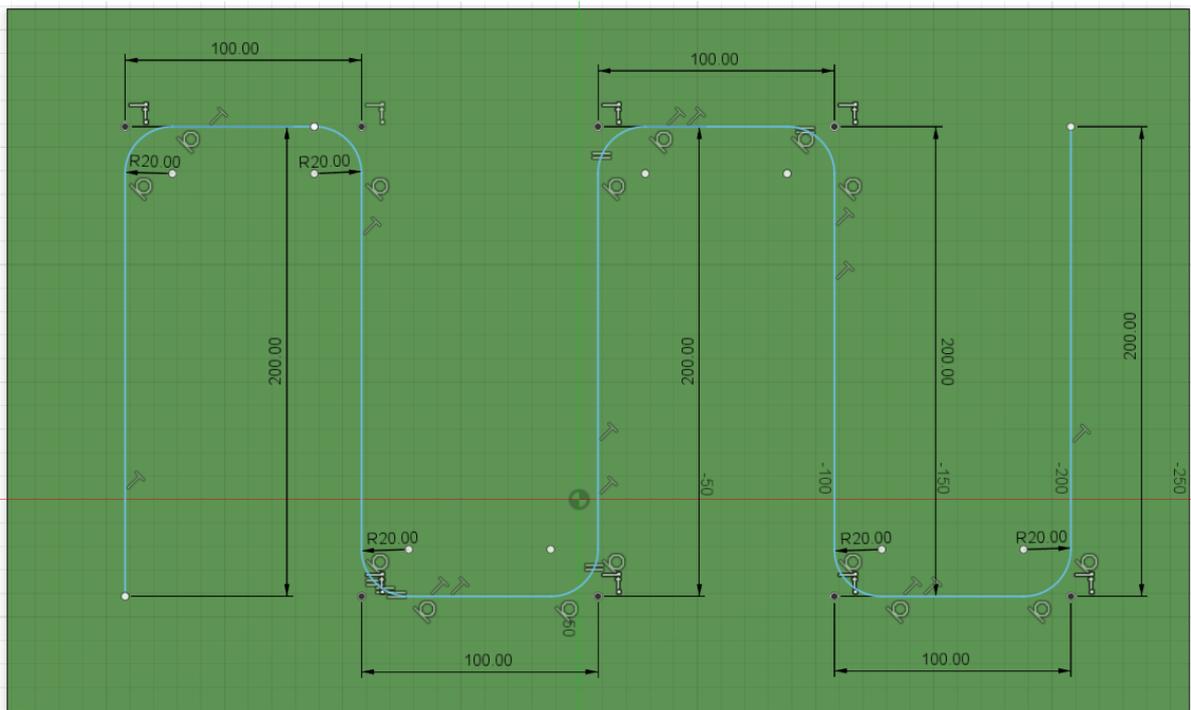


Abb. 40 Abmessungen Werkzeugpfad Plattenschleifen, Fusion 360⁴⁰

³⁹ Quelle: Eigene Aufnahme

⁴⁰ Quelle: Eigene Aufnahme

6.3.2. SCHLEIFEN DER PLATTENFUGEN

Da im Regelfall nicht die gesamte Trockenbauplatte, sondern nur die Fugen abgeschliffen werden, wurde ein zweiter Versuch am 6. Oktober 2021 durchgeführt. Bei diesem wurden auf der Platte eine Längs- sowie eine Querfuge angeordnet. Zur Kontrolle des Werkzeugpfads wurde, wie beim ersten Versuch, zunächst ein Testlauf ohne Platte durchgeführt. Nachdem dieser erfolgreich war, wurde ebenso die Trockenbauplatte wieder auf dem Robotertisch eingespannt und die entsprechenden Konfigurationen für Ebene und TCP eingestellt. Im Gegensatz zum Schleifen der Plattenfläche wurde beim Fugenschleifen der TCP zu weit weg vom Toolflansch konfiguriert, sodass die Plattenoberfläche stark abgeschliffen wurde. Dadurch wurde ebenso eine große Menge Staub freigesetzt und die Plattenoberfläche beschädigt. Ein Ausschnitt des Vorgangs und die Spur des Schleifwerkzeugs ist in Abbildung 41 dargestellt.

Die Gesamtlänge des Werkzeugpfades resultiert aus der in Abbildung 41 dargestellten Skizze sowie der Gleichung 6.2. Insgesamt betrug die Pfadlänge für das Schleifen der Fugen ca. 65 cm. Das Werkzeug muss jedoch nach der ersten Fuge umgesetzt werden, bevor die zweite Fuge geschliffen werden kann. Diese Strecke wurde nicht auf die Pfadlänge aufgerechnet. Die benötigte Zykluszeit vom Drücken des Startknopfs bis zur Rückkehr in die Ausgangsposition des Werkzeugs betrug 45 Sekunden.

$$\text{Pfadlänge} = 350 \text{ mm} + 2 * 150 \text{ mm} = 650 \text{ mm} \quad (6.2)$$

6.4. ERGEBNISSE UND BAUPRAKTISCHE BEWERTUNG

Im Folgenden werden die durchgeführten Schleifversuche, sowie die dafür notwendigen technischen und digitalen Vorarbeiten kritisch ausgewertet. Dabei werden zunächst die Möglichkeiten und Hindernisse der eingesetzten Programme sowie der Datenschnittstellen untersucht. Im Anschluss wird der UR5e selbst als Arbeitsumgebung bewertet. Dabei wird auch ein Ausblick für einen möglichen Einsatz eines URs für Bauprojekte gegeben und wie hierfür Arbeitsebenen und Werkzeuge vorbereitet werden müssen. Des Weiteren wird die Qualität der durchgeführten Schleifarbeiten ausgewertet. Insbesondere die Möglichkeiten zur Qualitätskontrolle der durch einen Roboter ausgeführten Arbeiten spielt bei einem Baustelleneinsatz eine zentrale Rolle. Abschließend wird untersucht, ob und wie sich die angewandte Methodik des Ex- und Import mit Hilfe von G-Code auch auf andere Bauprozesse übertragen lässt.

6.4.1. SCHNITTSTELLEN UND PROGRAMMIERUMGEBUNG

Die Modellierung mit Autodesk Fusion 360 ist merklich auf andere Anwendungen ausgelegt als die übliche CAD Programme, die für Bauingenieurszwecke verwendet werden. Dennoch konnte die Modellierung der Werkstücke zielführend und angemessen umgesetzt werden. Da das Programm zu der Autodesk Familie gehört, wäre insbesondere eine Schnittstelle zum direkten Modellaustausch zwischen den Autodesk Programmen wünschenswert. Dadurch könnten bereits modellierte Projekte aus beispielsweise Autodesk Revit oder AutoCAD ohne erneuten Modellierungsaufwand in Fusion 360 importiert werden. Zwar unterstützt Fusion 360 den Import von DWG- oder DXF-Dateien, diese können jedoch nur als 2D Zeichengrundlage genutzt werden. Auch der Datenaustausch über die Industry Foundation Classes (IFC) wird nicht unterstützt.

Bei den in Fusion 360 erstellten Setups, wird ausschließlich das Werkzeug ohne einen Roboter oder eine Maschine simuliert. Die Simulationen unterscheiden sich somit grundlegend von anderen Modellierungsprogrammen für Industrieroboter wie beispielsweise Grasshopper oder RoboDK. Bei diesen Programmen wird, wie in Abbildung 43 dargestellt, der Roboter in seiner Gesamtheit inklusive des Werkzeugs modelliert. Zusätzlich kann in dieser Programmierumgebung auch direkt das Roboterprogramm geschrieben und anschließend ein Arbeitsvorgang simuliert werden. Das Erstellen von maschinennahem Quellcode durch den Einsatz von G-Code ist jedoch nur beschränkt möglich. Dadurch, dass aber nicht nur das Werkzeug, sondern auch der Roboter modelliert wird, können Hindernisse wie Kollisionen oder der maximale Arbeitsradius des Roboters berücksichtigt werden. Wäre beispielsweise ein Teil des modellierten Werkzeugpfades außerhalb des Arbeitsradius des UR5e gewesen, wäre dies erst beim Robotertest aufgefallen.

Speicher des UR geladen werden konnte. Dennoch wurden die Daten des USB-Sticks erst nach mehrfachen Versuchen vom UR5e erkannt. Nach Aussage des Praxispartners in der HWK gibt es hierfür keine eindeutige Erklärung. Um dieses Problem zu beheben, könnte der UR dauerhaft mit einem Datenserver verbunden werden. Auf diesem könnten Werkzeuge, Ebenen, Programme sowie Pfaddateien abgespeichert werden. An diesem Beispiel werden die in Kapitel 3.1 aufgeführten Vor- und Nachteile einer dauerhaften Kommunikation zwischen Roboter und Datenbank sichtbar. Auf einer solchen Datenbank könnte die Installation von Werkzeugen oder Ebenen auf dem Server hinterlegt werden, ohne, dass diese aktiv am Roboter angelernt werden müssen.

6.4.2. KONFIGURATION VON TCP UND ARBEITSEBENE MIT UNIVERSAL ROBOTS

Durch das Teach Pendant des UR5es können die Einstellungen und Programme einfach und ohne zusätzlichen Aufwand über den Touchscreen eingegeben werden. Das Interface ist benutzerfreundlich und strukturiert aufgebaut, sodass die Programmierung intuitiv und mit diversen vorgefertigten Teillösungen erfolgen kann. Ein Roboterprogramm kann jederzeit um einfachen Befehlen oder komplexen Strukturen erweitert werden. Sämtliche Konfigurationen von Ebenen oder Werkzeugen werden unter dem Reiter „Installation“ abgespeichert und können dort verwaltet werden. Alle erstellten Werkzeuge werden über dasselbe Menü angelernt und abgespeichert. Die Funktion, den TCP eines Werkzeugs automatisch von der UR-Software ermitteln zu lassen, ist insbesondere für selbsterstellte Werkzeuge, die beispielsweise mit einem 3D Drucker gefertigt wurden, hilfreich. Für die Eingabe von Rotationsvektoren kann außerdem das Grad- oder Bogenmaß verwendet werden.

Bei einem Einsatz auf einer Baustelle könnten daher die verschiedenen Werkzeuge im Vorhinein konfiguriert werden und der jeweilige TCP des Werkzeugs für den entsprechenden Vorgang ausgewählt werden. Hierfür ist es zwingendermaßen erforderlich, dass die Kennwerte für das Gewicht und die Abmessungen aller Werkzeuge vor ihrem Einsatz bekannt sind. Dennoch sollte während des Einsatzes zusätzlich überprüft werden, ob der TCP richtig eingestellt wurde. Im Fall des verwendeten Robotiq Schleifkits hat es sich gezeigt, dass die aus den Datenblättern entnommenen Kennwerte an den Vorgang angepasst werden müssen.

Eine weitere Herausforderung stellt das Anlernen von Ebenen dar. Im betrachteten Beispiel für das Schleifen der Trockenbauplatten müssten diese in einem digitalen Modell abgebildet sein, um die Position von Fugen bestimmen zu können. In der Baupraxis ist dies jedoch nicht der Fall, da die Trockenbauarbeiten vor Ort durchgeführt werden und die exakte Position und Abmessung der einzelnen Platten im Vorhinein nicht bekannt ist. Theoretisch könnte, nachdem die Platten eingebaut wurden, ein digitales Abbild erstellt werden, was wiederum zusätzlichen Zeitaufwand bedeutet. Auch das Anlernen jeder Platte

als einzelne Ebene ist unpraktisch, da sonst unzählige Ebenen individuell angelernt werden müssen. Daher bietet es sich an, eine vollständige Trockenbauwand als einzelne Ebene in den Roboter zu übernehmen. Diese kann entweder mit dem Roboter angelernt werden oder über einen komplexen Algorithmus bestimmt werden. Es ist denkbar, dass über einen lotrechten Sensor der Abstand von Roboterursprung und Bauteiloberfläche bestimmt werden kann. Aus diesen Informationen könnte der Roboter den Normalenvektor der Ebene und im Zuge dessen auch die Ebenengleichung formulieren. Dabei müsste dennoch ein fester Punkt auf der Ebene als Ursprung definiert werden. Mit Hilfe dieses Stützvektors, der im Modell definiert und punktgenau auf der Baustelle markiert wurde, könnte die digitale und tatsächliche Ebene übereinandergelagert werden.

Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz auf einem Flachdach. In diesem Fall könnte die Stahlbetondecke als Arbeitsebene eingemessen werden und nach jedem Schichtaufbau könnte diese Ebene um die entsprechende Dicke versetzt werden. Hierfür muss im konkreten Einsatz getestet werden, wie groß die Unebenheiten und Toleranzen ausfallen und wie sehr sich diese auf die Arbeit des Roboters auswirken.

6.4.3. QUALITÄTSKONTROLLE DER SCHLEIFARBEITEN

Wie bereits bei der Testdurchführung beschrieben, kam es bei den Schleifarbeiten zur Staubbildung auf Grund des freigesetzten Materials. Insbesondere beim Auftritt des Schleifgeräts wurde schlagartig Material von der Oberfläche der Trockenbauplatten abgetragen. Die Beschädigungen an den beiden Platten sind deutlich in Abbildung 44 und 45 erkennbar. Um derartige Schäden zu vermeiden, empfiehlt es sich einen Kraft-Momenten-Sensor in das Schleifgerät zu integrieren. Dieser steuert die Druckkraft, mit der das Schleifgerät auf die Oberfläche angedrückt wird, wodurch die Beschädigungen an der Platte oder Spachtelmasse reduziert werden. Die Grenzwerte des Anpressdrucks sollten dabei durch praxisnahe Tests ermittelt werden. Um bei den untersuchten Schleifvorgängen einen solchen Sensor benutzen zu können, muss jedoch der Werkzeugpfad angepasst werden. Ist die Z-Koordinate der Wegpunkte zu niedrig eingestellt, kommt es zum Konflikt zwischen Sensor und Werkzeugpfad. Beispielsweise bewegt sich das Werkzeug an einen Wegpunkt heran, bekommt jedoch gleichzeitig die Meldung, dass die maximale Anpresskraft bereits überschritten wurde. Als Lösung muss der Roboter die Z-Koordinate jedes Wegpunktes anhand des Anpressdrucks prüfen und ggf. überschreiben. Hierfür ist zusätzlicher Programmieraufwand notwendig und die Komplexität des Programms wird gesteigert. Neben dem Anpressdruck sollte auch der Einfluss weiterer Faktoren, wie die Körnung des Schleifpapiers, die Umdrehungsgeschwindigkeit des Werkzeugzugs, die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters sowie die Qualität und Beschaffung der Baumaterialien analysiert werden. Diese Parameter können anschließend aufeinander abgestimmt werden, um die Qualität der Schleifarbeiten zu verbessern. Die allgemeine Qualitätskontrolle der Schleifarbeiten gestaltet sich ebenfalls schwierig. Eine Kamera erkennt zwar offensichtliche Verwerfungen oder Löcher, ob auch feine Unebenheit von der Kamera

erfasst werden können ist jedoch fraglich. Alternativ kann die Qualität auch bei einer Überprüfung durch die Bauleitung sichergestellt werden. Diese sollte stattfinden, bevor der Roboter sich selbstständig umpositioniert und den nächsten Arbeitsabschnitt bearbeitet.

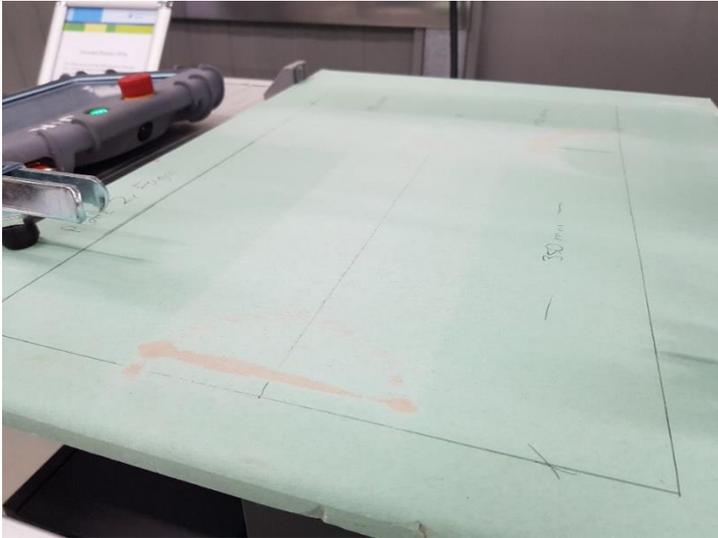


Abb. 44 Beschädigung Trockenbauplatte durch Fugenschleifen⁴⁴



Abb. 45 Beschädigung Trockenbauplatte durch Flächenschleifen⁴⁵.

⁴⁴ Quelle: Eigene Aufnahme

⁴⁵ Quelle: Eigene Aufnahme

6.4.4. WEITERE BAUPRAKTISCHE ANWENDUNGSBEISPIELE FÜR G-CODE

Für Bauprozesse, bei denen geschlossene Kurven oder Strecken mit dem Werkzeug abgefahren werden, ist der Einsatz von G-Code eine Möglichkeit zur Automatisierung. Neben den Wegpunkten können darüber auch spezifische Werkzeugeinstellungen übergeben werden. Ein großer Vorteil der Programmiersprache G-Code ist hierbei die Standardisierung und herstellerübergreifende Kompatibilität.

Ein mögliches Anwendungsbeispiel ist das Streichen von Oberflächen mit einem Airless Spritzgerät. Beim händischen Verfahren werden dabei versetzte Bahnen nebeneinander gespritzt, bis die Fläche vollständig gestrichen ist. Für eine erfolgreiche Modellierung und Simulation des Vorgangs müssen bestimmte Parameter im Vorhinein ermittelt werden. Beispielsweise muss der vorgesehene Wandabstand für die Roboterplattform sowie der Spritzwinkel der Sprühpistole und die nötige Farbmenge pro Quadratmeter Wandfläche bekannt sein. Mit Hilfe dieser Informationen kann der Werkzeugpfad auf der Oberfläche des Werkstücks programmiert und mit Hilfe von G-Code exportiert werden. Der Versatz zwischen den Bahnen bemisst sich dabei durch den Auftragungswinkel und den Wandabstand. Dabei sollte auf die Grenzbereiche geachtet werden. Ist die Überlappungsfläche zweier Bahnen zu groß, entstehen Farbunterschiede. Ist der Abstand zwischen den Bahnen zu groß in Relation zum Ausbringungswinkel, bleibt ein Streifen ungestrichen. Anhand der Farbsättigung der Oberfläche und der Ausbringungsmenge kann außerdem die Werkzeuggeschwindigkeit ermittelt werden. Beim Exportieren der NC-Datei kann anschließend ein Versatz der Ebene eingestellt werden. Auf diese Weise fährt das Werkzeug mit einem konstanten Abstand zur Wand- oder Deckenoberfläche. Kommt es zu einem Werkzeugwechsel und die Sprühpistole wird ausgetauscht, können zwar der Wandabstand und die Werkzeuggeschwindigkeit durch den UR angepasst werden, die Wegpunkte des Quellcodes jedoch nicht.

Neben dem Schleifen von Trockenbauplatten kann durch G-Code auch eine NC-Datei für das Verspachteln der Plattenfugen zum Einsatz kommen. Die Wegpunkte auf der Oberfläche sind identisch mit denen des Schleifens, da die gleichen Fugen bearbeitet werden. Somit kann aus einer Simulation der Quellcode für beide Arbeitsvorgänge erstellt werden. Für das Aufbringen und anschließende Abziehen der Spachtelmasse können entweder zwei unterschiedliche Werkzeuge eingesetzt oder ein komplexes Werkzeug entworfen werden, welches beide Vorgänge kombiniert. Für eine optimale Werkzeuggeschwindigkeit muss die Ausbringungsmenge mit der Fugentiefe und -breite gegengerechnet werden, wodurch die überschüssige Spachtelmasse reduziert wird. Die Abstimmung der Parameter kann durch Praxistests verbessert werden. Sollte außerdem ein Werkzeugwechsel stattfinden, kann die identische Datei verwendet werden, da die Fugenposition unverändert bleibt. Die neuen Werkzeugparameter können durch das Teach Pendant des URs aktualisiert werden.

Bei der Flachdachkonstruktion gibt es zwei potenzielle Anwendungsmöglichkeiten. Beispielsweise kann die Haftbrücke ebenfalls entlang einer Bahn verteilt werden. Hierbei muss ähnlich wie bei den anderen Vorgängen die Ausbringungsmenge und die benötigte Fläche ermittelt werden, bevor die Bahnen simuliert und als Quellcode exportiert werden können. Als Werkzeug könnte eine Art Rolle entworfen werden, die mit einer standardisierten Breite das Material aufbringt. Anhand dieser Breite könnte die Wegpunkte für das Werkzeug auf der Dachoberfläche programmiert werden.

Eine weitere Anwendung ist das Aufbringen von Schaumkleber für das Verlegen von Dämmplatten. Nach Herstellerangaben sollen für eine optimale Haftung der Dämmplatte einzelne Klebestreifen sog. Klebestränge auf den Untergrund aufgebracht werden. Die Anzahl der Stränge bemisst sich unter anderem an der Bauwerkshöhe, der regionalen Windzone sowie dem Dämmmaterial (Bostik GmbH, 2021). Für die Planung und Simulation des Verklebens, ist ein Verlegeplan der ebenen Dämmplatten notwendig. Anhand der jeweiligen Position einer Platte und den technischen Rahmenlinien der Materialien können dann Rückschlüsse auf die Länge und Orientierung sowie Anzahl der Klebestränge gezogen werden. Die modellierte Arbeitsebene kann entweder das gesamte Flachdach umfassen oder es werden einzelne Arbeitsbereiche definiert. Je nachdem wird eine einzelne große NC-Datei erstellt oder jeder Arbeitsbereich wird separat simuliert und separate Quellcodes erstellt. Das Auftragen der Streifen kann anschließend mit einem Werkzeug simuliert und die Simulationsdaten an einen Roboter exportiert werden. Für den tatsächlichen Arbeitsvorgang muss der Ursprung des Koordinatensystem mit der Simulation übereinstimmen. Dafür ist im Vorhinein ein geeigneter Punkt, beispielsweise eine Ecke des Flachdachs, festzulegen. Für das Verlegen der Dämmplatten selbst ist G-Code hingegen keine gute Option, da es sich um das punktuelle Ablegen von Werkstücken und nicht um einen geschlossenen Werkzeugpfad oder einzelne Strecken handelt.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND FORSCHUNGSAUSBLICK

Der effektive und sichere Einsatz einer Roboterplattform für Bauvorhaben ist eine vielschichtige Herausforderung. Es existieren zwar kommerziell verfügbare Systeme wie von der Malerroboter von Okibo, das Angebot und die Spezialisierung dieser Roboter ist jedoch im Vergleich zu anderen Industriezweigen, wie der Automobil- oder Fertigungsindustrie, wesentlich geringer (IFR; 2021b).

Um einen Beitrag zur Entwicklung und Forschung an einer mobilen Roboterplattform für Bauzwecke zu leisten, wurden in dieser Diplomarbeit zunächst die erforderlichen Grundlagen für einen derartigen Einsatz benannt und erläutert. Dazu zählt beispielsweise die Verfügbarkeit eines BIM-Modells oder die Befahrbarkeit des Untergrundes durch das Fahrwerk der Plattform. Daraufhin wurde ein Entwurf für die Gestaltung einer Prozessstruktur für einen Robotereinsatz mit insgesamt sechs Teilschritten erarbeitet. Ein zentraler Schritt ist dabei die vollständige oder unterstützende Herstellung von Bauleistungen durch den Roboter. Hierfür wurden jeweils zwei Gewerke aus dem Bereich des Innenausbaus sowie der Flachdachkonstruktion in Bezug auf ihr Automatisierungspotential untersucht. Die Prozesse wurden abstrahiert, beschrieben und anhand von Kriterien bewertet und abschließend miteinander verglichen. Unter anderem wirken sich die Anzahl der Arbeitsschritte oder die Einschränkungen des Arbeitsbereichs eines Arbeitsvorgangs auf dessen Automatisierungspotential aus. Dabei hat sich gezeigt, dass das Aufbringen der Haftbrücke für den Abdichtungsanstrich einer Flachdachkonstruktion das größte der untersuchten Automatisierungspotentiale besitzt. Zusätzlich wurden die unterschiedlichen Werkzeuge für typische Gewerke der beiden Arbeitsbereiche ausführlich untersucht. Ziel war es Überschneidungsbereiche der Werkzeugtypen zu identifizieren, dafür wurde eine Übersicht geschaffen, für wie viele Gewerke der jeweilige Werkzeugtyp eingesetzt wird. Da die Roboterplattform modular aufgebaut werden soll, empfiehlt es sich Werkzeuge zu automatisieren, die für mehrere Gewerke und Arbeiten eingesetzt werden können. Im Konkreten wurde die Verwendung von Vakuumflächensaugern für das Anheben von EPS-Dämmplatten sowie Wand- und Bodenfliesen untersucht. Ebenso wurde der Einsatz von Airless-Spritzgeräten für das Aufbringen von Deckfarben erläutert. Des Weiteren wurden Vorschläge für die Nutzung von Dosieranlagen und automatisierten Schaumpistolen für den Auftrag von WDVS-Klebeschäum bei der Flachdachkonstruktion gemacht.

Im weiteren Verlauf der Diplomarbeit wurde der Einsatz eines Werkzeugs durch einen Roboter zunächst simuliert. Hierfür wurde mit dem Programm „Autodesk Fusion 360“ ein Schleifgerät sowie eine Trockenbauplatte modelliert und zwei Schleifvorgänge simuliert. Zum einen wurde eine Simulation zum Schleifen der gesamten Plattenfläche als auch zum Schleifen von Quer- und Längsfugen durchgeführt. Diese Simulationen wurden anschließend für den Test mit einem echten Roboter exportiert. Hierfür wurde die Programmiersprache G-Code verwendet, um NC-Dateien mit dem Werkzeugpfad zu erzeugen.

Anschließend wurden zwei Tests mit einem Universal Robot 5e sowie einem Schleifgerät von Robotiq in der Handwerkskammer Dresden durchgeführt. Als Vorbereitung wurden Werkzeuge und Arbeitsebenen in dem Roboter konfiguriert sowie die Trockenbauplatten auf der Arbeitsfläche eingespannt. Da durch die NC-Datei ein fester Werkzeugpfad vorgegeben ist, mussten die Arbeitshöhen des Werkzeugs mehrfach korrigiert werden. Bei einem zu tiefen Auffahren des Schleifgeräts wurden außerdem die Trockenbauplatten stellenweise beschädigt. Dadurch hat sich gezeigt, dass eine Schnittstelle zur Kraft- und Qualitätskontrolle eingeplant werden. Ein weiterer Nachteil bei der Verwendung von G-Code ist, dass durch das angeschlossene Teach Pendant des Roboters keine Veränderungen an dem Werkzeugpfad vorgenommen werden können. Der große Vorteil der Programmiersprache G-Code ist jedoch seine Allgemeingültigkeit für Industrieroboter. Wird durch einen Generalunternehmer G-Code für die Planung und den Austausch der Roboterarbeiten verwendet, ist das Unternehmen an keinen Roboterhersteller gebunden. Außerdem werden die Kompetenzen zur Planung und Gestaltung des Arbeitsvorgangs im Unternehmen gehalten und es werden lediglich die maschinennahen Quellcodes mit den Vertragspartnern ausgetauscht. Wird im Gegensatz zum allgemeingültigen Quellcode ein bestimmter Robotertyp für die Simulation fest vorgegeben, schränkt dies die Flexibilität bei der Wahl der Vertragspartner ein. Wenn die Simulation beispielweise mit einem UR Roboter durchgeführt wurde, ist zwingendermaßen ein Zulieferer mit diesem Produkt zu wählen. Alternativ kann die gesamte Prozesskette inklusive der Planung und Simulation des Vorgangs an einen Nachunternehmer abgegeben werden. Hierbei empfiehlt es sich jedoch eine eigene Instanz für die Qualitätskontrolle der vom Roboter durchgeführten Arbeiten vertraglich festzuhalten.

Für weitere Forschung und Untersuchungen zu dem Einsatz einer modularen Roboterplattform „Bau“ gibt es diverse interessante Aspekte. Eine theoretisch orientierte Arbeit könnte beispielsweise den Gesamtprozess für einen Robotereinsatz weiter untergliedern und die Einzelschritte noch genauer ausführen. Insbesondere die exakte Darstellung und Planung von Schnittstellen und den Übergängen zwischen den Teilschritten kann wertvolle Erkenntnisse für die Applikation in einem Bauvorhaben liefern. Ausgehend von den Erkenntnissen dieser Diplomarbeit können die Möglichkeiten zur Verwendung von G-Code auf andere Gewerke ausgeweitet werden. Hierfür sind entsprechende Modellierungen und Simulationen durchzuführen. Dabei bietet es sich zusätzlich an, neben dem in dieser Diplomarbeit verwendeten Programm „Autodesk Fusion 360“ Alternativen wie beispielsweise „RoboDK“ oder „Rhino3D“ mit einzubeziehen. Dadurch werden neben G-Code auch andere Methoden untersucht, um Roboter und Werkzeuge zu simulieren, Programme zu schreiben und Simulationsdaten zu exportieren. Diese Methoden könnten außerdem um praktische Komponenten erweitert werden, indem die Simulationsdaten an echten Robotern, Werkzeugen und Werkstücken getestet werden. Auch die konkrete Planung und die praktische Umsetzung einer modularen Roboterplattform ist eine Möglichkeit für ein größeres Forschungsprojekt. Hierfür können die Erkenntnisse und

Erfahrungen aus abgeschlossenen und laufenden Projekten genutzt werden. Da für viele der Komponenten der Roboterplattform keine direkt verfügbaren Systeme erhältlich sind, ist das Fachwissen aus verschiedenen Ingenieurbereichen und handwerklichen Berufen notwendig. Für die Vielzahl der notwendigen Teilsysteme und Komponenten, muss die jeweilige Fachkompetenz in ihrem Tätigkeitsbereich recherchieren und Anforderungen konkretisieren.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Digitalisierung und die Automatisierung der modernen Welt auch nicht vor der Bauindustrie halt machen werden. Diese Entwicklung wird zum einen durch externe Faktoren wie die verfügbare Technologie oder den Fachkräftemangel getrieben. Zum anderen kommt es zu einem Umdenken in der Industrie und an den Universitäten, sodass Initiativen entstehen, um moderne Verfahrensweisen zu implementieren oder zukunftsorientierte Forschung zu betreiben.

VII LITERATURVERZEICHNIS

BASF (2017): „Flachdachdämmung Umkehrdach“, Styrodur-Broschüre

Baunetz-Wissen (2021a): „Expandiertes Polystyrol (EPS)“, <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/expandiertes-polystyrol-eps-152198>, (abgerufen am: 03.10.2021).

Baunetz-Wissen (2021b): „Extrudiertes Polystyrol (XPS)“, <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/extrudiertes-polystyrol-xps-152204>, (abgerufen am: 03.10.2021).

Baunetz-Wissen (2021c): „Flachdächer nach Gebäudeenergiegesetz (GEG)“, <https://www.baunetzwissen.de/flachdach/fachwissen/richtlinien-verordnungen/flach-daecher-nach-gebaeudeenergiegesetz-geg-845544>, (abgerufen am: 03.10.2021)

Baunetz-Wissen (2021d): „Polyurethan-Hartschaum (PUR)“, <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/polyurethan-hartschaum-pur-152202>, (abgerufen am: 03.10.2021).

Baunetz-Wissen (2021e): „Steinwolle“, <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/steinwolle-5326856>, (abgerufen am: 03.10.2021).

Bock T. und T. Linner (2015): Robot oriented design, Cambridge university press, New York.

Bock, T. und T. Linner (2016): Construction Robots: Elementary Technologies and Single-task Construction Robots, Vol. (3), Cambridge University Press, New York.

Borgmeier A. und H. Braunreiter (2009): *Bautechnik für Fliesen-, Platten-und Mosaikleger*, Vieweg+ Teubner, Wiesbaden.

Bostik GmbH (2021): „Montage Pro Flachdach B1 P965KLEBESCHAUM FLACHDACH 1K“, Technisches Merkblatt.

DIHK | Deutscher Industrie- und Handelskammertag e.V. (2021): „Der lange Weg aus der Krise, DIHK-Konjunkturumfrage Jahresbeginn 2021“.

Dudek, G. und M. Jenkin (2008): Inertial Sensors, GPS, and Odometry, in: Siciliano B. und O. Khatib (Hrsg.) *Springer Handbook of robotics*, Springer, Berlin, S. 477 – 490.

EU-Baustoffhandel (2021): <https://www.eu-baustoffhandel.de/vollwaermeschutz-daemmplatten/daemmplatten-fassadendaemmung/eps-daemmplatten-wlg-032>, (abgerufen am: 12.10.2021).

Eurobitume (2021): „Die Bitumenindustrie in Europa“, <https://www.eurobitume.eu/de/bitumen/industrie/>, (abgerufen am: 04.10.2021).

Fuchs L. (2020): *Modulare Roboterplattformen im Bauwesen: Potentiale und Einsatzmöglichkeiten*, Projektarbeit, Technische Universität Dresden Institut für Bauinformatik, Dresden.

Hesse S., V. Malisa (2016): *Taschenbuch Robotik - Montage – Handhabung*, Auflage: 2., neu bearbeitete Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München.

International Federation of Robotics (2021 a): “IFR presents World Robotics Report 2020”, <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe>, (abgerufen am: 17.10.2021).

International Federation of Robotics (2021b): "Executive Summary World Robotics 2020 Industrial Robots", https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2020_Industrial_Robots_1.pdf, (abgerufen am: 17.10.2021).

J. Schmalz GmbH (2021): Theoretische Haltekraft eines Sauggreifers, <https://www.schmalz.com/de-de/vakuum-wissen/vakuumsystem-und-seine-bauteile/systemauslegung-berechnungsbeispiel/theoretische-haltekraft-eines-sauggreifers/>, (abgerufen am: 12.10.2021).

Jugard+Künstner GmbH (2019): „Fahrerloses Transportsystem“, MiR-Broschüre.

Jugard+Künstner GmbH (2021): Universal Robots UR5 & UR5e, <https://www.jugard-kunstner.de/universal-robots/cobots/ur5/>, (abgerufen am: 04.10.2021).

KUKA (2021): KUKA.Sim, https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/software/planung-projektierung-service-sicherheit/kuka_sim, (abgerufen am: 04.10.2021).

Litz L. (2013): *Grundlagen der Automatisierungstechnik: Regelungssysteme – Steuerungssysteme – Hybride Systeme*, 2.Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.

Noltemeier H. (2019): *Graphentheorie: Mit Algorithmen und Anwendungen*, De Gruyter, Berlin, Boston.

Pech, A., W. Hubner und F. Zach (2015): *Flachdach*, Bd.9, SpringerWienNewYork, Wien.

Pott A. und T. Dietz (2019): *Industrielle Robotersysteme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2019.

Robotiq (2019): „Schleifkit“, Datenblatt.

RWTH Aachen (2021): „Construction Robotics“, <https://cr.rwth-aachen.de>, (abgerufen am: 15.09.2021).

Saidi, S.K., J.B. O´Brien und A.M. Lytle (2008): Robotics in Construction, in: Siciliano B. und O. Khatib (Hrsg.) *Springer Handbook of robotics*, Springer, Berlin, S. 1079–1096.

Statistische Bundesamt (2021a): „Bruttoinlandsprodukt für Deutschland 2020“, Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 14. Januar 2021.

Statistische Bundesamt (2021b): „Destatis Erwerbstätige und Arbeitnehmer nach Wirtschaftsbereichen“, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/arbeitnehmer-wirtschaftsbereiche.html>, (abgerufen am: 18.10.2021).

Tichelmann, K. und J. Pfau (2012): *Trockenbau: Grundlagen, Materialien, Anwendungen*, DETAIL, München.

Universal Robots (2021): Offline Simulator - e-Series - UR Sim for non Linux 5.9.4, <https://www.universal-robots.com/download/software-e-series/simulator-non-linux/offline-simulator-e-series-ur-sim-for-non-linux-594/>, (abgerufen am: 12.10.2021).

ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH (2021): „Präzise Dosieren mit dem Endloskolben-Prinzip“, <https://www.viscotec.de/technologie/endloskolben-prinzip/>, (abgerufen am: 17.10.2021).

VIII ANLAGEN

ANLAGE 1 QUELLCODE NC-DATEI „LF_DIPLOM_FUGEN.NC“

1	N2 G21	15	(Rapid Move Starts)
2	(Spindle Speed = 1 RPM)	16	N8 G00 X151. Y351. Z5. F100
3	(Tool = 0)	17	N9 X301. Y351. Z5.
4	(Toolpath name = Projektion1_2)	18	N10 X301. Y351. Z4.
5	(Head angle = 30 deg)	19	(Lead In Move Starts)
6	N3 G00 X151. Y1. Z15. F100	20	N11 G01 X301. Y351. Z-1. F1
7	(First Toolpath Point)	21	(Cutting Move Starts)
8	N4 X151. Y1. Z4.	22	N12 X1. Y351. Z-1.
9	(Lead In Move Starts)	23	(Lead Out Move Starts)
10	N5 G01 X151. Y1. Z-1. F1	24	N13 X1. Y351. Z4.
11	(Cutting Move Starts)	25	(Rapid Move Starts)
12	N6 X151. Y351. Z-1.	26	N14 G00 X1. Y351. Z15. F100
13	(Lead Out Move Starts)	27	N15 M30
14	N7 X151. Y351. Z4.	28	%

ANLAGE 2 QUELLCODE NC-DATEI „LF_DIPLOM_GANZE- PLATTE.NC“

1	%	25	N10 X67.527 Y51.304 Z-1.
2	(G-code output for Universal Robots'	26	N11 X66.671 Y51.474 Z-1.
3	Remote TCP & Toolpath URCap)	27	N12 X65.824 Y51.681 Z-1.
4	(Generated by AUTODESK Fusion 360 CAM	28	N13 X64.986 Y51.926 Z-1.
5	2.0.10940)	29	N14 X64.16 Y52.206 Z-1.
6	(Post version: 43352)	30	N15 X63.346 Y52.522 Z-1.
7	(Creation date: Thursday, September	31	N16 X62.548 Y52.874 Z-1.
8	09, 2021 11:12:11)	32	N17 X61.765 Y53.26 Z-1.
9	N1 G90	33	N18 X61. Y53.68 Z-1.
10	N2 G21	34	N19 X60.254 Y54.132 Z-1.
11	(Spindle Speed = 1 RPM)	35	N20 X59.528 Y54.617 Z-1.
12	(Tool = 0)	36	N21 X58.825 Y55.133 Z-1.
13	(Toolpath name = Projektion1_2)	37	N22 X58.144 Y55.679 Z-1.
14	(Head angle = 30 deg)	38	N23 X57.488 Y56.255 Z-1.
15	N3 G00 X251. Y51. Z15. F100	39	N24 X56.858 Y56.858 Z-1.
16	(First Toolpath Point)	40	N25 X56.254 Y57.488 Z-1.
17	N4 X251. Y51. Z4.	41	N26 X55.679 Y58.144 Z-1.
18	(Lead In Move Starts)	42	N27 X55.133 Y58.825 Z-1.
19	N5 G01 X251. Y51. Z-1. F1	43	N28 X54.617 Y59.528 Z-1.
20	(Cutting Move Starts)	44	N29 X54.132 Y60.254 Z-1.
21	N6 X71. Y51. Z-1.	45	N30 X53.679 Y61. Z-1.
22	N7 X70.128 Y51.019 Z-1.		
23	N8 X69.257 Y51.076 Z-1.		
24	N9 X68.389 Y51.171 Z-1.		

46	N31 X53.26 Y61.765 Z-1.	75	N60 X56.254 Y144.512 Z-1.
47	N32 X52.874 Y62.548 Z-1.	76	N61 X56.858 Y145.142 Z-1.
48	N33 X52.522 Y63.346 Z-1.	77	N62 X57.488 Y145.746 Z-1.
49	N34 X52.206 Y64.16 Z-1.	78	N63 X58.144 Y146.321 Z-1.
50	N35 X51.926 Y64.986 Z-1.	79	N64 X58.825 Y146.867 Z-1.
51	N36 X51.681 Y65.824 Z-1.	80	N65 X59.528 Y147.383 Z-1.
52	N37 X51.474 Y66.671 Z-1.	81	N66 X60.254 Y147.868 Z-1.
53	N38 X51.304 Y67.527 Z-1.	82	N67 X61. Y148.321 Z-1.
54	N39 X51.171 Y68.39 Z-1.	83	N68 X61.765 Y148.74 Z-1.
55	N40 X51.076 Y69.257 Z-1.	84	N69 X62.548 Y149.126 Z-1.
56	N41 X51.019 Y70.128 Z-1.	85	N70 X63.346 Y149.478 Z-1.
57	N42 X51. Y71. Z-1.	86	N71 X64.16 Y149.794 Z-1.
58	N43 X51. Y131. Z-1.	87	N72 X64.986 Y150.074 Z-1.
59	N44 X51.019 Y131.872 Z-1.	88	N73 X65.824 Y150.319 Z-1.
60	N45 X51.076 Y132.743 Z-1.	89	N74 X66.671 Y150.526 Z-1.
61	N46 X51.171 Y133.611 Z-1.	90	N75 X67.527 Y150.696 Z-1.
62	N47 X51.304 Y134.473 Z-1.	91	N76 X68.389 Y150.829 Z-1.
63	N48 X51.474 Y135.329 Z-1.	92	N77 X69.257 Y150.924 Z-1.
64	N49 X51.681 Y136.176 Z-1.	93	N78 X70.128 Y150.981 Z-1.
65	N50 X51.926 Y137.014 Z-1.	94	N79 X71. Y151. Z-1.
66	N51 X52.206 Y137.84 Z-1.	95	N80 X226. Y151. Z-1.
67	N52 X52.522 Y138.654 Z-1.	96	N81 X226.981 Y151.019 Z-1.
68	N53 X52.874 Y139.452 Z-1.	97	N82 X227.961 Y151.077 Z-1.
69	N54 X53.26 Y140.235 Z-1.	98	N83 X228.938 Y151.173 Z-1.
70	N55 X53.679 Y141. Z-1.	99	N84 X229.911 Y151.308 Z-1.
71	N56 X54.132 Y141.746 Z-1.	100	N85 X230.877 Y151.48 Z-1.
72	N57 X54.617 Y142.472 Z-1.	101	N86 X231.836 Y151.691 Z-1.
73	N58 X55.133 Y143.175 Z-1.	102	N87 X232.786 Y151.939 Z-1.
74	N59 X55.679 Y143.856 Z-1.	103	N88 X233.725 Y152.224 Z-1.

104	N89 X234.653 Y152.545 Z-1.	133	N118 X250.923 Y174.039 Z-1.
105	N90 X235.567 Y152.903 Z-1.	134	N119 X250.981 Y175.019 Z-1.
106	N91 X236.466 Y153.296 Z-1.	135	N120 X251. Y176. Z-1.
107	N92 X237.35 Y153.725 Z-1.	136	N121 X251. Y226. Z-1.
108	N93 X238.215 Y154.188 Z-1.	137	N122 X250.981 Y226.981 Z-1.
109	N94 X239.062 Y154.684 Z-1.	138	N123 X250.923 Y227.961 Z-1.
110	N95 X239.889 Y155.213 Z-1.	139	N124 X250.827 Y228.938 Z-1.
111	N96 X240.695 Y155.775 Z-1.	140	N125 X250.692 Y229.911 Z-1.
112	N97 X241.477 Y156.367 Z-1.	141	N126 X250.52 Y230.877 Z-1.
113	N98 X242.236 Y156.99 Z-1.	142	N127 X250.309 Y231.836 Z-1.
114	N99 X242.97 Y157.642 Z-1.	143	N128 X250.061 Y232.786 Z-1.
115	N100 X243.678 Y158.322 Z-1.	144	N129 X249.776 Y233.725 Z-1.
116	N101 X244.358 Y159.03 Z-1.	145	N130 X249.455 Y234.653 Z-1.
117	N102 X245.01 Y159.764 Z-1.	146	N131 X249.097 Y235.567 Z-1.
118	N103 X245.633 Y160.523 Z-1.	147	N132 X248.704 Y236.466 Z-1.
119	N104 X246.225 Y161.305 Z-1.	148	N133 X248.275 Y237.35 Z-1.
120	N105 X246.787 Y162.111 Z-1.	149	N134 X247.812 Y238.216 Z-1.
121	N106 X247.316 Y162.938 Z-1.	150	N135 X247.316 Y239.062 Z-1.
122	N107 X247.812 Y163.784 Z-1.	151	N136 X246.787 Y239.889 Z-1.
123	N108 X248.275 Y164.65 Z-1.	152	N137 X246.225 Y240.695 Z-1.
124	N109 X248.704 Y165.534 Z-1.	153	N138 X245.633 Y241.477 Z-1.
125	N110 X249.097 Y166.433 Z-1.	154	N139 X245.01 Y242.236 Z-1.
126	N111 X249.455 Y167.347 Z-1.	155	N140 X244.358 Y242.97 Z-1.
127	N112 X249.776 Y168.275 Z-1.	156	N141 X243.678 Y243.678 Z-1.
128	N113 X250.061 Y169.214 Z-1.	157	N142 X242.97 Y244.358 Z-1.
129	N114 X250.309 Y170.164 Z-1.	158	N143 X242.236 Y245.01 Z-1.
130	N115 X250.52 Y171.123 Z-1.	159	N144 X241.477 Y245.633 Z-1.
131	N116 X250.692 Y172.089 Z-1.	160	N145 X240.695 Y246.225 Z-1.
132	N117 X250.827 Y173.062 Z-1.	161	N146 X239.889 Y246.787 Z-1.

162 N147 X239.062 Y247.316 Z-1.
163 N148 X238.215 Y247.812 Z-1.
164 N149 X237.35 Y248.275 Z-1.
165 N150 X236.466 Y248.704 Z-1.
166 N151 X235.567 Y249.097 Z-1.
167 N152 X234.653 Y249.455 Z-1.
168 N153 X233.725 Y249.776 Z-1.
169 N154 X232.786 Y250.061 Z-1.
170 N155 X231.836 Y250.309 Z-1.
171 N156 X230.877 Y250.52 Z-1.
172 N157 X229.911 Y250.692 Z-1.
173 N158 X228.938 Y250.827 Z-1.
174 N159 X227.961 Y250.923 Z-1.
175 N160 X226.981 Y250.981 Z-1.
176 N161 X226. Y251. Z-1.
177 N162 X76. Y251. Z-1.
178 N163 X75.019 Y251.019 Z-1.
179 N164 X74.039 Y251.077 Z-1.
180 N165 X73.062 Y251.173 Z-1.
181 N166 X72.089 Y251.308 Z-1.
182 N167 X71.123 Y251.48 Z-1.
183 N168 X70.164 Y251.691 Z-1.
184 N169 X69.214 Y251.939 Z-1.
185 N170 X68.275 Y252.224 Z-1.
186 N171 X67.347 Y252.545 Z-1.
187 N172 X66.433 Y252.903 Z-1.
188 N173 X65.534 Y253.296 Z-1.
189 N174 X64.65 Y253.725 Z-1.
190 N175 X63.784 Y254.188 Z-1.

191 N176 X62.938 Y254.684 Z-1.
192 N177 X62.111 Y255.213 Z-1.
193 N178 X61.305 Y255.775 Z-1.
194 N179 X60.523 Y256.367 Z-1.
195 N180 X59.764 Y256.99 Z-1.
196 N181 X59.03 Y257.642 Z-1.
197 N182 X58.322 Y258.322 Z-1.
198 N183 X57.642 Y259.03 Z-1.
199 N184 X56.99 Y259.764 Z-1.
200 N185 X56.367 Y260.523 Z-1.
201 N186 X55.775 Y261.305 Z-1.
202 N187 X55.213 Y262.111 Z-1.
203 N188 X54.684 Y262.938 Z-1.
204 N189 X54.188 Y263.784 Z-1.
205 N190 X53.725 Y264.65 Z-1.
206 N191 X53.296 Y265.534 Z-1.
207 N192 X52.903 Y266.433 Z-1.
208 N193 X52.545 Y267.347 Z-1.
209 N194 X52.224 Y268.275 Z-1.
210 N195 X51.939 Y269.214 Z-1.
211 N196 X51.691 Y270.164 Z-1.
212 N197 X51.48 Y271.123 Z-1.
213 N198 X51.308 Y272.089 Z-1.
214 N199 X51.173 Y273.062 Z-1.
215 N200 X51.077 Y274.039 Z-1.
216 N201 X51.019 Y275.019 Z-1.
217 N202 X51. Y276. Z-1.
218 N203 X51. Y326. Z-1.
219 N204 X51.019 Y326.981 Z-1.

220	N205 X51.077 Y327.961 Z-1.	249	N234 X67.347 Y349.455 Z-1.
221	N206 X51.173 Y328.938 Z-1.	250	N235 X68.275 Y349.776 Z-1.
222	N207 X51.308 Y329.911 Z-1.	251	N236 X69.214 Y350.061 Z-1.
223	N208 X51.48 Y330.877 Z-1.	252	N237 X70.164 Y350.309 Z-1.
224	N209 X51.691 Y331.836 Z-1.	253	N238 X71.123 Y350.52 Z-1.
225	N210 X51.939 Y332.786 Z-1.	254	N239 X72.089 Y350.692 Z-1.
226	N211 X52.224 Y333.725 Z-1.	255	N240 X73.062 Y350.827 Z-1.
227	N212 X52.545 Y334.653 Z-1.	256	N241 X74.039 Y350.923 Z-1.
228	N213 X52.903 Y335.567 Z-1.	257	N242 X75.019 Y350.981 Z-1.
229	N214 X53.296 Y336.466 Z-1.	258	N243 X76. Y351. Z-1.
230	N215 X53.725 Y337.35 Z-1.	259	N244 X231. Y351. Z-1.
231	N216 X54.188 Y338.216 Z-1.	260	N245 X231.872 Y351.019 Z-1.
232	N217 X54.684 Y339.062 Z-1.	261	N246 X232.743 Y351.076 Z-1.
233	N218 X55.213 Y339.889 Z-1.	262	N247 X233.61 Y351.171 Z-1.
234	N219 X55.775 Y340.695 Z-1.	263	N248 X234.473 Y351.304 Z-1.
235	N220 X56.367 Y341.477 Z-1.	264	N249 X235.329 Y351.474 Z-1.
236	N221 X56.99 Y342.236 Z-1.	265	N250 X236.176 Y351.681 Z-1.
237	N222 X57.642 Y342.97 Z-1.	266	N251 X237.014 Y351.926 Z-1.
238	N223 X58.322 Y343.678 Z-1.	267	N252 X237.84 Y352.206 Z-1.
239	N224 X59.03 Y344.358 Z-1.	268	N253 X238.654 Y352.522 Z-1.
240	N225 X59.764 Y345.01 Z-1.	269	N254 X239.452 Y352.874 Z-1.
241	N226 X60.523 Y345.633 Z-1.	270	N255 X240.235 Y353.26 Z-1.
242	N227 X61.305 Y346.225 Z-1.	271	N256 X241. Y353.679 Z-1.
243	N228 X62.111 Y346.787 Z-1.	272	N257 X241.746 Y354.132 Z-1.
244	N229 X62.938 Y347.316 Z-1.	273	N258 X242.471 Y354.617 Z-1.
245	N230 X63.784 Y347.812 Z-1.	274	N259 X243.175 Y355.133 Z-1.
246	N231 X64.65 Y348.275 Z-1.	275	N260 X243.856 Y355.679 Z-1.
247	N232 X65.534 Y348.704 Z-1.	276	N261 X244.512 Y356.254 Z-1.
248	N233 X66.433 Y349.097 Z-1.	277	N262 X245.142 Y356.858 Z-1.

278	N263 X245.745 Y357.488 Z-1.	307	N292 X248.74 Y440.235 Z-1.
279	N264 X246.321 Y358.144 Z-1.	308	N293 X248.32 Y441. Z-1.
280	N265 X246.867 Y358.825 Z-1.	309	N294 X247.868 Y441.746 Z-1.
281	N266 X247.383 Y359.528 Z-1.	310	N295 X247.383 Y442.472 Z-1.
282	N267 X247.868 Y360.254 Z-1.	311	N296 X246.867 Y443.175 Z-1.
283	N268 X248.32 Y361. Z-1.	312	N297 X246.321 Y443.856 Z-1.
284	N269 X248.74 Y361.765 Z-1.	313	N298 X245.745 Y444.512 Z-1.
285	N270 X249.126 Y362.548 Z-1.	314	N299 X245.142 Y445.142 Z-1.
286	N271 X249.478 Y363.346 Z-1.	315	N300 X244.512 Y445.746 Z-1.
287	N272 X249.794 Y364.16 Z-1.	316	N301 X243.856 Y446.321 Z-1.
288	N273 X250.074 Y364.986 Z-1.	317	N302 X243.175 Y446.867 Z-1.
289	N274 X250.318 Y365.824 Z-1.	318	N303 X242.471 Y447.383 Z-1.
290	N275 X250.526 Y366.671 Z-1.	319	N304 X241.746 Y447.868 Z-1.
291	N276 X250.696 Y367.527 Z-1.	320	N305 X241. Y448.321 Z-1.
292	N277 X250.829 Y368.389 Z-1.	321	N306 X240.235 Y448.74 Z-1.
293	N278 X250.924 Y369.257 Z-1.	322	N307 X239.452 Y449.126 Z-1.
294	N279 X250.981 Y370.128 Z-1.	323	N308 X238.654 Y449.478 Z-1.
295	N280 X251. Y371. Z-1.	324	N309 X237.84 Y449.794 Z-1.
296	N281 X251. Y431. Z-1.	325	N310 X237.014 Y450.074 Z-1.
297	N282 X250.981 Y431.872 Z-1.	326	N311 X236.176 Y450.319 Z-1.
298	N283 X250.924 Y432.743 Z-1.	327	N312 X235.329 Y450.526 Z-1.
299	N284 X250.829 Y433.611 Z-1.	328	N313 X234.473 Y450.696 Z-1.
300	N285 X250.696 Y434.473 Z-1.	329	N314 X233.61 Y450.829 Z-1.
301	N286 X250.526 Y435.329 Z-1.	330	N315 X232.743 Y450.924 Z-1.
302	N287 X250.318 Y436.176 Z-1.	331	N316 X231.872 Y450.981 Z-1.
303	N288 X250.074 Y437.014 Z-1.	332	N317 X231. Y451. Z-1.
304	N289 X249.794 Y437.84 Z-1.	333	N318 X51. Y451. Z-1.
305	N290 X249.478 Y438.654 Z-1.	334	(Lead Out Move Starts)
306	N291 X249.126 Y439.452 Z-1.	335	N319 X51. Y451. Z4.

336 || (Rapid Move Starts)
337 || N320 G00 X51. Y451. Z15. F100
1 ||

338 || N321 M30
339 || %