FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 3200

Frederik Ecke, Helmut Fligge
Jan Juraschek, Heike Klussmann

Plotbot/Crawler – Entwicklung eines neuartigen webbasierten und sensorgeführten Bewegungsautomaten für den Auftrag komplexer Schichtsysteme zur Funktionalisierung von Gebäudeoberflächen

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 3200

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0464-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

FÖRDERHINWEIS

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt und Raumforschung unter dem Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-16.27 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Abschlussbericht 31.12.2019

Plotbot/Crawler – Entwicklung eines neuartigen webbasierten und sensorgeführten Bewegungsautomaten für den Auftrag komplexer Schichtsysteme zur Funktionalisierung von Gebäudeoberflächen

Forschungsprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau
Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
Abschlussbericht Projektzeitraum September 2016 – Dezember 2019
Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.27

Prof. Heike Klussmann
Universität Kassel
Forschungsplattform BAU KUNST ERFINDEN
FB 06 - Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung
Henschelstr. 2
D-34127 Kassel
t +49 561 804 3632
m +49 163 5587626
klussmann@asl.uni-kassel.de
www.baukunsterfinden.org

Autoren:
Frederik Ecke, Helmut Fligge, Jan Juraschek und Heike Klussmann

Kassel, 31.12.2019

UNIVERSITÄT KASSEL
FB 06 Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung
FG Bildende Kunst
Forschungsplattform BAU KUNST ERFINDEN
Univ.-Prof. Heike Klussmann
Gottschalkstraße 24, 34127 Kassel
Tel. 0561 804 3632

Ort, Datum, Unterschrift

1 Zusammenfassung

1.1 Kurzzusammenfassung

Im Projekt PLOTBOT/CRAWLER der Forschungsplattform BAU KUNST ERFINDEN an der Universität Kassel wurde eine neuartiger, webbasierter und sensorgeführter Bewegungsautomat für den Auftrag und die Erneuerung komplexer Schichtsysteme zur Funktionalisierung von Gebäudeoberflächen entwickelt. Mittels einer konsistent verzahnten Werkzeug-Software-Logik werden Oberflächen von Bauelementen beliebiger Geometrie instantan angesteuert oder nach einer zuvor digital erstellten Bearbeitungssystematik beschichtet. Die Entwicklung des Plotbot/ Crawler beinhaltet vier sich bedingende Teilbereiche. Eine Maschinen-Komponente „All-In-One“ mit Effektoren, Sensoren und mobiler Basis, eine Software-Komponente mit systematisierter und flexible Steuerung, ein Hardware-Software-Interface für Hardware bezogene Informationseingabe und Verarbeitung, sowie ein Webinterface für den technischen Support und zur Unterstützung des Anwender-Dialogs. Mit dem Aufbringen und der Erneuerung des organischen Photovoltaik-Systems DysCrete hat das Forschungsprojekt eine konkrete Anwendung als Aufgabenstellung. Bei DysCrete handelt es sich um einen farbstoffsensitivierten energieerzeugenden Beton, bei dem die stromproduzierende Beschichtung in regelmäßigen zeitlichen Abständen erneuert wird. Schwerpunkte der Entwicklung waren die Zusammenführung von Verfahren des automatisierten Schichtauftrags und der Schichterneuerung in einer Maschine, sowie die Automatisierung des Entwurf-Leseverfahrens. Das System erfüllt die Anforderung, die sich aus der Analyse der Strategie Industrie 4.0 an Robotiksysteme ergeben. Das projektierte System ist vergleichsweise kompakt und mobil. Es nutzt in neuartiger Weise Sprüh- und Drucktechniken, denen aufgrund ihrer Effizienz und vielfältigen Anwendungspotentiale eine wachsende Bedeutung für die Materialforschung und das Bauwesen zukommt. So kann eine Modifikation des Plotbot/Crawler die Integration weiterer spezifischer Funktionssysteme für die In-Situ-Nutzung ermöglichen, wie z.B. das Detektieren und Versiegeln von Rissen oder Fehlstellen, die Wartung und Reinigung von Fassaden, die Wartung und Pflege von vertikaler Fassadenbegrünung. Gesucht wurden Lösungen, die einerseits diese Potentiale ausschöpfen und gleichzeitig die besonderen Erfordernisse des Bauwesens berücksichtigen. Das Forschungsvorhaben bietet in dieser Hinsicht einen eigenständigen und zugleich exemplarischen Ansatz. Neuartig und von Vorteil ist die Zusammenführung und die eindeutige Schnittstellendefinition des Verbunds von „Hightech“ (Plotbot/ Crawler) und „Lowtech“ (Fassadenelement). Die Entwicklung derartiger Systeme für das Bauwesen ist bislang wenig fortgeschritten. Sie ist aber von Interesse, weil sie z.B. im Hinblick auf die Erfordernisse einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Umstrukturierung der Gebäudesubstanz einen gleichermaßen konzeptuellen wie handlungsorientierten Ansatz bietet, für diesen Sektor die Potentiale einer technologieorientierten sowie flexiblen Produktion zu erschließen.

1.2 Abstract

With the project PLOTBOT/CRAWLER of the research platform BAU KUNST ERFINDEN at the University of Kassel, an innovative, web-based and sensor-guided motion machine was developed for the application and renewal of complex layer systems for the functionalisation of building surfaces. By means of a consistently interlocked tool-software logic, surfaces of components of any geometry are controlled instantaneously or coated according to a previously digitally created processing system. The development of the plotbot/crawler contains four interdependent parts. A machine component "All-In-One" with effectors, sensors and mobile base, a software component with systematized and flexible control, a hardware-software interface for hardware related information input and processing, as well as a web interface for technical support and user dialogue. With the application and renewal of the organic photovoltaic system DysCrete, the research project has a concrete application as its task. DysCrete is a dye-sensitized energy-producing concrete in which the power-producing coating is renewed at regular intervals. The focus of the development was the combination of processes of automated coating application and coating renewal in one machine, as well as the automation of the design reading process. The system meets the requirements for robotic systems resulting from the analysis of the Industry 4.0 strategy. The projected system is comparatively compact and mobile. It uses spraying and printing techniques in a new way, which are of growing importance for materials research and the building industry due to their efficiency and diverse application potentials. Thus, a modification of the plotbot/crawler can enable the integration of further specific functional systems for in-situ use, such as the detection and sealing of cracks or defects, maintenance and cleaning of facades, maintenance and care of vertical facade greening. Solutions were sought which on the one hand exploit these potentials and at the same time consider the special requirements of the building industry. The research project offers an independent and at the same time exemplary approach in this respect. The combination and clear interface definition of the combination of "high-tech" (plotbot/crawler) and "low-tech" (facade element) is new and advantageous. Up until now, the development of such systems for the construction industry has not progressed very far. However, it is of interest because, for example, regarding the requirements of a sustainable and economic restructuring of the building fabric, it offers a conceptual as well as action-oriented approach to develop the potential of technology-oriented and flexible production for this sector.

Inhaltsverzeichnis

1 ZUSAMMENFASSUNG 1

1.1 Kurzzusammenfassung 1

1.2 Abstract 2

2 AUSGANGSLAGE 8

3 PROJEKTAUFBAU 9

3.1 Team 9

3.2 Methodologie 10

4 PROJEKTDURCHFÜHRUNG 11

4.1 Recherche und Untersuchungen zu Hardware Sensor-Aktor Maschinenkomponenten 11

4.1.1 Fassadenklimmer 11

4.1.2 Drohnen/Multikopter 11

4.1.3 Seil-/Parallelroboter 11

4.2 Entwurf und funktionelle Entwicklung der Verfahrensschritte und Systemkomponenten 12

4.3 Plotbot/Crawler Prototyp P1 12

4.3.1 Erstellen eines allgemeinen Anforderungsprofils / Prototyp P1 12

4.3.2 Prototypenentwicklung Hardwarekomponente mobile Basis / Prototyp P1 12

4.3.3 Entwicklung Verfahren und Prototypenentwicklung Sensortechnik und Steuerung (Positionierung) der Komponente mobile Basis 14

4.3.3.1 Programmierung 14

4.3.4 Durchführung von Versuchsreihen Prototyp Hardwarekomponente mobile Basis / Sensorik und Steuerung (Positionierung) der Komponente mobile Basis / Prototyp P1 17

4.3.5 Analyse und Auswertung Prototyp Hardwarekomponente mobile Basis / Sensorik und Steuerung (Positionierung) der Komponente mobile Basis / Prototyp P1 17

4.4 Plotbot/Crawler Prototyp P2 18

4.4.1 Erstellen eines allgemeinen Anforderungsprofils / Prototyp P2 18

Wesentliche Punkte des Anforderungsprofils für den Prototyp: 18

4.4.2 Systematisierung der Maschinenkomponenten und Verfahren im Hinblick auf Verfahrensentwicklung flexibel einstellbaren Diagnose/Funktions-Werkzeug Plotbot/Crawler 18

4.4.3 Bauliche Entwicklung (Komponentenoptimierung) und Entwicklung der Sensortechnik und Fertigstellung Prototyp Diagnose/Funktions-Werkzeug Plotbot/Crawler 19
4.4.4 Erste Konstruktion einzelner Bauteile (Sprüh-Druckkomponente, Bürstensystem, Minikamera) und konzeptionelle Kombination zu Baugruppe Diagnose/Funktions-Werkzeug Plotbot/Crawler und durchführen erster Versuchsreihen Sprüh-Druckkomponente 22
4.4.5 Erste Versuchsreihen und Analyse des Plotbot/Crawler Prototyp P2 23
4.4.6 Konzeption und Fertigstellung Potbot/Crawler P2 - Tool für verfahrenstechnische Maschinenentwicklung 24
4.4.7 Prototypenentwicklung Hardwarekomponente und Durchführung von Versuchsreihen mit der mobilen Basis / Prototyp P2 24

4.5 Zwischenfazit 27

4.6 Plotbot/Crawler Prototyp P3 30
4.6.1 Adaptive Zusammenführung der Hardwarekomponenten Pick and Place-Einheit mit Vakuumgreifer zur Zellenpositionierung, Werkzeug Plotbot/Crawler und mobile Basis zu prototypischer Maschine P3 30
4.6.2 Finalisierung systematisiert-flexible Steuerung der Pick and Place Einheit (Tool 2) 33
4.6.3 Entwicklung Speicherprogrammierbare Steuerung und adaptive Kombination der Sensorik und Steuerungskomponenten mit den Hardwarekomponenten prototypische Maschine Plotbot/Crawler Prototyp P3 36
4.6.4 Konzeption/Entwicklung der parametrischen NC-Systematik der Verfahrwege für prototypische Maschine Plotbot/Crawler Prototyp P3 36
4.6.5 Layouterstellung und Entwicklung der Bedienstelle (Hardware-Software-Interface) Plotbot/Crawler Prototyp P3 37
4.6.6 Ausarbeitung und Entwicklung finales Maschinenlayout Plotbot/Crawler Prototyp P3 37
4.6.7 Beginn der Bauphase der finalen Version Plotbot/Crawler Prototyp P3 40
4.6.8 Fertigstellung der parametrischen NC-Systematik der Verfahrwege für die finale Maschine Plotbot/Crawler Prototyp P3 44
4.6.9 Bau und Fertigstellung verfahrenstechnische Maschinenentwicklung Plotbot/Crawler Prototyp P3 45
4.6.10 Entwicklung Interfacestruktur und Bedienstelle (Hardware-Software-Interface) Plotbot/Crawler Prototyp P3 50
4.6.11 Definition zweier Ansteuerungsverfahren, Matrixerstellung: 50
4.6.11.1 Manuelle Steuerung Plotbot/Crawler Prototyp P3 50
4.6.11.2 Digitale Steuerung der Plotbot/Crawler Prototyp P3 51
4.6.12 Fehlerfreie Schnittstellenkommunikation Plotbot/Crawler Prototyp P3 <> Rechner, Tablet-PC 52
4.6.13 Test Serienreife Maschinenentwicklung Plotbot/Crawler Prototyp P3 52
4.6.14 Langzeiterprobung der Funktionsweise Plotbot/Crawler Prototyp P3 unter Realbedingungen und Auswertung der Testergebnisse 52
4.6.15 Fertigstellung Interface-Steuerung Plotbot/Crawler Prototyp P3 52

4.7 Plotbot/Crawler Prototyp P4 54
4.7.1 Recherche zu Anforderungen hinsichtlich Präzision und Positioniergenauigkeit 54
4.7.2 Planung und Durchführung Versuchsreihe zur Positioniergenauigkeit Antriebssystem (Parallelseilroboter, Core XY) und mobile Basis 54
4.7.3 Auswertung und Analyse Versuchsreihen zur Positioniergenauigkeit von Antriebssystem und mobiler Basis 55
4.7.4 Planung und Durchführung Versuchsreihe zur Positioniergenauigkeit der Positionierungssysteme Deltabot, H-Bot und Knickarmroboter 55
4.7.5 Auswertung und Analyse Versuchsreihen zur Positioniergenauigkeit der Positionierungssysteme Deltabot, H-Bot und Knickarmroboter sowie technische Dokumentation 55
4.7.6 Planung und Erstellung des Anforderungsprofils/Zielkatalogs Plotbot/Crawler Prototyp P4 56
4.7.6.1 Anforderungsprofil im Hinblick auf Positioniergenauigkeit und Mobilität an der Fassade in der X, Y, Z-Achse (Versprünge, Oberflächenbeschaffenheit, Umwelteinflüsse) 56
4.7.6.2 Anforderungsprofil im Hinblick auf den Einsatzbereich Detektion und Wartung 56
4.7.7 Recherche zu Anforderungen hinsichtlich der Optimierung der Größe des Arbeitsbereichs 56
4.7.8 Recherche zu Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Handhabung 56
4.7.8.1 Elektrische Gefährdung 57
4.7.8.2 Chemische Gefährdung 58
4.7.8.3 Mechanische Gefährdung 58
4.7.8.4 Handhabung 59
4.7.9 Planung und Durchführung sowie Auswertung und Analyse Versuchsreihe zu Sicherheit und Handhabung Antriebssystem, Mobile Basis, Positionierungssystem 60
4.7.10 Recherche zu Anforderungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und Witterungseinflüsse 60
4.7.10.1 Witterungseinflüsse 60
4.7.10.2 Dauerhaftigkeit 60
4.7.11 Planung und Durchführung sowie Auswertung und Analyse Versuchsreihe zu Dauerhaftigkeit und Witterungseinflüssen 61
4.7.12 Erstellung Lastenheftes auf Basis der Auswertung der Versuchsreihen und des Anforderungsprofils 61
4.7.13 Auswahl des Antriebssystems, das am besten geeignet ist, das Lastenheft zu erfüllen 62
4.7.14 Planung und Entwicklung des Befestigungs- und Antriebssystems sowie Optimierung und Konstruktion der baulichen Einzelkomponenten Antriebssystem Plotbot/Crawler Prototyp P4 63
4.7.14.1 Planung, Entwicklung und Optimierung sowie Konstruktion der Montagevorrichtung Gebäudehülle 63
4.7.14.2 Planung, Entwicklung und Optimierung und Konstruktion der mechanischen sowie elektronischen Komponenten des Antriebssystems 64
4.7.14.2.1 Bedämpfung über elektrischen Antrieb mit PID Regler 67
4.7.14.2.2 Modellbasierte Regelung 67
4.7.15 Planung und Entwicklung der Schnittstelle Positioniersystem zu mobiler Basis 68

4.7.16 Vernetzung der einzelnen Komponenten des Antriebssystems und Inbetriebnahme 70

5 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE 72

5.1 Positioniergenauigkeit 72

5.2 Größe des Arbeitsbereichs 72

5.3 Sicherheit und Handhabung 72

5.4 Dauerhaftigkeit und Witterungseinflüsse 72

5.5 Auswahl des Antriebssystems 73

5.6 Montagevorrichtung an der Gebäudehülle 73

5.7 Mechanische und elektronische Komponenten des Antriebssystems 75

5.8 Schnittstelle Positioniersystem zu mobiler Basis 75

5.9 Vernetzung der einzelnen Komponenten des Antriebssystems 75

6 ARBEITSPAKETE AUS DEM PROJEKTQUARTAL 4 ZUWENDUNGSBESCHEID (AUFSTOCKUNG) 12.02.2019 76

7 FAZIT 76

8 EMPFEHLUNGEN AN DIE BEREICHE POLITIK, WISSENSCHAFT, WIRTSCHAFT, GESELLSCHAFT 76

8.1 Politik 76

8.2 Wissenschaft 76

8.3 Wirtschaft 76

8.4 Gesellschaft 77

9 ERGEBNISTRANSFER 77

9.1 Messen 77

9.1.1 BAU 2017 - Weltleitmesse für Architektur, Material und Systeme in München am Stand von ZukunftBau 77
9.1.2 BauTec 2018 - Internationale Fachmesse für Bauen und Gebäudetechnik in Berlin 78
9.1.3 In-terz-um Köln 2019 - "Dis-rup-ti-ve Ma-te-rials – Chan-ging the Fu-tu-re" 80
9.1.4 Expo 2020 Dubai (in Arbeit) 81

9.2 Publikationen 82

10 ZUSAMMENFASSUNG 83

10.1 Generation der Prototypen 83
10.1.1 Plotbot/Crawler Prototyp P1 83
10.1.2 Plotbot/Crawler Prototyp P2 84
10.1.3 Plotbot/Crawler Prototyp P3 85
10.1.4 Plotbot/Crawler Prototyp P4 86

11 AUSBLICK 86

2 Ausgangslage

Das Forschungsvorhaben Plotbot/Crawler baut auf dem ebenfalls von der Forschungsplattform Bau Kunst Erfinden an der Universität Kassel durchgeführten Forschungsvorhaben DysCrete (Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-13.29) auf.

Bei DysCrete handelt es sich um einen farbstoffsensitivierten energieerzeugenden Beton, bei dem die stromproduzierende Beschichtung in regelmäßigen zeitlichen Abständen erneuert wird. Die Abkürzung Dysc des Titel gebenden Begriffs steht für den englischen Ausdruck Dye Sensitized Solar Cell, und die Buchstabenfolge -crete für den Werkstoff Beton. Der mittels elektrochemischer Reaktion Energie erzeugende DysCrete verwendet wie die Farbstoffsolarzelle organische Farbstoffe zur Absorption von Licht. Diese nimmt Licht nicht mit Halbleitermaterialien, sondern – ähnlich wie die chlorophyllhaltigen Pflanzen – mit Suspensionen organischer Farbstoffe auf. In diesem Sinne ist sie eine technische Adaption der Photosynthese. DysCrete verfolgt den Ansatz eines auch in situ einsetzbaren Sprühverfahrens als Schicht-Erneuerungs-Verfahren. Anstelle der einmaligen Verkapselung, bei der mit dem Ausfall einer Komponente die gesamte Zelle unbrauchbar wird, steht ein Schichtgruppensystem mit einer erneuerbaren Sandwich-Struktur und einem variablen Zellenaufbau.

Technisch liegt der DysCrete Zelle ein schematischer Aufbau von Funktionsschichten zugrunde. Sie bilden in ihrer Gesamtheit eine Redoxreaktionsschicht, mittels der unter Lichteinfall auf elektrochemischem Weg Energie erzeugt wird. Die Schichten werden durch die gezielte physikalisch-chemische Modifikation des Betons an seiner Oberfläche sowie durch die Integration und die Applikation von Substanzen erzeugt. Die Synthese- und Beschichtungsverfahren zur Herstellung der Strom produzierenden Veredelung erfolgen in einem kombinierten Sprüh- und Sinterverfahren, welches sich sehr gut in den Herstellungsprozess von Fertigteilen integrieren lässt. Über die Systemkomponenten Farbstoff und Elektrolyt kann das Schichtsystem auf eine Empfindlichkeit in spezifischen Spektralbereichen des Lichts bis in den unsichtbaren Bereich hinein eingestellt werden. Ein großer Vorzug des Farbstoff sensitivierten Betons sind die vergleichsweise geringen Produktionskosten. Das System hat das technologische Potential einer “Low-Cost Energy Source ”.

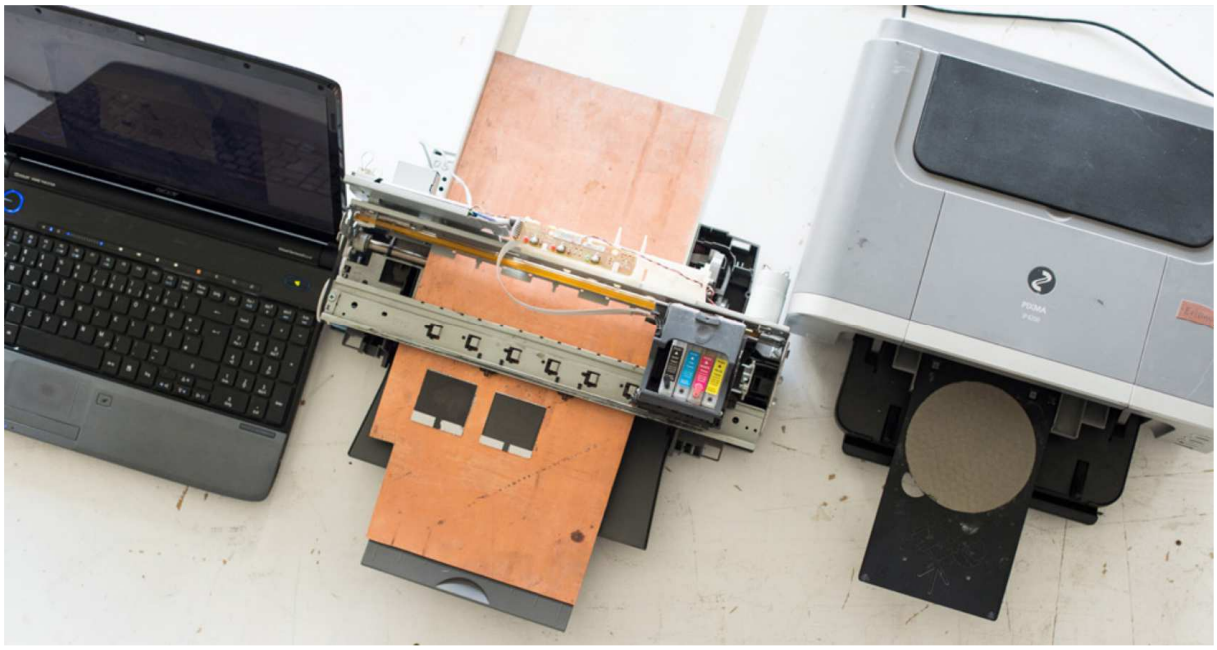

Abbildung 1 Test Druck-Sprüheinheit und Verfahrwege eines Automaten in kompakter Bauweise; Steuerung erfolgt mittels Laptopapplikation

Die folgerichtige Weiterentwicklung der im Projekt DysCrete erarbeiteten Herstellungsverfahren für eine Beschichtung von Dye Sensitized Solar Cells in der Fertigteilproduktion ist eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Beschichtung in situ an der Fassade. Dies ist Gegenstand des Forschungsvorhabens Plotbot/Crawler.

3 Projektaufbau

3.1 Team

Das Projekt Plotbot/Crawler wurde bearbeitet von M.Sc. Arch. Frederik Ecke, Dipl.-Ing. Elektrotechnik Helmut Fligge, Dipl. Ing. Arch. Thorsten Klooster, B.Sc. Jan Juraschek, B.Sc. Christian Wagner, Simon Novak, Nils Kühn, Xuezhou Zhang unter Leitung von Prof. Heike Klussmann.

3.2 Methodologie

Die Entwicklung des Plotbot/Crawler wurde mit einer Reihe von funktionalen Prototypen vorangetrieben, welche iterativ entwickelt und beobachtend und explorativ untersucht wurden.

Jedem Versuch ging eine Recherche voraus, um den möglichen Lösungsraum zu reduzieren und um anschließend Hypothesen zu den zu erwartenden Eigenschaften und Modelle des zu erwartenden Verhaltens der Versuchsaufbauten bilden zu können.

In den heuristischen Versuchsaufbauten wurden mechanische Parameter wie Beschleunigung, Weg und Position, elektrische Parameter wie Reaktionszeiten und Stromaufnahmen und prozessuale Parameter wie Wegoptimierungen gemessen und aufgenommen. Die verwendete Sensorik waren mechanische Feinmessgeräte wie Messuhren, elektrische Digitalmultimeter und Zeitmessgeräte oder Logdateien der Bahnsteuerungsalgorithmen zur Performancebeurteilung der Wegoptimierungen.

Die erfassten Daten wurden auf Plausibilität geprüft und statistische Ausreißer entfernt. Die Daten wurden vergleichend bewertet, um typischer Weise das bessere der verglichenen Konstruktionsprinzipien oder Verfahren zu ermitteln. In der grundsätzlich schrittweisen und iterativen Vorgehensweise bei der Entwicklung des Plotbot/Crawler wurden dann die besten Entwicklungspfade identifiziert sowie die übrigen verworfen, erstere bildeten dann die Basis für die nächsten Schritte.

Die letzte Arbeitseinheit eines jeden iterativen Entwicklungsschrittes bestand in der Dokumentation der Arbeitsschritte: Recherche, Entwicklung des Versuchsaufbaus, Durchführung der Versuche und Analyse und Bewertung der Ergebnisse.

4 Projektdurchführung

Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen und anderer wesentlicher Ergebnisse gemäß Zuwendungsbescheid.

Der Abschlussbericht beinhaltet die Projektdokumentation im Zeitraum 1.9.2016 bis 31.12.2019. Alle Arbeitspakete wurden voll umfänglich, aber nicht notwendigerweise in der im Antrag genannten Abfolge bearbeitet.

4.1 Recherche und Untersuchungen zu Hardware Sensor-Aktor Maschinenkomponenten

Es wurden Robotik-Systeme untersucht, die für Arbeiten an senkrechten Flächen konzipiert wurden. Dazu gehören bereits im Einsatz befindliche Systeme wie Fensterputzroboter oder kameragestützte Drohnen zur visuellen Bauteilprüfung, aber auch experimentelle Systeme, die eher unkonventionelle Fortbewegungsmethoden wie beispielsweise den Gecko-Effekt nutzen. Folgende Robotik-Systeme wurden eingehend bezüglich Konstruktion, Fortbewegung und der Funktionalität ihrer Einzelkomponenten untersucht und ausgewertet.

4.1.1 Fassadenklimmer

Fassadenklimmer sind Systeme, die direkt an der Fassade sitzen und sich an ihr fortbewegen. Die Anhaftung an der Fassade wird über Vakuum, Magnetismus oder elektrostatische Kräfte erreicht. Fassadenklimmer verfügen meist über bewegliche Gliedmaßen oder andere bewegliche Mechanismen, die die Fortbewegung ermöglichen. Vorteilhaft ist, dass sie klein, leicht und mobil sind. Nachteilig ist, dass sie aufgrund ihrer Fortbewegungsart nicht ausreichend genau positioniert werden können und nur auf spezifischen Untergründen (z.B. Haftung mittels Vakuums auf einer Glasfassade) eingesetzt werden können. Des Weiteren ist nachteilig, dass aufgrund der geringen Haftkräfte und der kabellosen Stromversorgung durch Akkumulatoren zusätzliche Lasten nicht über größere Distanzen und längere Zeiträume bewegt werden können.

4.1.2 Drohnen/Multikopter

Drohnen/Multikopter sind ferngesteuert oder autonom fliegende Systeme, angetrieben von einem oder mehreren Propellern. Von Vorteil ist die sehr kompakte Konstruktion in Leichtbauweise. Nachteilig ist die begrenzte Betriebsdauer durch die Verwendung von Akkus. Auch können zusätzliche Lasten in nur sehr begrenztem Umfang mitgeführt werden. Die Systeme sind windanfällig und daher für präzise Arbeiten an einer Fassade nicht geeignet.

4.1.3 Seil-/Parallelroboter

Seil-/Parallelroboter sind Systeme, die sich über Seile oder andere lineare Systeme fortbewegen, wie z.B. Stadionkameras oder die Systeme im Projekt IPAnema des Fraunhofer IPA. Hier kann eine mit acht Seilen eingespannte Plattform über Motoren und Seilspulen äußerst präzise und mit hoher

Geschwindigkeit vollautomatisch oder manuell im Raum bewegt werden. Parallele Seilroboter sind äußerst flexibel in der Skalierung des Arbeitsraumes. Nachteilig ist der hinderliche Verlauf der Seile quer durch den Arbeitsraum.

4.2 Entwurf und funktionelle Entwicklung der Verfahrensschritte und Systemkomponenten

In Bezug auf die Positionier- und Wiederholgenauigkeit, sowie des angestrebten möglichst flexiblen Einsatzes des Plotbot/Crawlers an Fassaden unterschiedlicher Bauart, Oberfläche und Größe, hat sich das Prinzip der seilgestützten Roboterführung als am besten geeignet herausgestellt. Durch dieses Verfahren ist die Position des Roboters an der Fassade zu jedem Zeitpunkt exakt steuer- und bestimmbar sowie minimal störanfällig durch äußere Faktoren wie Wind und Wetter. Die Odometrie (Wegmessung) ist bei allen anderen Systemen (Vakuumroboter, Drohnen, etc.) nur aufwändig realisierbar, da diese keine Referenzpunkte zur Messung der zurückgelegten Wege zur Verfügung haben. Die Wege und Positionen des Seilroboters hingegen sind über die steuerbaren Seillängen präzise und werden durch Wind oder nur geringfügig beeinträchtigt.

4.3 Plotbot/Crawler Prototyp P1

4.3.1 Erstellen eines allgemeinen Anforderungsprofils / Prototyp P1

Die wesentlichen Punkte des Anforderungsprofils des Prototypen 1 sind:

- Maschinenbaulich und softwaretechnisch funktionsfähige mobile Basis (positionierbare Plattform mit den Sensoren und Aktuatoren und Effektoren des Systems)
- Konstruktionsraum zur späteren Aufnahme der Funktionswerkzeuge
- Vertikales Seilsystem zur Steuerung der Bewegung in der x- und y-Achse
- Propellereinheit zur Steuerung der Bewegung in der z-Achse
- Bewegungsraum 4,0 m x 4,0 m
- möglichst geringer Energieverbrauch und geringe Betriebskosten
- einfache Montage, einfaches Handling

4.3.2 Prototypenentwicklung Hardwarekomponente mobile Basis / Prototyp P1

Die mobile Basis wurde mit den Außenmaßen 0,35 m x 0,35 m angelegt und besteht zur Aussteifung aus zwei 5 mm starken laserbearbeiteten Plexiglasscheiben, die mit einem Abstand von 80 mm miteinander verbunden sind. In diesem Zwischenraum ist die gesamte Antriebseinheit untergebracht. Der Antrieb des Systems wird durch vier NEMA 11 Schrittmotoren (1,8°) mit 80:1 Planetengetriebe gewährleistet. Das Getriebe verleiht den Motoren mehr Drehmoment, und führt gleichzeitig zu einer Drehzahlreduktion. Zur Positionierung der mobilen Basis wird diese vertikal ausgerichtet an vier Seilen befestigt, die jeweils an den Eckpunkten der Fassade bzw. der zu bearbeiteten Fläche verankert sind. Hierfür wurde das bei Stadionkameras eingesetzte horizontale

Bewegungssystem zu einem vertikalen Bewegungssystem weiterentwickelt. Jeweils eine Spule aus PVC ist für das präzise und gewindemäßige Auf- und Abwickeln des 1 mm starken Fallschirmseils symmetrisch zu den Motoren an der mobilen Basis angebracht (Abb. 2).

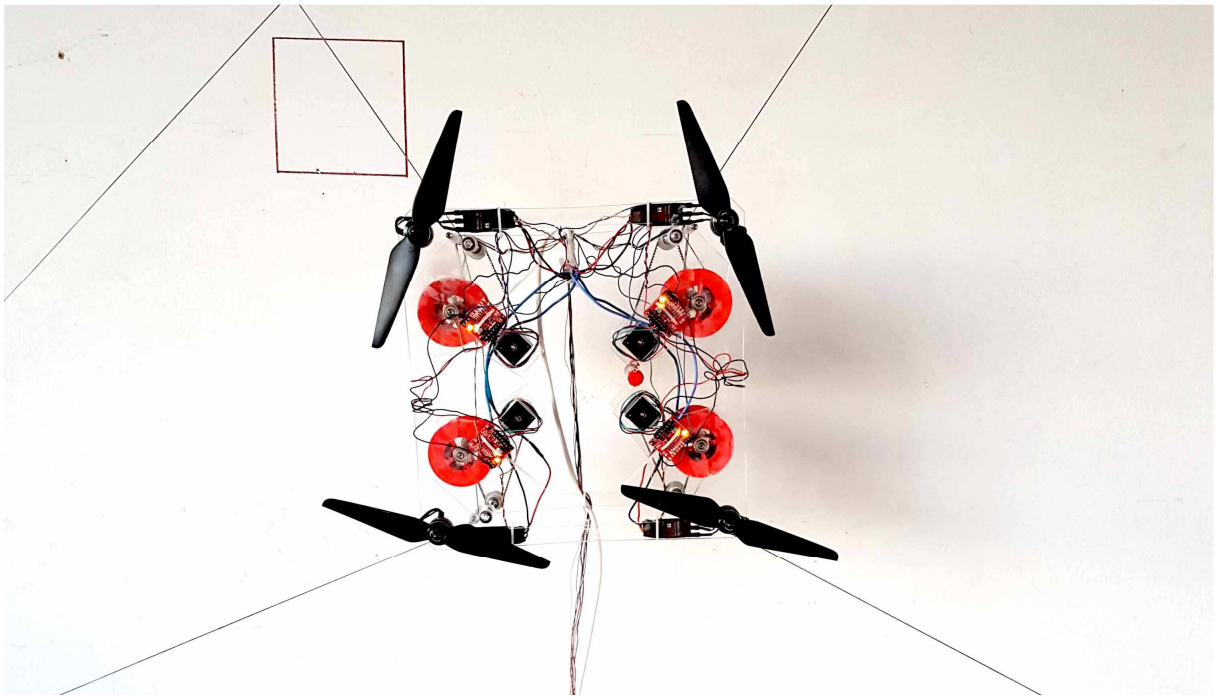

Abbildung 2 Plotbot/Crawler Prototyp P1, mobile Basis an Testfläche

Durch Ansteuerung der einzelnen Motoren wird das jeweilige Seil auf der zughörigen Spule aufgewickelt und die mobile Basis bewegt sich in die entsprechende Richtung. Mit Prototyp P1 lässt sich ein Bewegungsraum von 4,0 m x 4,0 m gezielt anfahren und die mobile Basis präzise positionieren. Die Motoren und Spulen wurden direkt auf der mobilen Basis installiert, um die Montage so einfach wie möglich zu halten. Zudem ist der Plotbot/Crawler dadurch gut zu warten und auf nahezu allen Fassaden und Untergründen anwendbar. Durch das Seilsystem sind die energetischen Betriebskosten sehr gering, da nur Strom benötigt wird, wenn sich die mobile Basis an der Wand bewegt. Ruht die mobile Basis an der Fassade, ist lediglich ein sehr geringer Energiebedarf erforderlich, um die Motorenbremsen zu aktivieren und so den Plotbot/Crawler exakt in Position zu halten.

Ergänzend zum Seilsystem für die 2-achsige Bewegung in der x- und y-Achse an der Fassade, wurde eine Propellereinheit entwickelt, um der mobilen Basis die Bewegung in der z-Achse zu ermöglichen. Dazu wurde die mobile Basis mit vier mit Propellern ausgestatteten Motoren vom Typ T-Motor Air 2213 920kv Brushless Motor 3S-4S ergänzt. Werden die Propeller aktiviert, sorgt der entstehende Luftstrom dafür, dass die mobile Basis, bei gleichzeitiger gezielter Verringerung der Seilspannung, von der Wand weggedrückt wird. Wird nun von den beiden nicht tragenden Spulen Seil abgewickelt,

bewegt sich der Plotbot/Crawler kontrolliert von der Wand weg und ist in der Lage, Hindernisse wie beispielsweise Fenster, Simse, Vor- und Rücksprünge zu überwinden.

4.3.3 Entwicklung Verfahren und Prototypenentwicklung Sensortechnik und Steuerung (Positionierung) der Komponente mobile Basis

Als Grundlage zur Steuerung des Prototypen P1 dient die Software LinuxCNC, die über eine Open-Source-Lizenz für Anwender und Entwickler zur Verfügung gestellt wird.

LinuxCNC steuert eine außerhalb des Steuerrechners befindliche Zusatzeinheit an ("Mesa-Karte"), welche die Takt- und Richtungs-Steuerimpulse bereitstellt, die von den Motortreibern in leistungstragende Motorströme umgesetzt werden. Weiterhin ist es mit der Software möglich Systeme zu realisieren, die nicht in einem herkömmlichen kartesischen Koordinatensystem arbeiten (kartesisch -> rechtwinklige Raumkoordinaten in x-, y-, und z-Achsen = ein Antrieb für jede Achse). Wenn solche Maschinen die Position des Werkzeugs in eine Raumrichtung verändern sollen, so wird dazu nur ein Motor der jeweiligen Achse angesteuert. Durch die simultane Bewegung von zwei Achsen werden kurven- bzw. kreisförmige Bewegungen erzeugt. Die Bewegungen der achsenzugehörigen Antriebe werden durch die Kinematik definiert und berechnet.

4.3.3.1 Programmierung

Der Prototyp P1 nutzt vier Motoren, also vier Achsen, um sich in einem zwei- bzw. dreiachsigen System zu bewegen. Die Achsen sind nicht orthogonal, sondern parallel zueinander positioniert, was eine Umrechnung der Achsenpositionen aus dem kartesischen System notwendig macht (parallel vs. orthogonal).

Der Prototyp P1 bewegt sich mit vier Seilen im Raum. Somit ist eine lineare Bewegung an der Fassade nur über eine simultane Änderung aller vier Seillängen möglich. Die Software wurde dahingehend entwickelt, dass mit Hilfe der integrierten Kinematik die Änderungen der Seillängen kontinuierlich berechnet werden und die Software steuert, welche Motoren mit welcher Geschwindigkeit, in welche Richtung angetrieben werden. Im Fall des Prototyp P1 werden also die Arbeitskoordinaten (Wegpunkte auf der Fassade) in Seillängen umgerechnet. Die Umrechnung ist die Kinematik. Die Kinematik ist Teil der Mechanik und behandelt die Bewegung von Punkten und Körpern im Raum.

Hintergrund: Auch wenn die Seile des Plotbot/Crawler scheinbar nicht parallel zueinander liegen, handelt es sich doch um einen "seilgestützten Parallelroboter" (eng. cable-driven parallel robot). Wenn man die ersten Parallelkinematikmaschinen von Gough und Stewart aus den 50er bzw. 60er Jahren näher betrachtet, stellt man fest, dass die Bewegung der Plattform nur durch die Veränderung der Längen der dort verwendeten Stellzylinder erfolgt , welche quasi parallel zueinander stehen (siehe Flugsimulatoren u.ä.). [1]

Der Plotbot/Crawler ist daher eine Weiterentwicklung dieser Maschinen, wobei die Kolben durch Seile ersetzt werden. Da Seile aber nur Zugkräfte übertragen können, kann entweder nur gegen die Schwerkraft gearbeitet werden (mobile Basis hängt) oder die Ankerpunkte der Seile liegen sich gegenüber, sodass die mobile Basis “eingespannt ” wird.

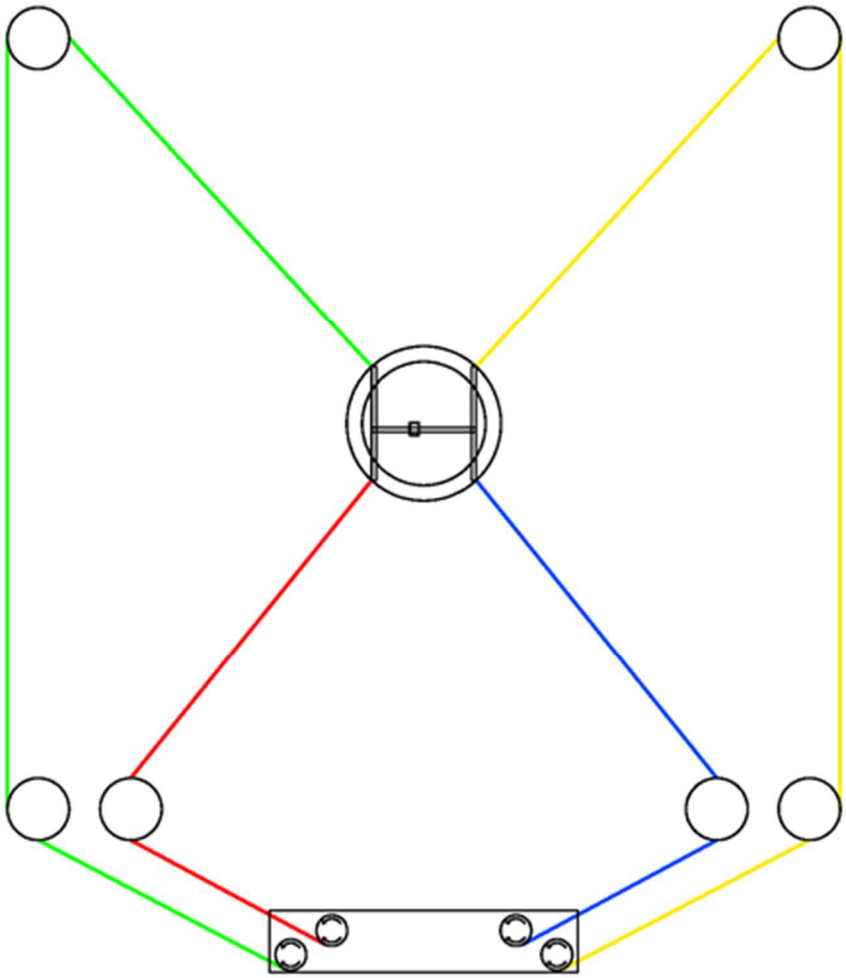

Abbildung 3 Prinzipielle Kinematik des Plotbot/Crawlers

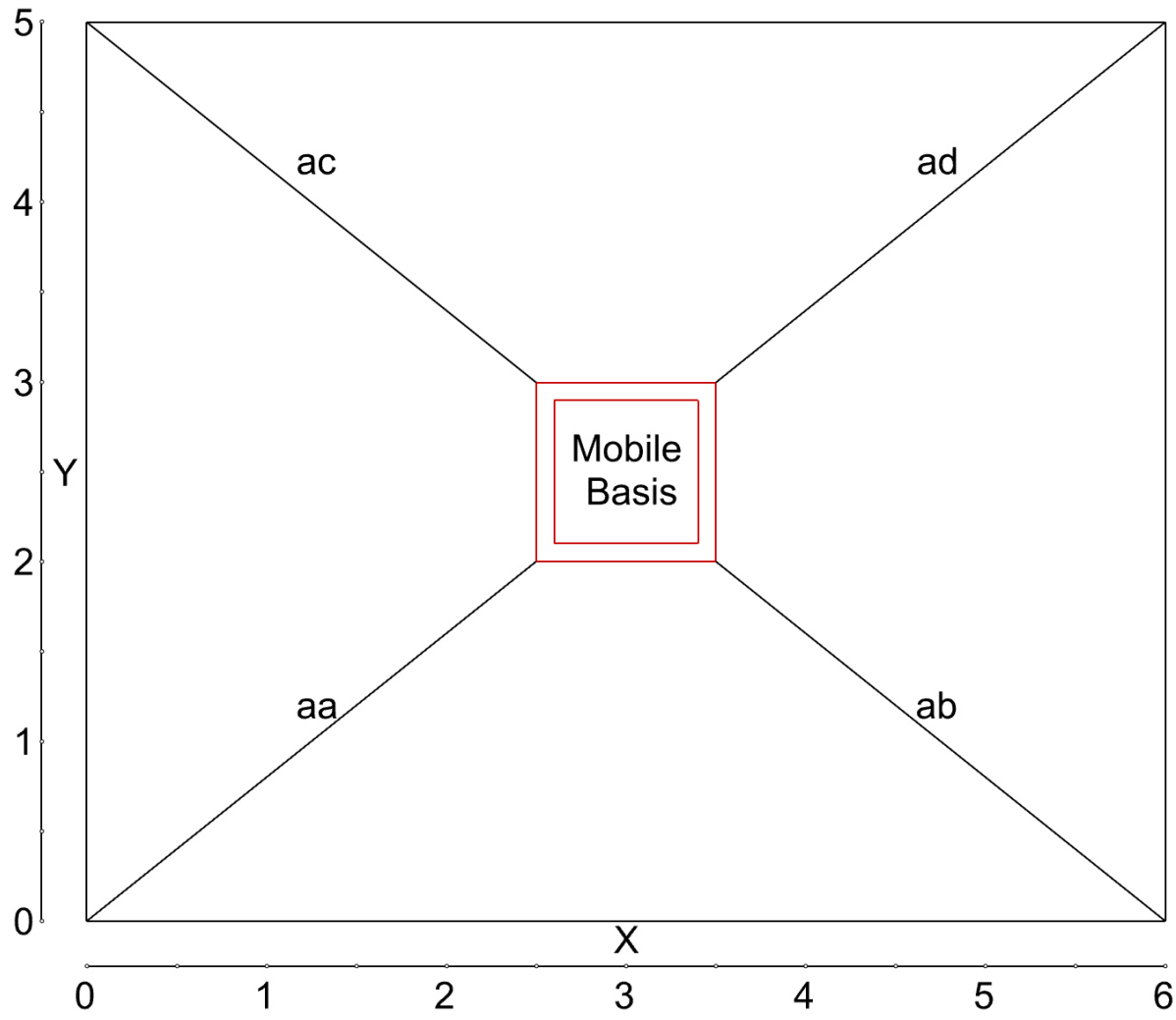

Abbildung 4 Grafik Positionsbestimmung Plotobot/Crawler P1 und P2

Wie in Abb. 4 zu sehen, kann die aktuelle Position des Plotbot/Crawler auf der x- und y-Achse abgelesen werden. Gesucht sind jedoch die den Seilen entsprechenden Diagonalen. Da x und y gegeben sind, kann die Diagonale als Hypotenuse betrachtet und mit dem Satz des Pythagoras berechnet werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Achsen orthogonal zueinanderstehen. Die so gebildeten Formeln für jedes Seil lauten also:

$$aa = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$ab = \sqrt{(x_{max} - x)^2 + y^2}$$

$$ac = \sqrt{(x^2 + (y_{max} - y)^2}$$

$$ad = \sqrt{(x_{max} - x)^2 + (y_{max} - y)^2}$$

Die Rechnung von Xmax - X und Ymax – Y wird angewendet, da die Diagonalen von ab, ac und ad nicht auf die Nullkoordinaten zu laufen und daher die relative Differenz gesucht wird.

Erweitert man die Formeln um den Wert z bzw. z^2 kann die kubische Diagonale berechnet werden, die das Seilsystem um eine dritte Achse (z-Achse) mathematisch ergänzt, die senkrecht zur Fassade zeigt.

Die Grundformel lautet nun:

$$aa = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

4.3.3.1.1 G-Code

Die Steuerung des Prototyp P1 wurde so entwickelt, dass sie manuell über Tastatur oder nach einem zuvor erstellten Script (einer Sammlung von Arbeitsschritten) automatisch erfolgen kann. In diesem Script werden Koordinaten sowie Arbeitsanweisungen gespeichert. Das gewählte Scriptformat ist “G-Code”, welches als Format 1950 erstmals beschrieben wurde, in der DIN ISO 6983 normiert ist und üblicherweise für industrielle CNC-Maschinen genutzt wird.

4.3.4 Durchführung von Versuchsreihen Prototyp Hardwarekomponente mobile Basis / Sensorik und Steuerung (Positionierung) der Komponente mobile Basis / Prototyp P1

Der Prototyp P1 wurde an einer Wandfläche mit 4,0 m x 4,0 m installiert und in Versuchsreihen systematisch getestet. Die Versuchsreihen zum Bewegungsablauf und zur exakten Positionierung des Prototyp P1 an der Wand sind erfolgreich verlaufen. In weiteren Versuchsreihen konnten mit einer provisorischen Zeichenvorrichtung erste am Computer generierte Geometrien auf die Wand übertragen werden.

4.3.5 Analyse und Auswertung Prototyp Hardwarekomponente mobile Basis / Sensorik und Steuerung (Positionierung) der Komponente mobile Basis / Prototyp P1

Da Schrittmotoren mit zunehmender Drehgeschwindigkeit an Drehmoment verlieren, wurde dem Prototyp P1 eine Geschwindigkeitsgrenze von 500 mm/min gesetzt, um sicher Schrittverluste und damit Verluste von Positionsinformationen vermeiden zu können.

4.4 Plotbot/Crawler Prototyp P2

4.4.1 Erstellen eines allgemeinen Anforderungsprofils / Prototyp P2

Wesentliche Punkte des Anforderungsprofils für den Prototyp:

- Navigation mit bis zu 3000 mm pro Minute
- Entfernung des Systemantriebs aus der mobilen Basis zur Gewichtsreduktion
- Integration und Vergrößerung des Bauraums auf 60 cm Durchmesser
- Integration des Funktionswerkzeugs mit der Sprüh-Druckkomponente

4.4.2 Systematisierung der Maschinenkomponenten und Verfahren im Hinblick auf Verfahrensentwicklung flexibel einstellbaren Diagnose/Funktions-Werkzeug Plotbot/Crawler

Für die Aufnahme der Funktionswerkzeuge wurde ein H-Bot im Zentrum der mobilen Basis entwickelt. Der H-Bot ist ein 2-achsiges System zur Werkzeugaufnahme und gezielten Steuerung und Positionierung des Funktionswerkzeugs an der Wand. Er besteht aus drei Linearführungen mit jeweils einem aufmontierten beweglichen Schlitten. Zwei Führungen stehen senkrecht und parallel zueinander, die dritte wird als horizontale Verbindung auf die Schlitten der senkrechten Führungen montiert. Diese wurden mit Hilfe von eigens hierfür individuell entwickelten und gefertigten 3D-gedruckten Bauteilen zu einem H-förmigen Bewegungsautomaten zusammengesetzt. Über mehrere Umlenkrollen wurde ein Zahnriemen gespannt, der die zwei Motoren mit der Befestigungsplatte des Tool-Kopfes verbindet. Dadurch entsteht ein leichtes System, das über die Ansteuerung von zwei festmontierten Schrittmotoren in zwei Richtungen bewegt werden kann.

Durch die jeweiligen Drehrichtungen der Motoren wird der Riemen verkürzt oder verlängert und die Befestigungsplatte verändert ihre Position (siehe Abb. 5).

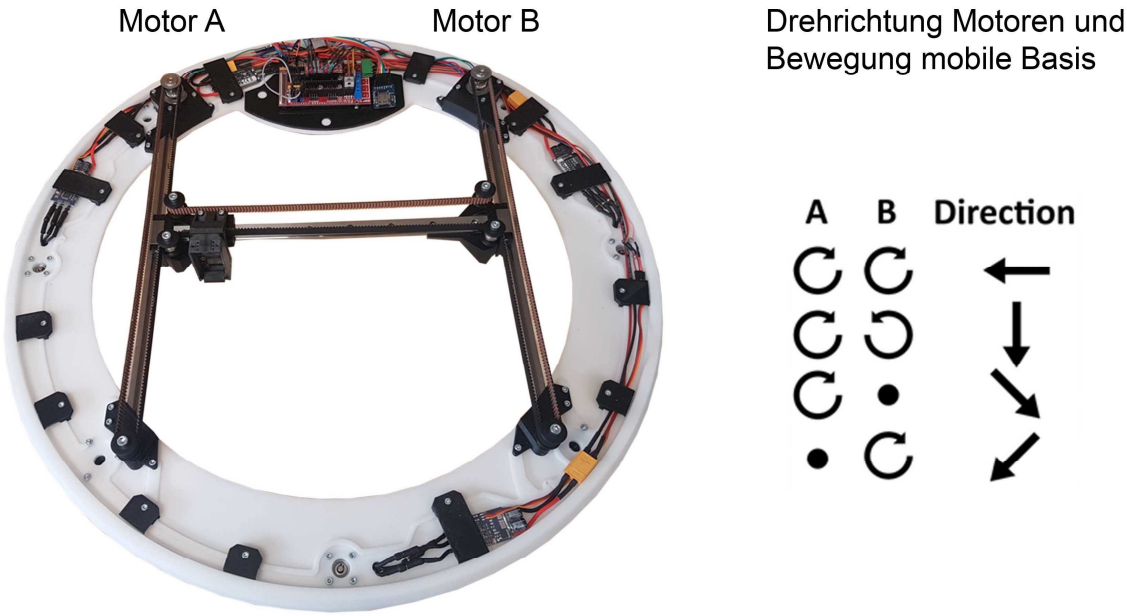

Abbildung 5 Plotbot/Crawler Prototyp P2, H-Bot auf mobiler Basis, Drehrichtung der Motoren und Bewegungsrichtung der mobilen Basis

4.4.3 Bauliche Entwicklung (Komponentenoptimierung) und Entwicklung der Sensortechnik und Fertigstellung Prototyp Diagnose/Funktions-Werkzeug Plotbot/Crawler

Die für Prototyp P1 eingesetzten Schrittmotoren der Bauart NEMA17 mit einer Schrittweite von 1,8° (200 Schritte pro Umdrehung) können auch im Bereich 3D-Druck eingesetzt werden. Zur elektronischen Versorgung wurden diese über ein RAMPS-Modul (RepRapArduinoMegaPololuShield) angeschlossen. Das RAMPS-Modul wurde auf einem ArduinoMega (Microcontroller) montiert und setzt die vom Microcontroller generierten Takt/Richtungssignale in leistungstragende Ströme für die Motoren um.

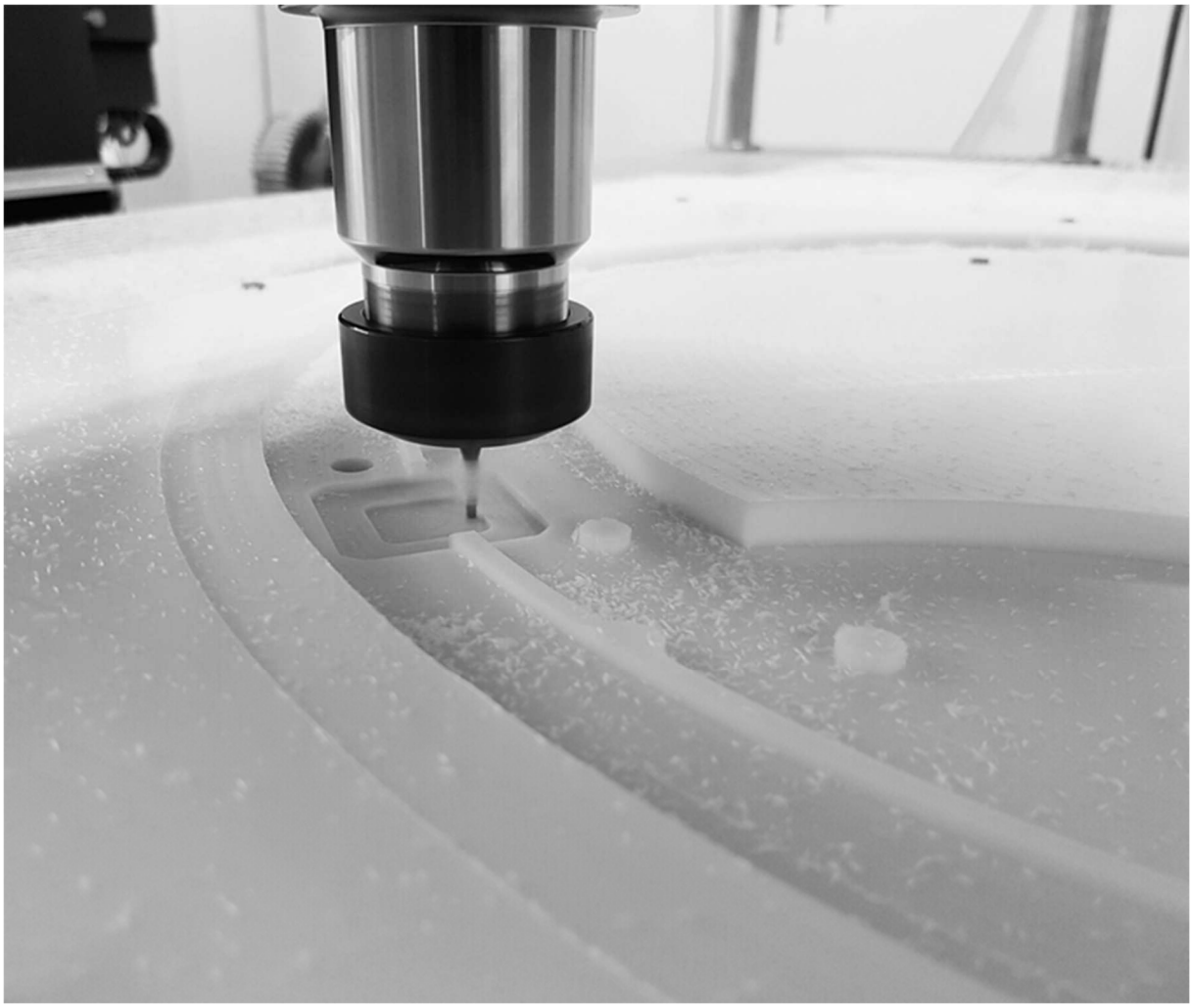

Abbildung 6 Entwicklung der Geometrie der mobilen Basis im Hinblick auf Stabilität und Gewichtsminimierung, Material POM (Polyoxymethylen)

Abbildung 7 Entwicklung der Halterungen der Motoren aus PLA (Polylactide) für den H-Bot auf dem 3D-Drucker

Durch die Integration des H-Bot auf der mobilen Basis können verschiedene Werkzeuge montiert und millimetergenau gesteuert werden. Während die mobile Basis die weiten Verfahrwege und Bewegungen an der Fassade abwickelt, ist der integrierte H-Bot in der Lage, Arbeiten mit hoher Genauigkeit durchzuführen.

Weiterhin wurde das im folgenden beschriebene Funktionswerkzeug Sprüh-Druckkomponente entwickelt, das verschiedene Funktionsschichten in zuvor definierter Geometrie auf eine Fassade auftragen kann. Der Druckbereich des H-Bot beträgt 25 cm x 25 cm.

4.4.4 Erste Konstruktion einzelner Bauteile (Sprüh-Druckkomponente, Bürstensystem, Minikamera) und konzeptionelle Kombination zu Baugruppe Diagnose/Funktions-Werkzeug Plotbot/Crawler und durchführen erster Versuchsreihen Sprüh-Druckkomponente

Hauptaugenmerk bei der Entwicklung lag auf der Sprüh-Druckkomponente (Abb. 8). Für die Sprüh-Druckkomponente wurde zunächst eine universelle Tintenstrahlpatrone mit integriertem Druckkopf an den Funktionsraum angepasst. Nach einer umfassenden Recherche zu Tintenstrahlpatronen fiel die Wahl auf die Patrone C6602 vom Hersteller Hewlett Packard. Dies ist eine auf das Wesentliche reduzierte wieder befüllbare Druckpatrone ohne Füllstanderkennung oder sonstige Elektronik. Außerdem können aufgrund ihrer einfachen und robusten Bauweise mit ihr nicht nur Druckfarben, sondern auch weitere flüssige Stoffe unterschiedlicher Viskositäten verwendet und gedruckt werden. Der integrierte Druckkopf besitzt 12 Düsen, die in einem 2 x 6 Raster angeordnet sind. Ein weiterer Vorteil dieser Patrone liegt in der Möglichkeit, jede Düse über 24 V Impulse direkt anzusteuern. Hierdurch konnte auf aufwendige Elektronik verzichtet werden kann und die benötigten Impulse vom bereits verbauten Microcontroller zusätzlich erzeugt werden können.

Da der Microcontroller mit einer Spannung von nur 5 V arbeitet, wurde eine zusätzliche Platine entwickelt und produziert, welche die für den Druckkopf benötigte Spannung auf 24 V anhebt und gleichzeitig als Demultiplexer fungiert, also eine niedrige Zahl von Anschlüssen auf eine hohe Zahl erweitert. Der integrierte Demultiplexer reduziert die zur Ansteuerung benötigten Anschlüsse am Microcontroller, die somit für andere Anwendungen/Tools wieder zur Verfügung stehen.

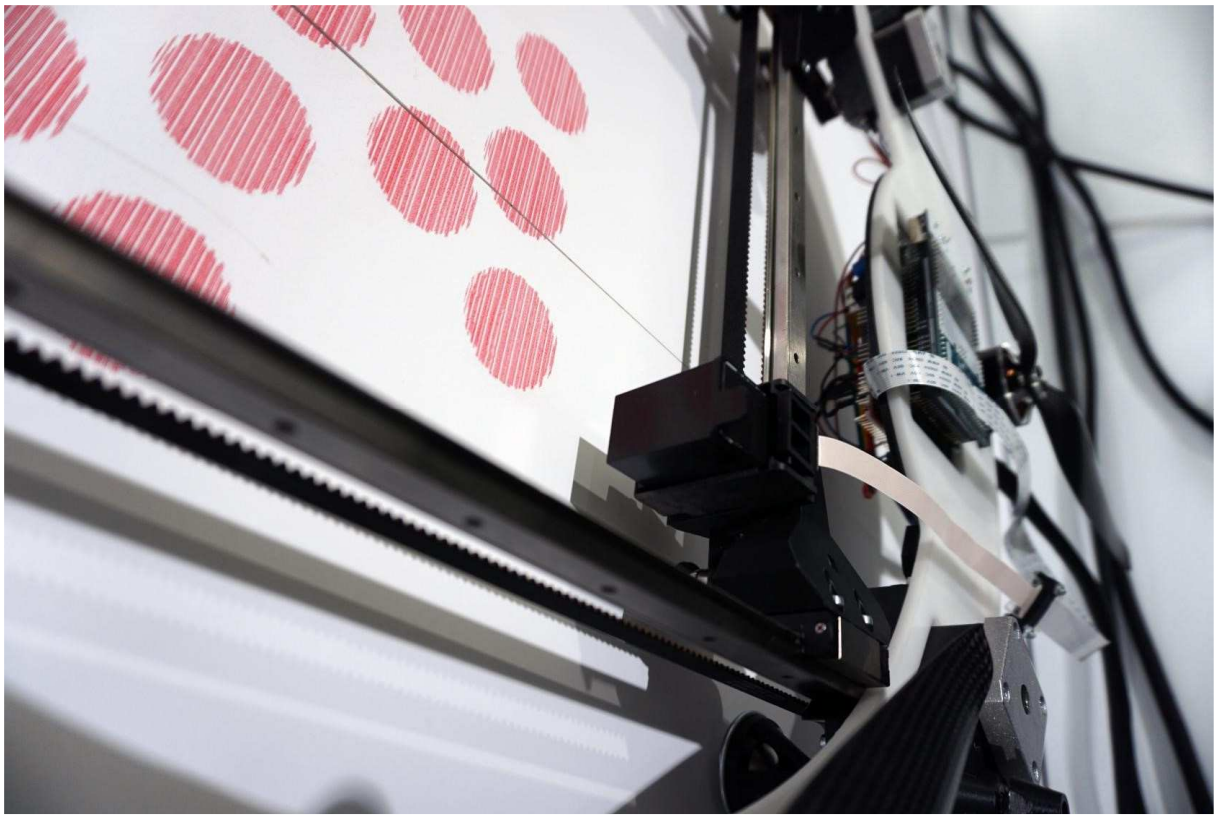

Abbildung 8 Plotbot/Crawler Prototyp P2, H-Bot mit Sprüh-Druckkomponente

4.4.5 Erste Versuchsreihen und Analyse des Plotbot/Crawler Prototyp P2

Der Druckablauf des Plotbot/Crawlers funktioniert wie folgt:

Durch den jeweiligen Befehl im G-Code wird eine Koordinate angefahren (z.B. x = 200, y = 500). Ist die Position erreicht, wird über eine Datenleitung ein Signal an den Microcontroller am Plotbot/Crawler übermittelt. Wird das Signal empfangen, beginnt der H-Bot mit seiner Druckroutine. Er liest die zu druckende Wertetabelle aus und fährt gleichzeitig die Achsen ab. Soll ein Pixel gedruckt werden, gibt der Microcontroller einen Impuls über die Treiberplatine an den Druckkopf weiter und dieser stößt einen kleinen Tropfen Tinte aus. Ist der gesamte Druckvorgang abgeschlossen, kehrt der Druckkopf auf seine Ausgangsposition zurück und sendet ein Quittungssignal an den Hauptrechner zurück. Dieser erkennt damit, dass der Arbeitsvorgang beendet wurde und fährt die nächste Position an.

In diesen Testreihen lag der Fokus der Untersuchung auf der Maßgenauigkeit des Druckbildes, der Genauigkeit des Druckbildes bei einem Druck in mehreren vertikal versetzten Durchläufen und dem zu erreichenden Deckungsgrad des Farbauftrages. In iterativ vergrößerten Abständen vom Druckmedium und unter Veränderung der Verfahrparameter wie der Geschwindigkeit und der vertikalen Überlappung wurde die grundsätzliche Eignung des verwendeten resistiv-thermischen Druckverfahrens untersucht und in vollem Umfang bestätigt.

In der Entwicklung der Geometrien der Druckkopfhalterungen zeigte sich, dass die Patrone bis zu einem Abstand von 70 mm zur zu bedruckenden Fläche gute Ergebnisse lieferte. Ab ca. 100 mm wurde die Streuung des Tintenstrahls sichtbar größer und das Druckbild verlor an Farbintensität und Schärfe.

4.4.6 Konzeption und Fertigstellung Potbot/Crawler P2 - Tool für verfahrenstechnische Maschinenentwicklung

Da der Microcontroller nur einen kleinen Speicher besitzt, wurde dieser um ein SD-Kartenlesemodul erweitert. Dieses erlaubt es, Daten von einer SD-Karte auszulesen, zu verarbeiten und zu speichern.

Über einen Preprocessor (Ein Softwaremodul zur Vorverarbeitung von Daten, geschrieben in der Programmiersprache Processing, einem erweiterten Java-Funktionsraum) werden am PC schwarz/weiß-Bilder im Bitmap-format Pixel für Pixel analysiert, in eine Tabelle geschrieben und auf SD-Karte gespeichert. Ein schwarzer Pixel wird als “1” und ein weißer Pixel als “0” deklariert.

Für die koordinierte Zusammenarbeit zwischen H-Bot und Druckkopf wurde ein Programm entwickelt, das die Wertetabelle des Preprocessors von der SD-Karte ausliest, sowie Bewegung und Steuerung der Tintenstrahldüsen koordiniert und auf den Microcontroller lädt. Dies ermöglichte es, pro Stopp der mobilen Basis jeweils Muster von einer Größe von bis zu 20 cm x 25 cm zu drucken.

Einzelne Muster können dabei in Form, Größe und Anordnung präzise definiert werden. Dies ermöglicht es, auch gestalterische Aspekte bei der Beschichtung der Fassade mit zu berücksichtigen. Die Größe der Muster kann in Abhängigkeit vom verwendeten Werkstoff (Druckmedien) angepasst werden, um so eine bestmögliche Effizienz der einzelnen Zellen zu gewährleisten.

4.4.7 Prototypenentwicklung Hardwarekomponente und Durchführung von Versuchsreihen mit der mobilen Basis / Prototyp P2

Für die Entwicklung des Prototyp P2 wurde die Antriebseinheit von der mobilen Basis entkoppelt, in einem externen Punkt gebündelt und die Kräfte mittels Seilführung und Umlenkrollen auf die mobile Basis übertragen. Das Konzept, den Antrieb auszulagern brachte den Vorteil, dass der Antrieb unabhängig vom Gewicht bemessen werden kann und somit leistungsstärkere Antriebe verwendet und höhere Lasten (bei gleichzeitig verringertem Eigengewicht der mobilen Basis) bewegt werden können.

Die externe Antriebseinheit beinhaltet zwei große Panasonic Servomotoren (Minas Liqi Serie 750 Watt Leistung) zur Aufnahme der Lasten für die beiden Tragseile und zwei kleinere Servomotoren (Minas Liqi Serie 400 Watt Leistung) desselben Herstellers für die unteren Führungsseile, welche die mobile Basis im senkrecht halten. Die Verwendung von Servomotoren hat den Vorteil, dass sie unabhängig von ihrer Drehzahl ein konstantes Drehmoment besitzen. Die verwendeten Motoren

erreichen 2,5 Nm bei bis zu 3000 1/min. Mit einer Getriebeuntersetzung von 100:1 wird die Drehgeschwindigkeit auf 30 1/min reduziert, das Drehmoment auf 250 Nm gesteigert. Diese hohen Drehmomente werden benötigt, da bei Extrempositionen nahe dem oberen Ende des Arbeitsbereiches die beiden oberen Halteseile nahezu waagerecht verlaufen - Die Kräfte in den Seilen gehorchen dem Tangens des Seilwinkels zur Senkrechten.

Direkt an den Servomotoren befinden sich die Edelstahlspulen (250 mm Länge/ 80 mm Durchmesser) zum Aufwickeln der Seile. Diese sind gleitend gelagert und führen die Seile um eine 20,0 m x 20,0 m Wandfläche.

Nach der Auslagerung der gesamten Antriebseinheit in eine separate Einheit lag das nächste Entwicklungsziel in der Umlenkung der Seilführung.

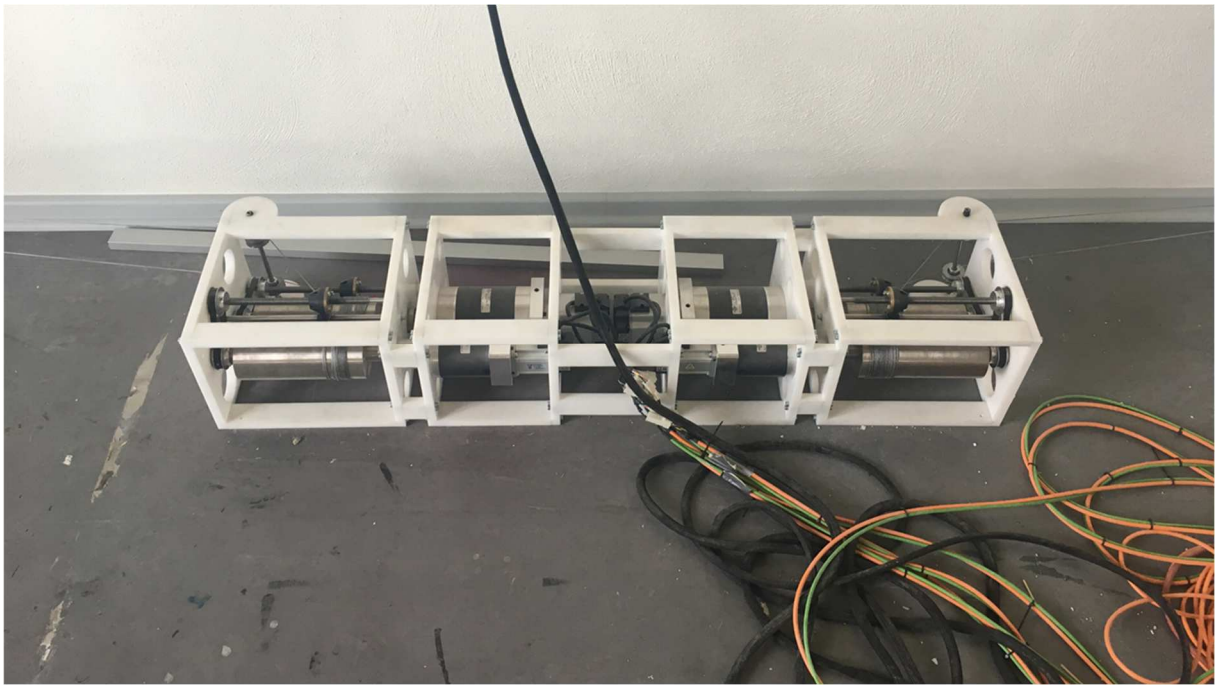

Abbildung 9 Plotbot/Crawler Prototyp P2, Antriebseinheit mit Servomotoren

An den beiden unten und oben liegenden Eckpunkten der Bearbeitungsfläche wurden Aluminium-Umlenkrollen mit einem Durchmesser von 80 mm angebracht. Die Seile laufen so einmal um den Arbeitsbereich herum zur mobilen Basis, welche dadurch gezielt an der Wandfläche bewegt werden kann. Die verwendeten 2 mm starken Seile bestehen aus einem speziell behandelten und geflochtenem PET-Kunststoff (sog. Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene). Diese Seile sind bei geringerem Gewicht und höherer Zugfestigkeit im Vergleich zu Stahlseilen besonders dehnungsarm (3 % bei Bruchlast) und flexibel und können die auftretenden Kräfte innerhalb des Seilsystems bei gleichzeitig sehr hoher Präzision aufnehmen.

Die Größe und der Bauraum der mobilen Basis wurde auf 60 cm Durchmesser verdoppelt, um das flexible Funktionswerkzeug in deren Zentrum integrieren zu können. (Abb. 10).

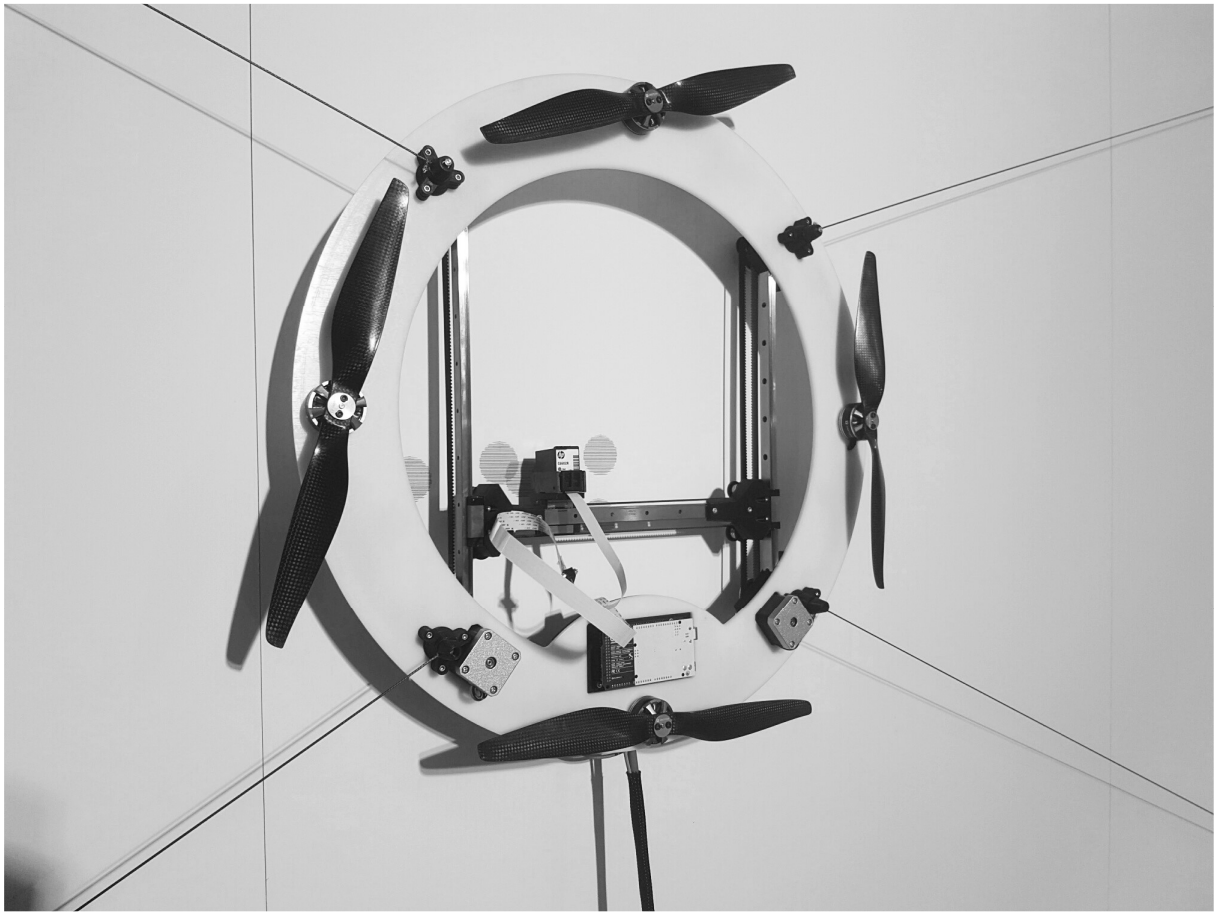

Abbildung 10 Plotbot/Crawler Prototyp P2, mobile Basis mit H-Bot und Sprüh-Druckkomponente an Testfläche

Mit der Vergrößerung der mobilen Basis und dem optional integrierbaren Werkzeug geht eine Gewichtserhöhung der mobilen Basis einher. Deshalb wurden leistungsstärkere Drohnenmotoren eingesetzt, um den Plotbot/Crawler von der Wand weg bewegen zu können. Die verwendeten Propeller (T-Motor MN2206 2000kv Tiger Brushless Motor) können eine horizontale Auftriebskraft von 50 N im rechten Winkel zur Wand erzeugen. Das war ausreichend, um die mobile Basis inklusive des Funktionswerkzeugs so weit von der Wand wegzubewegen, dass Hindernisse und Versprünge bis zu einer Höhe von 10 cm überwunden werden konnten.

Die Drohnenmotoren mit Luftschrauben wurden durch Füße mit Kugelrollen funktional ersetzt. Durch die Füße wird die mobile Basis direkt auf der Fassade geführt. Diese Kugelrollen befinden sich an den Punkten der mobilen Basis, wo auch die Seile angreifen (x-Anordnung). Diese Neuerung bringt den Vorteil, dass der Prototyp P2 direkt an der Bearbeitungsfläche agiert, ohne sich an die zu bearbeitende Stelle heranziehen zu müssen (Abb. 10).

Die Ansteuerung und Kinematik sind bei den Prototypen P1 und P2 identisch, da es keinen Unterschied macht, wo der Antrieb bzw. die Aufwicklung der Seile erfolgt. Durch die Ansteuerung mit Takt- und Richtungssignalen können mit der verwendeten Software LinuxCNC neben Schrittmotoren auch die im Prototyp 2 verwendeten Servomotoren problemlos betrieben werden.

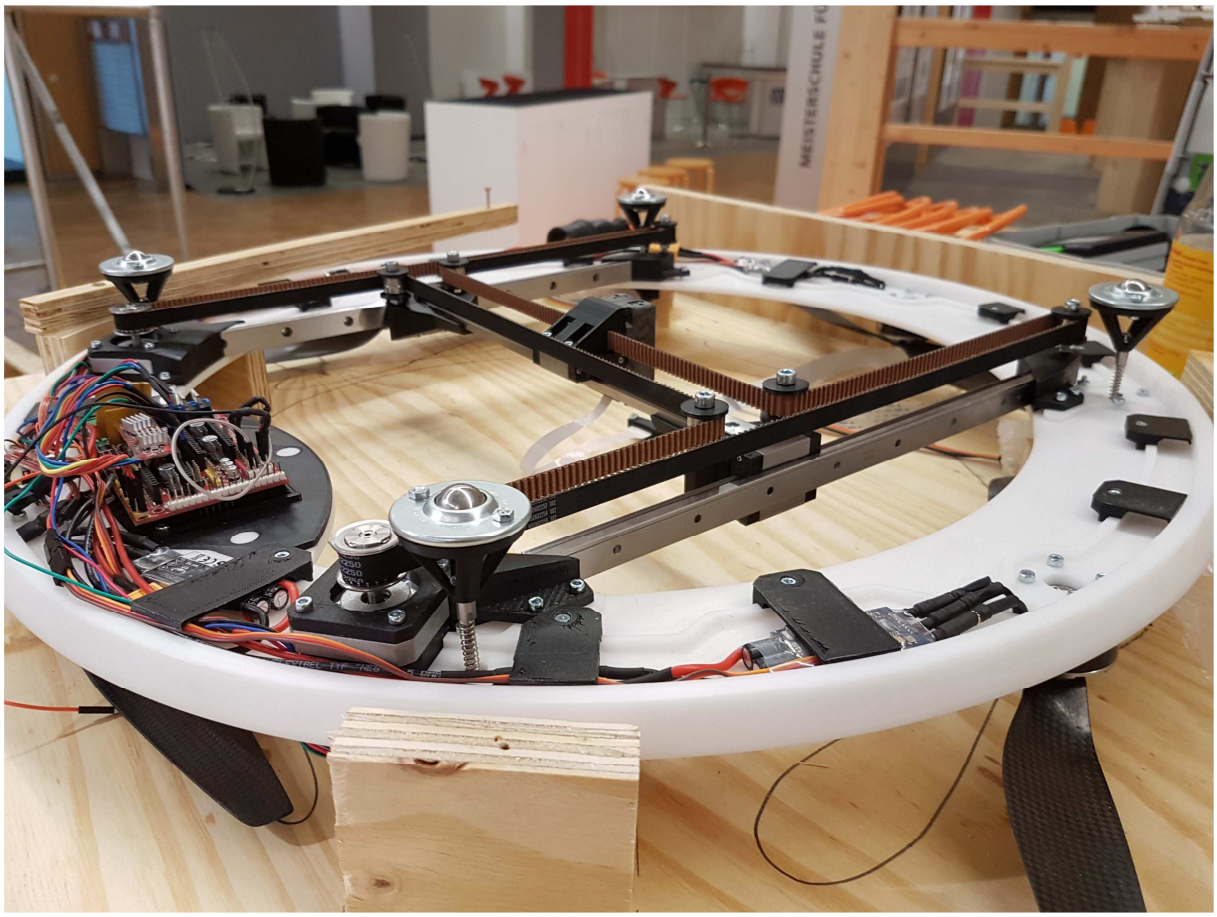

Abbildung 11 Plotbot/Crawler Prototyp P2, mobile Basis mit Steuer-Einheit, H-Bot und Abstandshaltern mit Kugelrollen

4.5 Zwischenfazit

Die für den Antrieb verwendeten Servomotoren und Getriebe konnten den Plotbot/Crawler problemlos auch unter der maximal zulässigen Seilspannung bewegen. Sie boten dabei noch Kräftereserven, um die mobile Basis mit zusätzlichen Komponenten oder Materialien zu erweitern.

Es wurde erfolgreich gezeigt, dass ein Sprüh-/Druckverfahren auf senkrechten Flächen möglich ist. Dabei sind Form und Größe der Druckmuster individuell veränderbar und können mittels der verwendeten H-Bot-Konstruktion an der mobilen Basis bei gleichbleibender Präzision aufgetragen werden. Das System ist in den zwei Modi manuell und automatisch nutzbar: Im manuellen Modus kann jederzeit ein Arbeitsprogramm gestartet werden und der Plotbot/Crawler wechselt in den vollautomatischen Modus, der keine Eingriffe von außen erfordert. Zusätzlich kann über eine manuelle Steuerung (per Taste oder Bildschirm) jederzeit in die Arbeitsprozesse und Bewegungsabläufe eingegriffen werden.

Die Verfahrgeschwindigkeit belief sich auf 9 m pro Minute. Eine höhere Geschwindigkeit war nicht erforderlich, da nur kurze Distanzen zurückgelegt wurden und keine zeitkritischen Arbeitsprozesse involviert waren. Lediglich die Arbeitsgeschwindigkeit der Sprüh/Druckkomponente musste verbessert werden, da diese einen großen Anteil am Arbeitsprozess hatte.

Der Antrieb über diagonal verlaufende Seile funktionierte mit der verwendeten Kombination von Motor, Getriebe und Seilspule, verursachte jedoch höhere Kosten bei der Anschaffung der einzelnen Komponenten, da die Bauweise auf Grund der auftretenden Zugkräfte insgesamt robuster ausgeführt wurde.

Für die nächste Arbeitsphase, der Entwicklung von Prototyp P3, war neben der Weiterentwicklung der aktuell verwendeten Komponenten auch die Integration zusätzlicher Komponenten vorgesehen. Dazu wurde u.a. der Seilantrieb auf ein Horizontal/Vertikal-System umgestellt, welches von einem temporären oder dauerhaft installierten Schienensystem an der Fassade unterstützt wurde. Daher musste das System im nächsten Entwicklungsschritt um eine ausfahrbare Tool-Plattform (hydraulisch, pneumatisch oder mechanisch) erweitert werden. Durch die veränderte Seilführung konnte der Antrieb verkleinert und die Anzahl technischer Komponenten verringert werden.

Es hat sich als sinnvoll erwiesen, die Entwicklung der mobilen Basis vorgezogen zu bearbeiten, um Funktionswerkzeug “Sprüh-Druckkomponente” und mobile Basis in einem iterativen Entwicklungsprozess aufeinander abzustimmen.

Ebenso erwies sich die Entwicklung zweier Prototypen (Prototyp P1 und Prototyp P2) statt eines als sinnvoll, da so das Verfahrens-Know-How gesteigert und materialspezifische, maschinenbauliche und softwaretechnisch Fragen frühzeitig geklärt werden konnten.

Der Prototyp P2 wurde im Januar 2017 erstmals auf der BAU2017 - Weltleitmesse für Architektur, Material und Systeme am Stand der Forschungsinitiative Zukunft Bau präsentiert und getestet (Abb. 12).

Fragestellungen bezüglich der Verfahrensansätze und damit einhergehender Spezialisierung des Diagnose-/Funktionswerkzeugs in Zusammenspiel mit der mobilen Basis und Erweiterung der resultierenden Einsatzmöglichkeiten konnten präzisiert werden. Durch das zweistufige Entwicklungskonzept von Prototyp P1 zu Prototyp P2 wurden Problemstellungen schneller spezifiziert beziehungsweise weiter eingegrenzt und Lösungen und Strategien für das weitere Vorgehen zur Entwicklung des Prototypen P3 präzisiert.

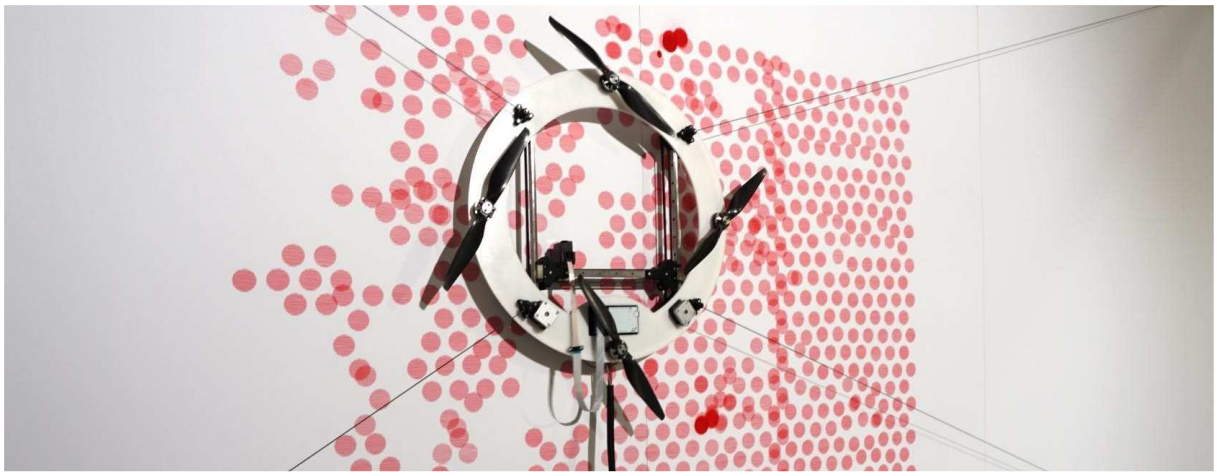

Abbildung 12 Plotbot/Crawler Prototyp P2, Ausstellung im Rahmen der BAU2017, Stand der Forschungsinitiative Zukunft BAU

4.6 Plotbot/Crawler Prototyp P3

4.6.1 Adaptive Zusammenführung der Hardwarekomponenten Pick and Place-Einheit mit Vakuumgreifer zur Zellenpositionierung, Werkzeug Plotbot/Crawler und mobile Basis zu prototypischer Maschine P3

Der Plotbot/Crawler Prototyp P2 wurde in der ersten Projektphase erfolgreich entwickelt und auf der Bau München 2017 am Stand der FIZB präsentiert. Planare vertikale Flächen ließen sich mit ihm gezielt im Sprühverfahren bearbeiten. In der Projektphase 2 wurde der Plotbot/Crawler Prototyp P2 weiterentwickelt, um Versprünge in der Fassade besser zu bewältigen und weitere Werkzeuge in die mobile Basis zu integrieren. Hierfür wurde das Antriebsverfahren für die mobile Basis überarbeitet und die Werkzeuge für den Plotbot/Crawler Prototyp P3 weiterentwickelt. Ziel war, die mobile Basis nicht mehr direkt an der Fassade zu führen und über Propeller auf Abstand zu der Bearbeitungsfläche zu halten, sondern den Plotbot/Crawler Prototyp P3 in einem Abstand von 40 cm zu der zu bearbeitenden Fassade zu führen, so dass an der Fassade befindliche Hindernisse, wie beispielsweise Fenstervorsprünge, Gesimse, Sonnenverschattungen und andere Anbauten direkt umfahren werden. Der Abstand zwischen mobiler Basis und Fassade wurde durch Stahlwinkel sichergestellt. Um die Distanz zwischen der mobilen Basis und der zu bearbeitenden Fläche zu überwinden und das Werkzeug an die Fassade zu führen wurde ein sogenannter Delta-Roboter entwickelt und als Werkzeug an der mobilen Basis installiert.

Das Prinzip des Delta-Roboters wurde von dem Schweizer Professor Reymond Clavel erstmals beschrieben und von Marc-Olivier Demaurex für den industriellen Einsatz weiterentwickelt.

Dieses Roboterprinzip besteht aus mindestens drei Armen, welche durch Universalgelenke mit der Basis verknüpft sind. Sie erinnern an den griechischen Buchstaben Delta, woher die Namensgebung kommt.

Die Arme der Kinematik des Delta-Roboters sind üblicherweise an einem senkrecht montierten Grundrahmen gelagert, in den auch die Antriebsmotoren der Arme sowie die Hardware-Steuerung integriert sind.

Ein Delta-Roboter besteht im Wesentlichen aus drei Armen (Aktoren). Jeder Arm besitzt einen Motor, einen starren Oberarm und daran anschließend zwei mit Kugelgelenken gelagerte und parallel geführten Unterarme (Elle und Speiche). Die drei Hauptarme sind jeweils in einem Winkel von 120° um den Mittelpunkt gedreht angebracht. Alle drei Unterarm-Paare laufen in einer weiteren, kleineren Plattform zusammen und sind dort ebenfalls mit Kugelgelenken verbunden. An dieser kleinen Plattform befindet sich das jeweilige Werkzeug. Die Achsen des Delta-Roboters bilden in ihrem Zusammenspiel eine geschlossene kinematische Kette. (Siehe Abb. 13)

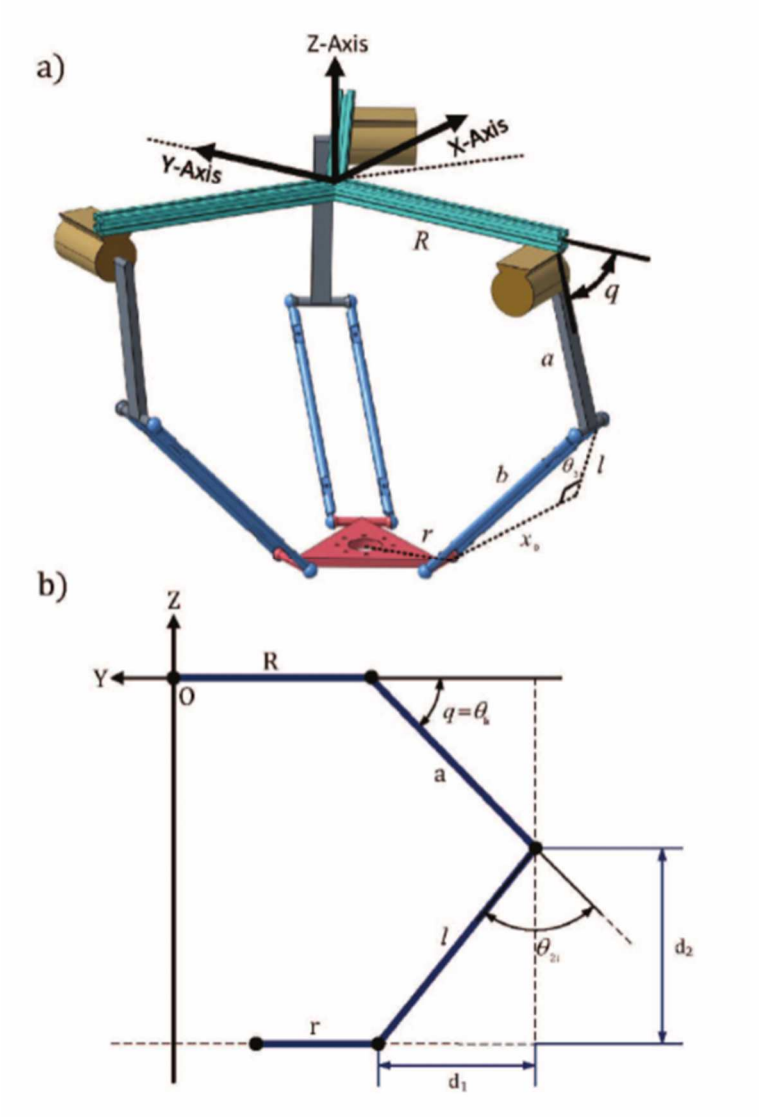

Abbildung 13 Kinematisches-System Deltaroboter mit X-, Y- und Z-Verfahrwegen

Der Delta-Roboter ist aufgrund der prinzipiell schlanken Konstruktion von geringem Gewicht, daher nutzt sowohl die Verpackungsindustrie als auch die medizinische und pharmazeutische Industrie den Delta-Roboter für Hochgeschwindigkeitsanwendungen. Der Delta-Roboter kann hochpräzise Montagearbeiten ausführen und kommt häufig als Konstruktionsprinzip für 3D-Drucker zum Einsatz. Durch die Präzision beim Greifen und Ablegen von Objekten wird er primär als sogenannter Pick and Place Roboter verwendet. In der Lebensmittelindustrie wird er zum präzisen Sortieren und Greifen loser Teile auf einem sich bewegenden Förderer eingesetzt.

Das auf die Horizontale ausgelegte Funktionsprinzip herkömmlicher Delta-Roboter wird für den Plotbot/Crawler Prototyp P3 auf die vertikale Arbeitsweise adaptiert und entwickelt. Hierfür wird der Delta-Roboter vertikal ausgerichtet an der mobilen Basis installiert.

Da die Motoren statt in den Gelenken an der mobilen Basis angebracht sind, können die Roboterarme nach dem Leichtbauprinzip gefertigt werden. Andere vertikal montierbare Systeme mit

X-, Y- und Z-Verfahrweg kamen für die Entwicklung des Plotbot/Crawler Prototyp P3 nicht in Frage, da kein vergleichbares System zum Delta-Roboter existiert, bei dem sich der Großteil der Masse fest montiert an einer planaren Basis befindet und die beweglichen Bauteile ein sehr geringes Gewicht aufweisen. Durch spezielle Einfräsungen in die mobile Basis konnten die Halterungen für die Motoren der Hauptarme montiert werden (siehe Abb. 14). Durch die Konzentration der Motorenmasse nahe dem Schwerpunkt der mobilen Basis bleibt diese während des Verfahrens an der Fassade winkelstabil, da kein Drehmoment entsteht.

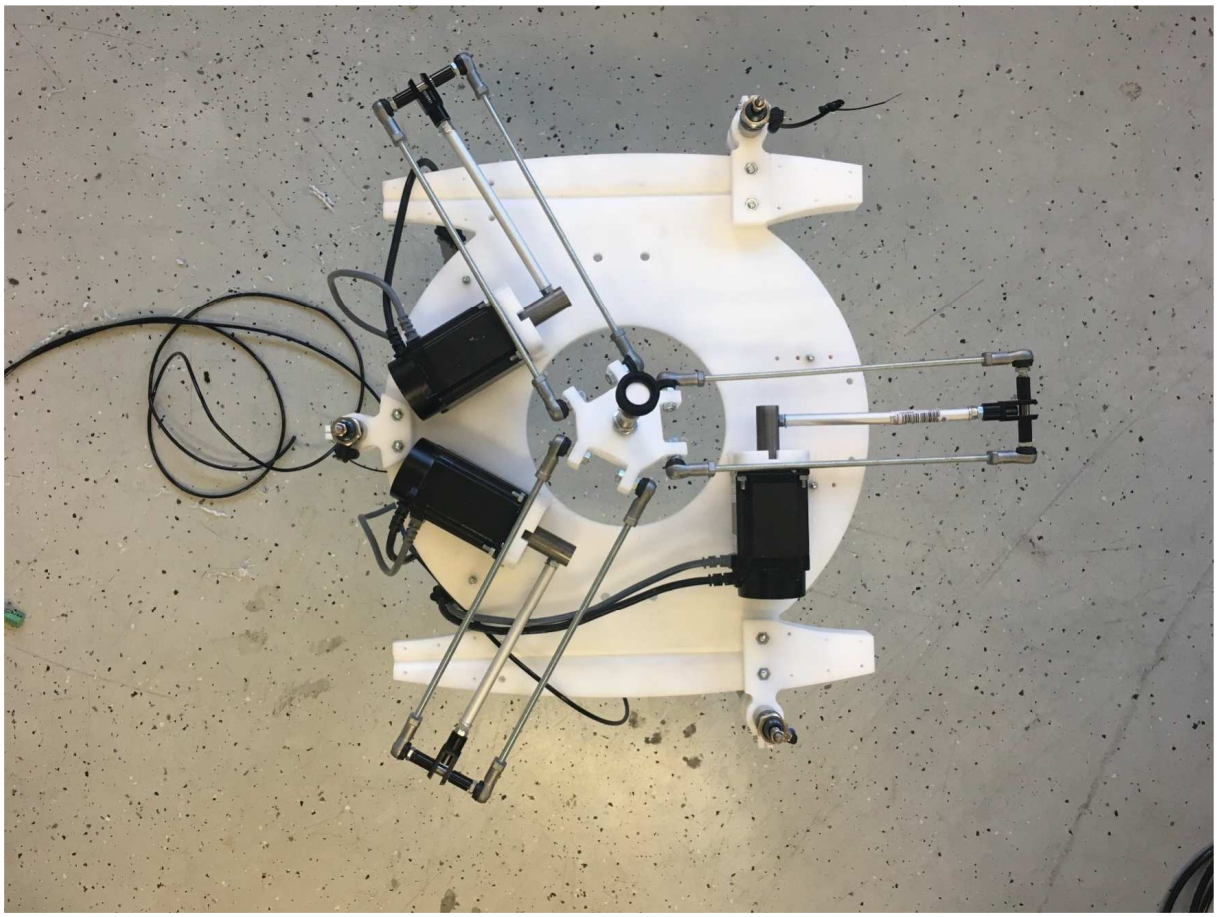

Abbildung 14 mobile Basis P3 mit montierten Eigenbau-Deltaroboter

Das geringe Gewicht der beweglichen Teile des Delta-Roboters bedingt eine geringe Trägheit und erlaubt hohe maximale Beschleunigungen, somit hohe erreichbare Geschwindigkeiten. Diese konnten in ersten Versuchsreihen nicht genutzt werden, da die Gewichtsverlagerung während des Betriebs des Delta-Roboters die mobile Basis in Schwingungen versetzte und diese nicht stabil vor der Fassade fixiert werden konnte. Durch Installation pneumatischer Rundzylinder (40 cm Hub), die an der mobilen Basis ausgefahren werden können, ließen sich die Schwingungen vermeiden. Ein stabiler Halt an der zu bearbeitende Stelle der Fassade konnte gewährleistet werden (siehe Abb. 15). Die drei pneumatischen Rundzylinder wurden zwischen den beweglichen Teilen des Delta-Roboters montiert, um nicht mit dessen Verfahrwegen zu kollidieren.

Die Feinpositioniereinheit mit Delta-Roboter konnte durch die maximal bewegliche mobile Basis in X- und Y-Richtung beliebig bewegt und positioniert werden. Die toleranzarme Bearbeitung großer Fassadenflächen wurde so möglich.

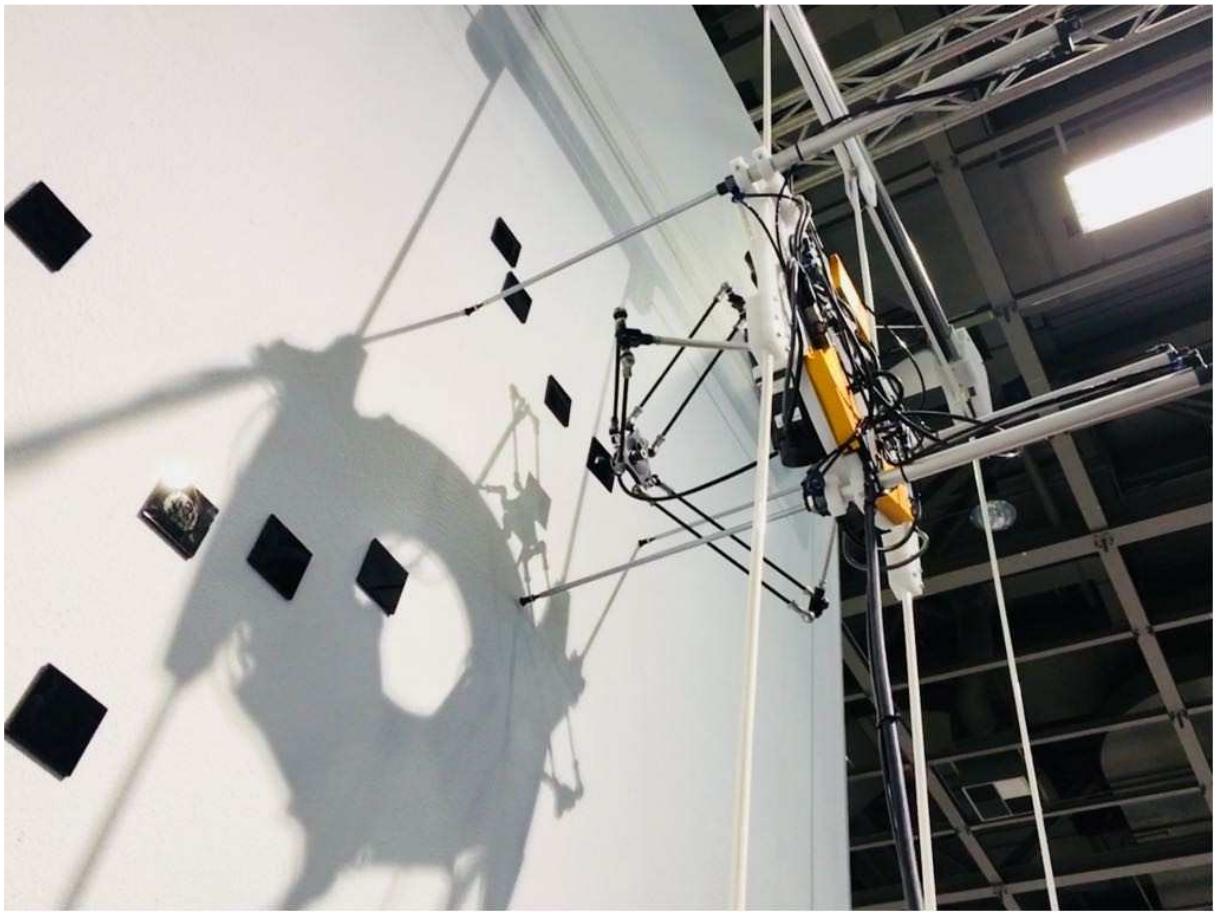

Abbildung 15 Plotbot/Crawler Prototyp P3: mobile Basis mit ausgefahrenem Stabilisierungszylindern – Delta-Roboter Pick and Place-Einheit

4.6.2 Finalisierung systematisiert-flexible Steuerung der Pick and Place Einheit (Tool 2)

Die Sprüh-Druckkomponente des letzten Prototyps konnte erfolgreich entwickelt werden. Für den Plotbot/Crawler Prototyp P3 wurde ein neues Werkzeug entwickelt, das neuartige Einsatzmöglichkeiten und Bearbeitungsweisen von Fassadenflächen ermöglicht, die Pick and Place Einheit.

Die Pick and Place Einheit soll es ermöglichen, Solarzellen zu detektieren, auszutauschen und so die Fassade automatisiert zu warten und instand zu halten. Für die Pick and Place Einheit des Plotbot/Crawler Prototyp P3 wurde folgendes Anforderungsprofil erstellt:

- Detektion von Solarzellen an der Fassade via optischer Mustererkennung
- Überprüfung der Funktionsfähigkeit eines Solarmoduls
- Entfernen von defekten Solarzellen
- Beschaffung einer neuen Solarzelle aus einem Magazin

- Bewegen der mobilen Basis mit einer Nutzlast (Solarzelle)
- Exaktes Positionieren und Einsetzen der Zelle mit einer Genauigkeit von <= 1 mm in die entsprechende Aussparung des speziell gefertigten Betonmoduls
- Überwinden der Distanz von mobiler Basis zur Fassade (40cm)

Um die mit einer glatten Oberfläche versehenen Solarzellen greifen zu können, wurde für die Pick and Place Einheit das Ansaug-Prinzip mittels Vakuums realisiert. Um Solarzellen bündig mit der Oberfläche in das Trägermodul einzusetzen, kam ein auf mechanischen Greifern basierendes Verfahren nicht in Betracht. Vorteile des Ansaugprinzips ist, dass der aus weichem Polyurethan bestehende Vakuumsauger Unebenheiten der Fassade oder Schrägstellungen des Werkzeugs ausgleichen kann, ohne Schaden am Plotbot/Crawler Prototyp P3 oder der Fassade zu verursachen (siehe Abb. 16:).

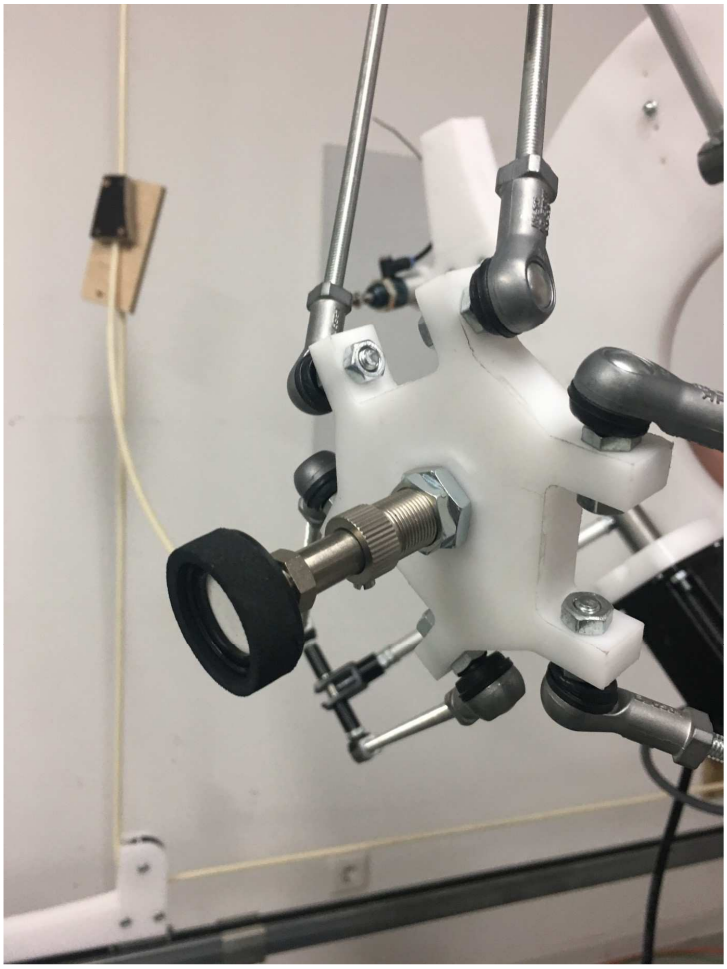

Abbildung 16 BAU KUNST ERFINDEN – Plotbot/Crawler Prototyp P3– Vakuum betriebener Sauger zum Greifen und anschließendem Platzieren von Zellen

Der Unterdruck für das Ansaugverfahren wird mithilfe einer Vakuumpumpe erzeugt. Wird der Ansaugmechanismus auf einer Solarzelle positioniert, sorgt der Unterdruck dafür, dass die Solarzelle

an dem Sauger haftet. Der von der Vakuumpumpe erzeugte Unterdruck wurde durch Magnetventile freigegeben und steuerte die Funktion des Saugmechanismus.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde die Vakuumpumpe durch einen Vakuum-Ejektor ersetzt, der aus dem Überdruck einer Druckluftversorgung das für den Sauger benötigte Vakuum erzeugen kann. Ejektoren sind eine Variante der Strahlpumpe und funktionieren nach dem Venturi-Prinzip. Bei Ejektoren wird Druckluft durch den Eingangsanschluss eingeleitet. Sie durchströmt die Venturi-Düse. Die Luft wird dabei beschleunigt und komprimiert. Nach Passieren der Düse entspannt sich die beschleunigte Luft und es entsteht ein Unterdruck. Auf diese Weise wird Luft durch den Vakuum-Anschluss angesaugt. Die angesaugte Luft und die Druckluft treten über den Schalldämpfer wieder aus.

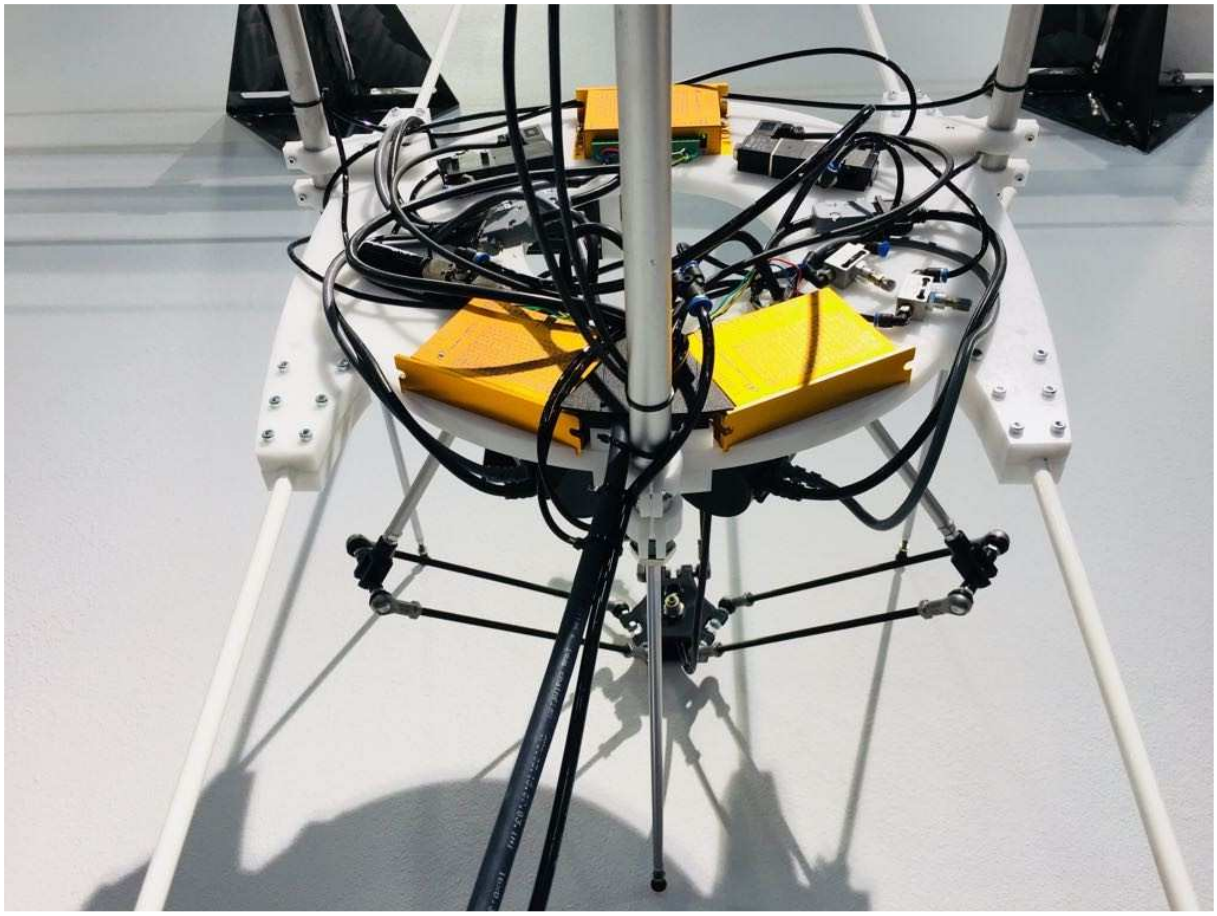

Abbildung 17 Der Plotbot/Crawler Prototyp P3 platziert eine Solarzelle auf der Fassade – BAUTEC 2018, Berlin

Der Plotbot/Crawler Prototyp P3 wurde hierfür mit einem Druckluftkompressor ausgestattet. Somit konnten sämtliche pneumatischen Vorgänge des Plotbot/Crawler Prototyp P3 mithilfe des Leiselaufkompressors (konstante 3,5 Bar Druck bei minimaler Geräuschbelastung) gesteuert werden. Dies umfasst den verbauten Vakuum-Ejektor und die drei Magnetventile, zuständig für das Ein- und Ausfahren der Pneumatikzylinder.

Der Vakuum-Ejektor, die Magnetventile, Regler für die Pneumatik-Zylinder und die Treiber der Schrittmotoren des Delta-Roboters wurden an der Sichtseite der mobilen Basis des Plotbot/Crawler Prototyp P3 montiert (siehe Abb. 17). Dadurch endeten bis auf die Stromkabel alle Pneumatikschläuche sowie die Datenkabel der Treiber zu den Motoren auf der mobilen Basis. So konnten die Leitungsstränge, die vom Schaltschrank zu den sich bewegenden Baugruppen verlaufen, auf ein Minimum reduziert werden. Die eigentliche Unterverteilung geschieht an der gut zu wartenden und einsehbaren Sichtseite der mobilen Basis.

4.6.3 Entwicklung Speicherprogrammierbare Steuerung und adaptive Kombination der Sensorik und Steuerungskomponenten mit den Hardwarekomponenten prototypische Maschine Plotbot/Crawler Prototyp P3

Der horizontale Arbeitsbereich des Delta-Roboters beträgt 350 mm im Durchmesser, der Hub beträgt 450 mm. Je nach Länge der Arme und Unterarme kann die Arbeitsfläche vergrößert oder verkleinert werden.

Die Umrechnung der Drehbewegung der Motoren in die kartesischen Arbeitskoordinaten erfolgt mittels der Winkelsätze der Trigonometrie für jeden einzelnen Motor in Abhängigkeit von der zuvor festgelegten Länge der Arme, der Position der Motoren so wie der Größe der Plattform. Sind die Werte einmal in der Software LinuxCNC mit den zugehörigen Formeln hinterlegt, kann der Delta-Roboter wie eine herkömmliche CNC-Maschine manuell oder über G-Code in drei Achsen bewegt bzw. gesteuert werden. Auf die ursprünglich projektierte Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) konnte durch diese Integration der Mathematik für die Kinematik in die schon vorhandene LinuxCNC-Steuerung verzichtet werden.

4.6.4 Konzeption/Entwicklung der parametrischen NC-Systematik der Verfahrwege für prototypische Maschine Plotbot/Crawler Prototyp P3

Zur automatischen Steuerung des Fassadenroboters wird ein Ablaufplan für die verschiedenen Funktionen benötigt, so dass die Abläufe für Bewegung, Vakuumsauger, Hydraulik und Positionierung in der richtigen Reihenfolge erfolgen können. Wie bisher wird dazu auf den sogenannten G-Code zurückgegriffen.

Über die in der 3D-CAD Software Rhinoceros integrierte Erweiterung Grasshopper wurde ein graphischer Algorithmus entwickelt, der in der Lage ist, auf Basis von zuvor importierten CAD-Daten (z.B. im dxf/dwg Format) die Position der einzelnen Solarzellen in Maschinenkoordinaten umzurechnen. (Siehe Abb. 18)

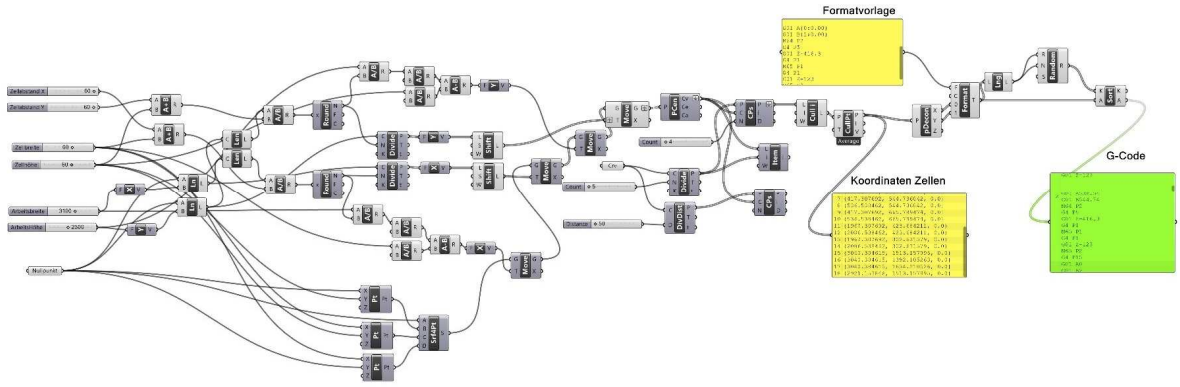

Abbildung 18 Graphischer Algorithmus in Grasshopper zur Konvertierung der CAD-Daten in Maschinenkoordinaten (G-Code)

4.6.5 Layouterstellung und Entwicklung der Bedienstelle (Hardware-Software-Interface) Plotbot/Crawler Prototyp P3

Die Bedienung des Plotbot/Crawler Prototyp P3 erfolgt über die CNC-Software LinuxCNC , die auf einem herkömmlichen PC installiert wird. Das individualisierte Bedienpanel verfügt über Schaltflächen zur direkten Ansteuerung der verschiedenen Funktionen und einer schematischen Darstellung des Arbeitsraums, die die geplanten Verfahrwege des Roboters darstellt. Über die einzelnen Bedienelemente können Subroutinen aufgerufen werden um Vakuumsauger, Pneumatikzylinder sowie sonstige Zusatzfunktionen, Grobpositionierung sowie den Delta-Roboter manuell steuern zu können.

Über weitere Schaltflächen können Geschwindigkeit und Beschleunigung eingestellt und die Bewegung der Plattform an der Wand manuell gesteuert werden.

4.6.6 Ausarbeitung und Entwicklung finales Maschinenlayout Plotbot/Crawler Prototyp P3

Für die Entwicklung des finalen Maschinenlayouts Plotbot/Crawler Prototyp P3 wurde entschieden das Seil-/Parallelroboter-System Plotbot/Crawler Prototypen P1 und P2 durch das Core xy-System zu ersetzen.

Die Plotbot/Crawler Prototypen P1 und P2 basierte auf einem System, das sich über Seile linear fortbewegt. Die über Seile eingespannte mobile Basis konnte über Motoren und Seilspulen äußerst präzise und mit hoher Geschwindigkeit vollautomatisch oder manuell im Raum bewegt werden. Der Vorteil dieses Antriebssystems ist die äußerst flexible Skalierung des Arbeitsraumes. Der Nachteil liegt in den quer durch den Arbeitsraum verlaufenden Seilen.

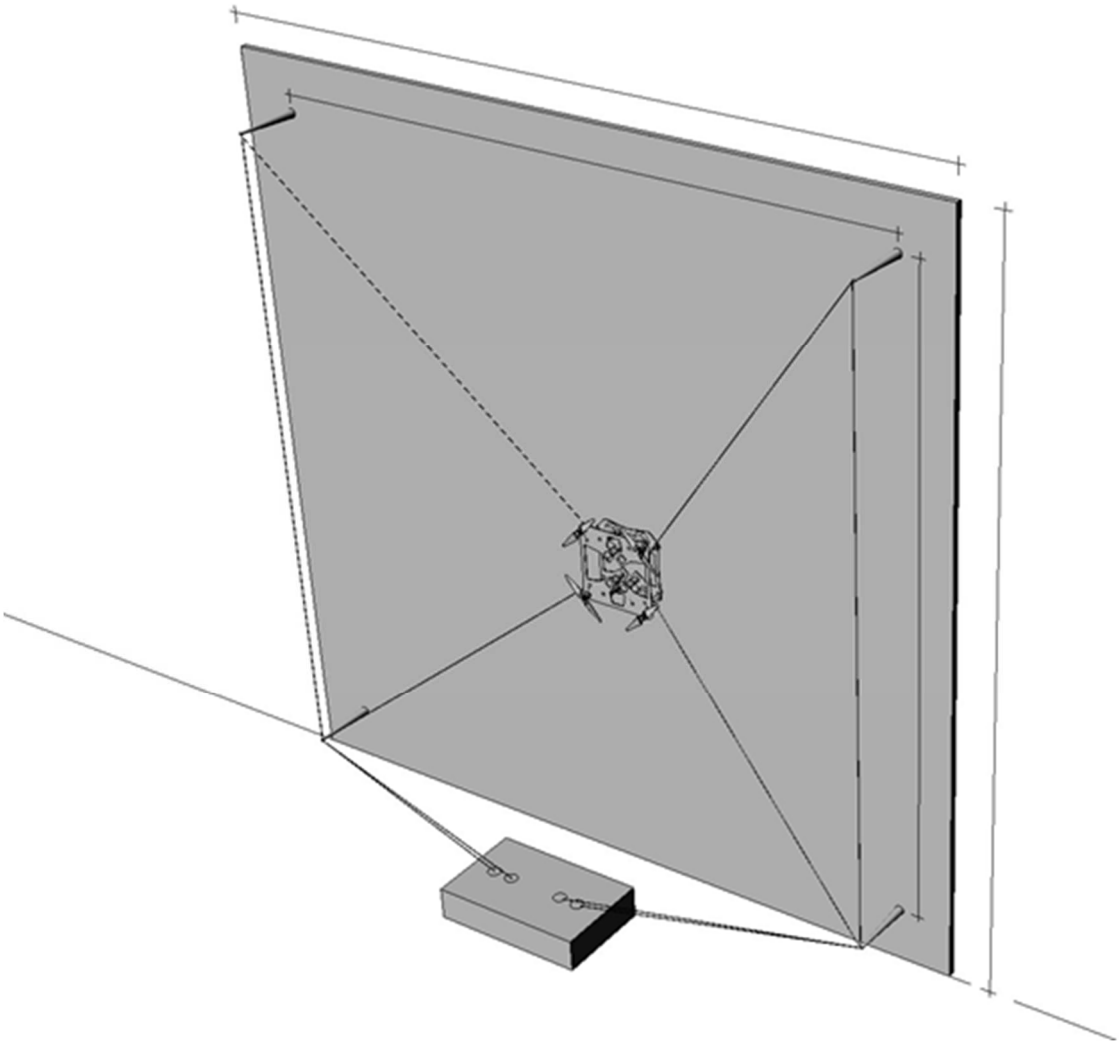

Abbildung 19 Grafik Seilsystem Plotbot/Crawler P2

Durch die diagonale Spannung der Seile zur mobilen Basis mit H-Bot traten schon bei kleinen Abweichungen der errechneten zur tatsächlichen Seildistanz hohe Kräfte auf, welche Verdrehungen der mobilen Basis und damit Ungenauigkeiten bei der Positionierung bewirkten.

Um die hohen Zugkräfte zu vermeiden wurde an Stelle das Seil-/Parallelroboter System des Plotbot/Crawler Prototyp P1-P2 für den Plotbot/Crawler Prototyp P3 das Core xy -System adaptiert.

Bei dem Core xy-System handelt es sich um ein orthogonales Riemensystem, das bedeutet, die diagonale Seilführung wird durch Umlenkrollen, Schienen und Schlitten ersetzt. Vgl. [2]
(Siehe Abb. 20, Beispiel eines Zeichentisches mit beweglicher Linearschiene)

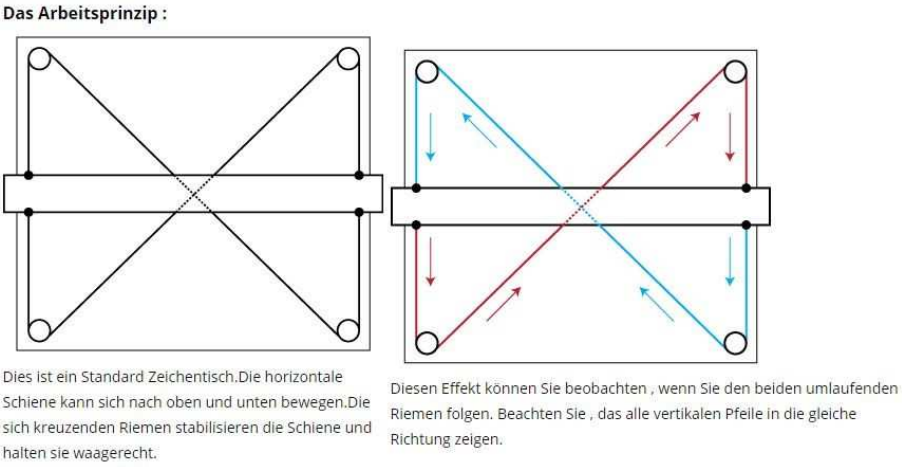

Abbildung 20 Systemskizze Core xy-System mit Umlenkrollen

Die horizontale Schiene lässt sich nach oben und unten verschieben. Der Effekt wird deutlich durch die umlaufenden Riemen, bei denen alle vertikalen Pfeile in die gleiche Richtung zeigen.

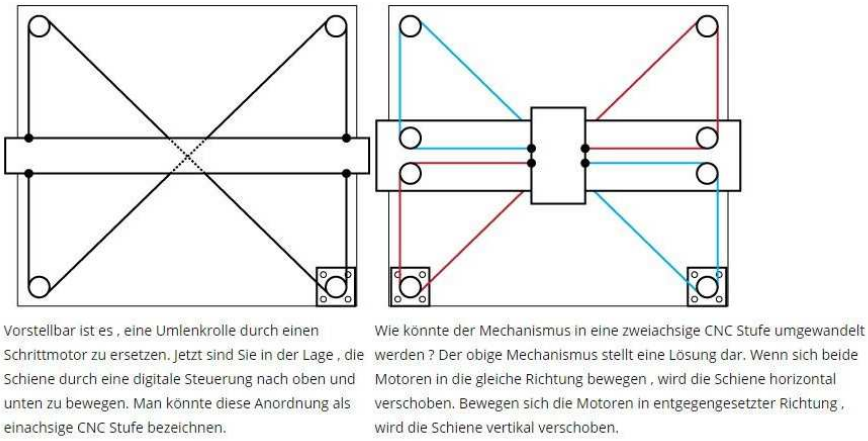

Abbildung 21 Core xy System mit Schrittmotoren

Durch Ersetzen einer Umlenkrolle durch einen Schrittmotor lässt sich die mobile Basis elektromotorisch nach oben und unten ansteuern. (Siehe Abb. 21 links) (einachsiges CNC System).

Durch Ersetzen der beiden unteren Umlenkrollen durch Schrittmotoren entsteht ein zweiachsiges CNC-System. Drehen beide Motoren in die gleiche Richtung, wird die Basis horizontal (auf der Y-Achse) verschoben. Drehen die Motoren in entgegengesetzte Richtungen, wird die mobile Basis vertikal verschoben. Durch die orthogonale Führung (Umlenkung, Antrieb) der Riemen ist eine optimale Positionierungsgenauigkeit in x und y-Achse gegeben. (Siehe Abb. 21 rechts)
Vgl. [3]

Um das System für den Plotbot/Crawler Prototyp P3 nutzen zu können, wurde das für die Horizontale konzipierte Antriebssystem (z.B. 3D-Drucker) auf den vertikalen Einsatzbereich adaptiert, und

gleichzeitig die in Abb. 21 erkennbare und störende diagonale Riemenführung quer durch den Arbeitsbereich vermieden. (Siehe Abb. 22)

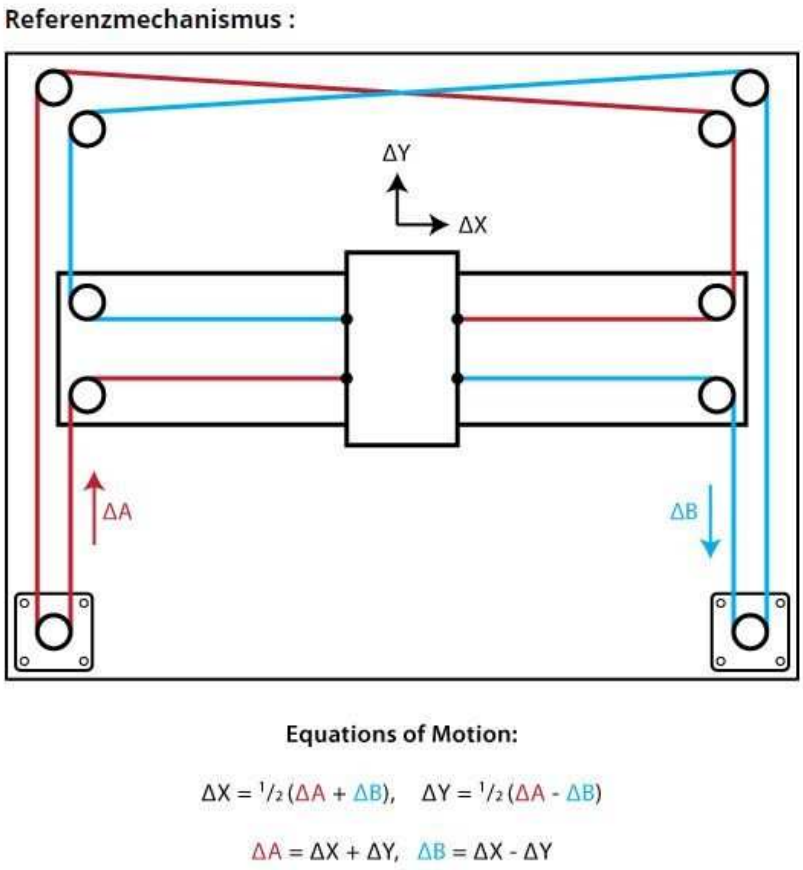

Abbildung 22 Core xy System mit Schrittmotoren, Kreuzung der Riemen aus dem Arbeitsbereich nach oben verschoben

4.6.7 Beginn der Bauphase der finalen Version Plotbot/Crawler Prototyp P3

Für den finalen Prototypen Plotbot/Crawler Prototyp P3 wurde das Core xy -System für den vertikalen Einsatz an der Fassade modifiziert, entwickelt und gebaut. Der Einsatz verschiedener Riemen, sowie Positionierungen der Umlenkrollen und der Motoren wurden in Versuchsreihen untersucht.

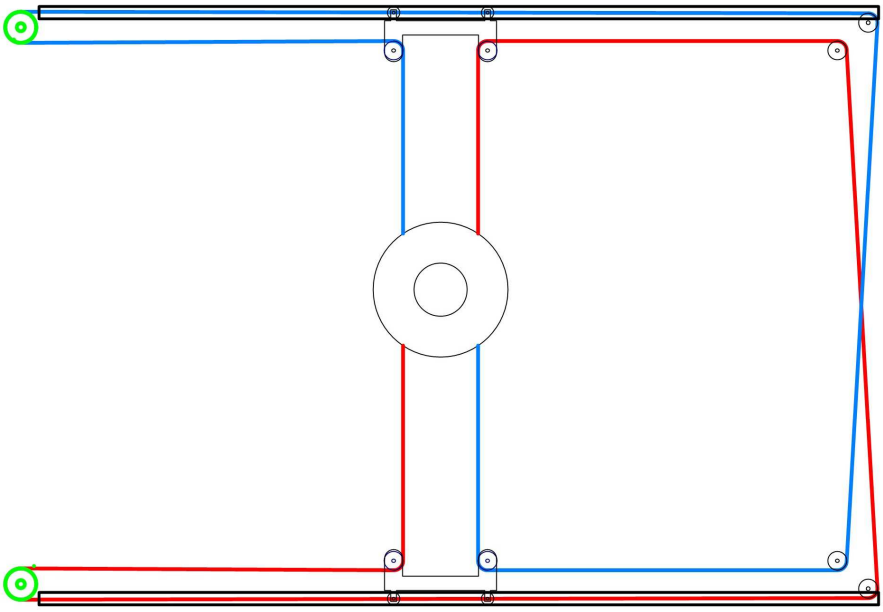

Abbildung 23 Systemskizze Riemenführung Plotbot/Crawler Prototyp P3 (Zahnriemen)

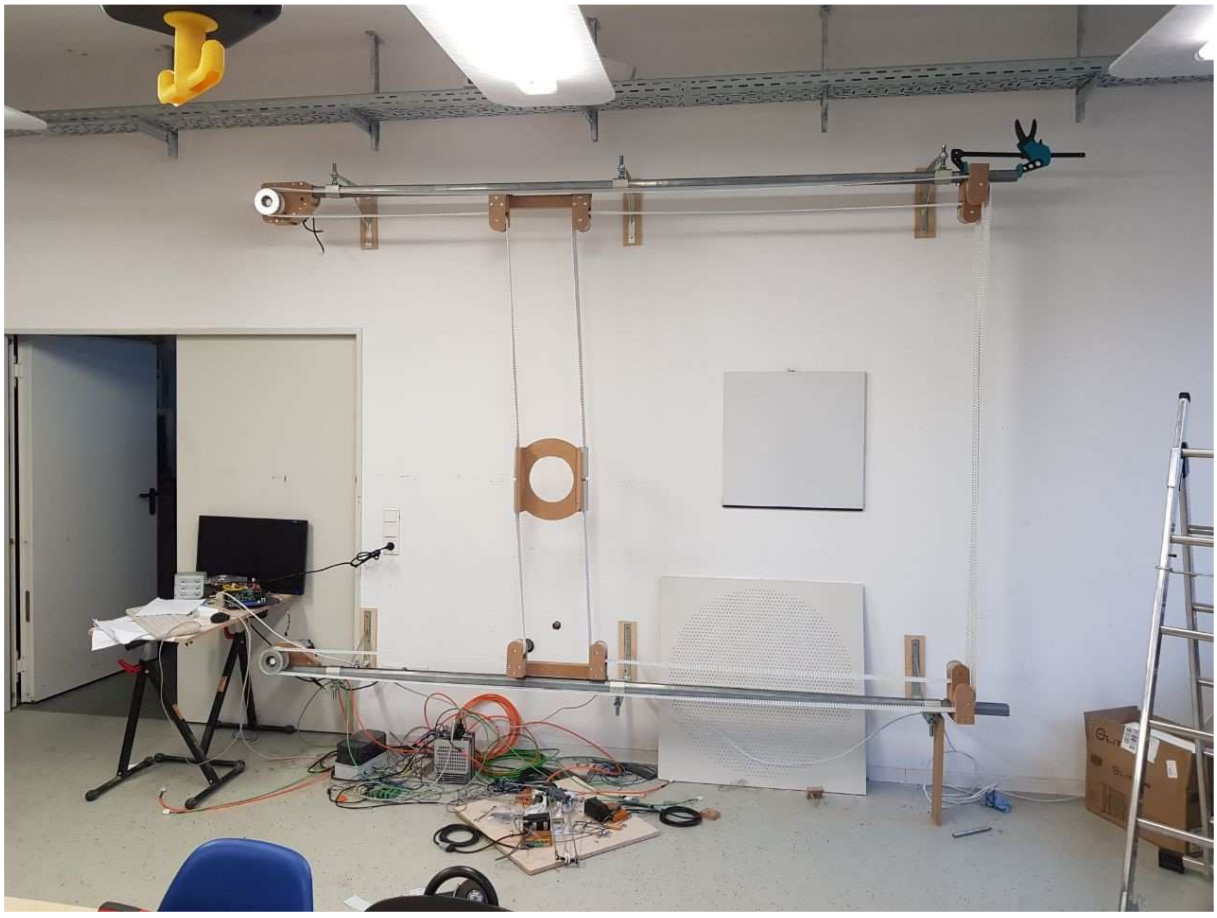

Abbildung 24 Plotbot/Crawler Prototyp P3 aus MDF mit Zahnriemen

Zunächst wurde das Antriebssystem mit zwei Zahnriemen (Zahnriemen 50mm breit mit T10-Profil und Glasfaserzugstrang, offene Enden, 25000mm Länge, weiß) prototypisch konstruiert. Die Bauteile

zur Positionierung und Montage der Motoren und Umlenkrollen wurden im 3D-Programm Rhinoceros entwickelt, konstruiert und für die CNC-Fräse programmiert, gefräst und anschließend montiert. (Abb. 23, 24)

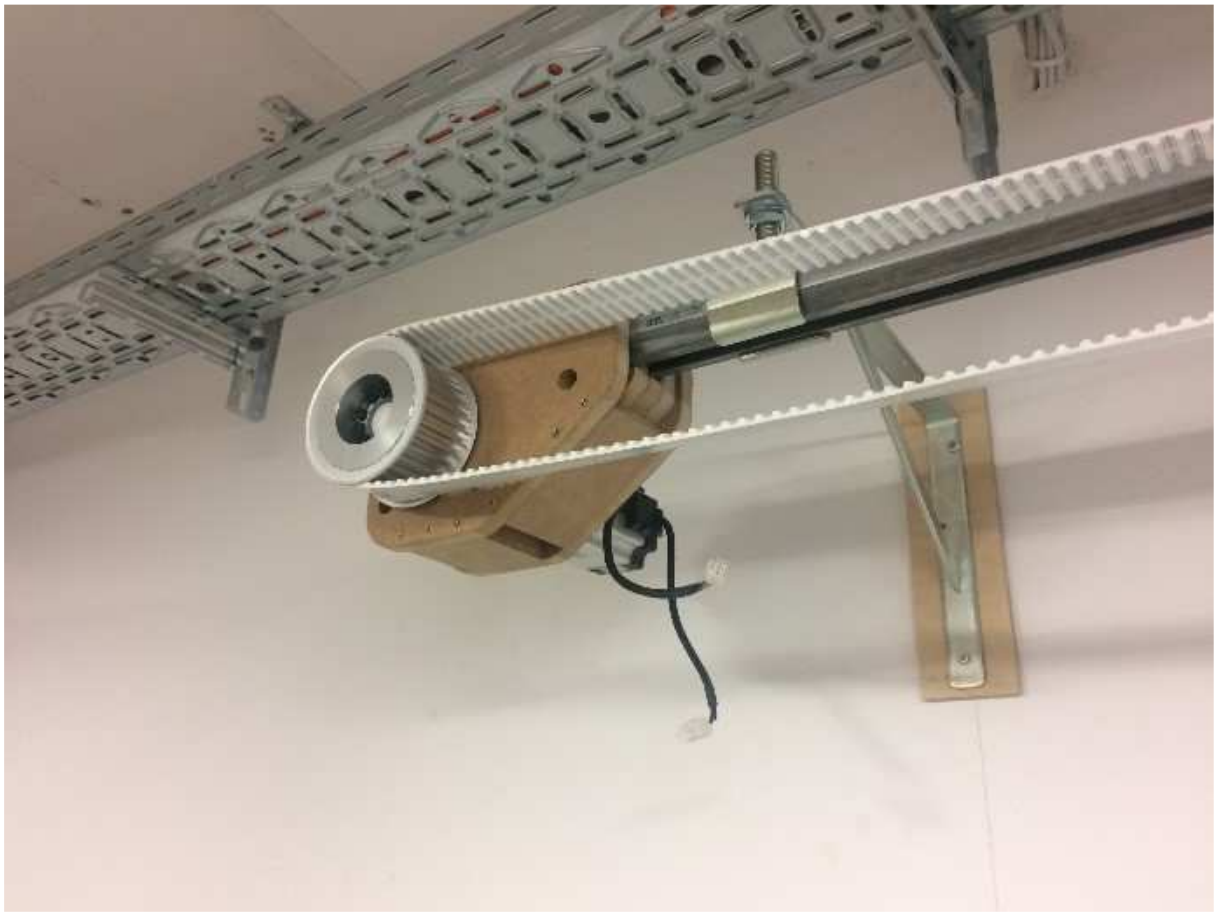

Abbildung 25 Antriebsbauteil Motor, Getriebe mit Welle für Zahnriemen aus MDF

Für das Arbeitsmodell wurden 15 mm starke mitteldichte Faserplatten (MDF) verwendet, um die einzelnen Bauteile prototypisch im Betrieb mit Motoren, Umlenkrollen und Zahnriemen zu testen.

Die Bauteile wurden so entwickelt und konstruiert, dass sie für die Montage einfach auf die beiden C-Profilschienen (C-Profilschiene 9040 – 4 Meter Länge) aufgebracht werden konnten.

Für die Montage am Einsatzort werden zuerst die obere und untere C-Profilschiene mit dem gewünschten Abstand zueinander mit Hilfe von speziellen Winkeln an der Wand installiert und die Umlenk-/Führungs-Rollen-Module bzw. Motoren – Module (Servoantrieb MINAS LIQI Nennleistung: 1000kW - MCDJT3220) und Getriebe (Sonderanfertigung der Firma Neugart aus Stuttgart, Planetengetriebe mit der Übersetzung 1:10 für die Servomotoren, Baugröße: PLE-40) anschließend auf die C-Profilschienen aufgesteckt.

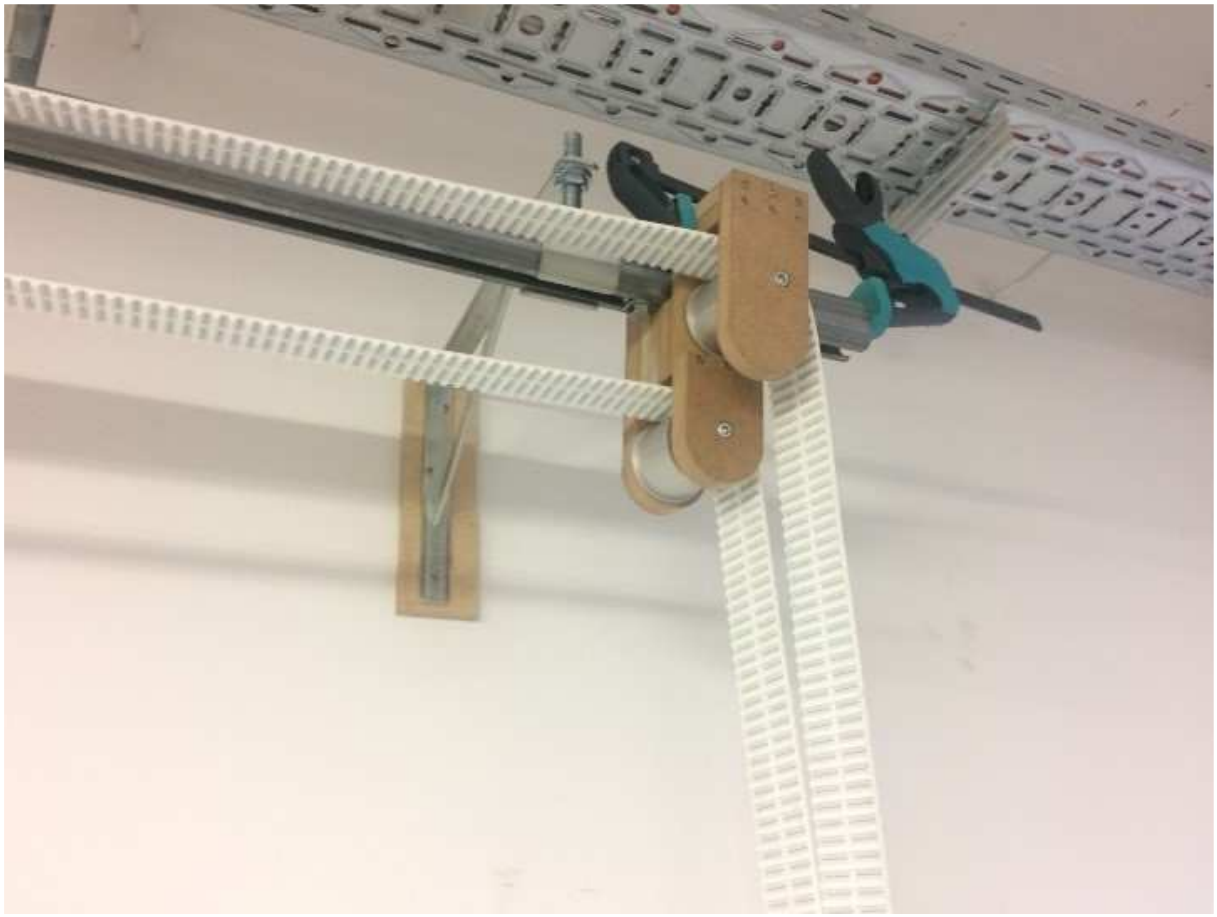

Abbildung 26 Umlenk/Führungs-Rollen-Modul für Riemen aus MDF

Auf der Ausgangsseiten der Getriebe wurden die antreibenden Zahnriemenscheiben montiert.
Auf beiden C-Profilschienen laufen Schlitten-Module (9245 S), welche mit Zahnriemenumlenkrollen bestückt sind. (Abb. 26)

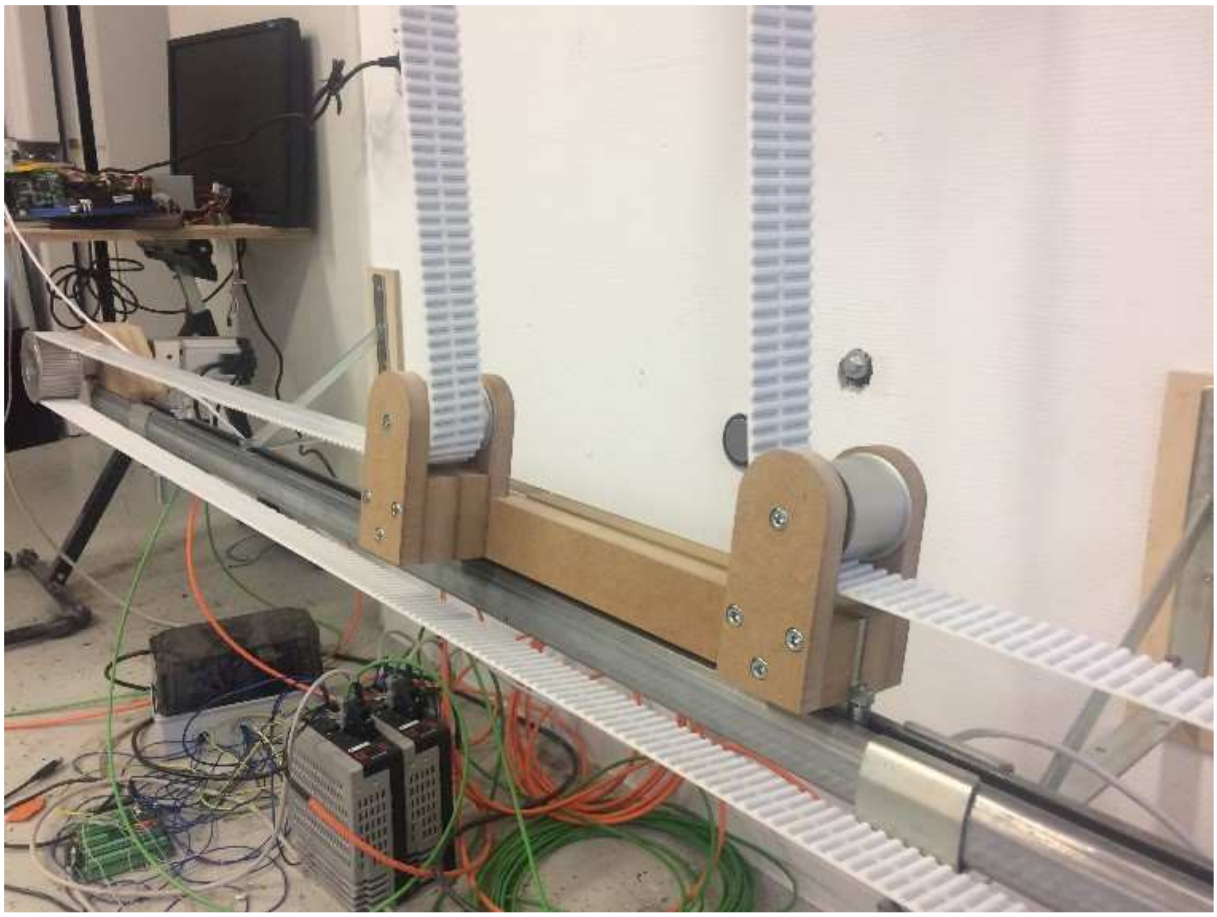

Abbildung 27 Schlittenmodul aus MDF für Zahnriemen

Da durch die Breite des Zahnriemens von 50 mm in der Z-Ebene des Systemaufbaus mehr Raum benötigt wurde, mussten die Umlenk- und Führungsrollen in der Tiefe versetzt werden. (Abb. 27)

In den ersten Versuchsreihen zeigte sich, dass sich die kreuzenden Riemen des Core-xy-Systems in der Z-Ebene an wichtigen Umlenkpunkten nicht reibungsfrei bewegen ließen. (vgl. Abb. 23). Durch die seitliche Verdrehung des Zahnriemens traten an den versetzt angebrachten Umlenk- und Führungsrollen erhöhte Lasten auf, die den Antrieb durch die Motoren erschwerten und auf lange Sicht die Lebensdauer des Riemens stark verkürzt hätten.

Aufgrund der benötigten Konstruktionstiefe und des erschwerten Antriebs durch den räumlichen Versatz wurde das Antriebssystem auf Rundriemen umkonstruiert und umgebaut.

4.6.8 Fertigstellung der parametrischen NC-Systematik der Verfahrwege für die finale Maschine Plotbot/Crawler Prototyp P3

Für die Bewegung des Fassadenroboters wurden zwei Motoren angesteuert, die über zwei Rundriemen eine geschlossene Bewegungskette bildeten. Daher war es notwendig, dass beide Motoren simultan angesteuert wurden und über eine eigene Kinematik verfügten.

Insgesamt besitzt die finale Maschine Plotbot/Crawler Prototyp P3 fünf Achsen (Motoren), wovon drei für den Delta-Roboter und zwei für die Bewegung an der Fassade verwendet werden. Die Kinematik der drei ersten Achsen für den Delta-Roboter wird um eine Kinematik für die beiden verbleibenden Achsen erweitert und in LinuxCNC eingepflegt.

Die Kinematik der zwei Achsen für die Bewegung an der Fassade sieht wie folgt aus:

X = (core_a + core_b)/2

Y = (core_a - core_b)/2

Zur Veranschaulichung ergeben sich daraus vier Grundbewegungen:

1. Roboter bewegt sich positiv in X-Richtung (parallel zum Boden) – Motor a und b drehen gleich positiv
2. Roboter bewegt sich negativ in X-Richtung (parallel zum Boden) – Motor a und b drehen gleich negativ
3. Roboter bewegt sich positiv in Y-Richtung (senkrecht zum Boden) – Motor a und b drehen sich gegenläufig (positiv, negativ)
4. Roboter bewegt sich negativ in Y-Richtung (senkrecht zum Boden) – Motor a und b drehen sich gegenläufig (negativ, positiv)

Die Software ist in der Lage, nicht nur lineare Bewegungen, sondern ebenso diagonale und kreisförmige Bewegungen zu berechnen, sodass jeder Punkt an der Fassade innerhalb der Begrenzung angefahren werden kann.

4.6.9 Bau und Fertigstellung verfahrenstechnische Maschinenentwicklung Plotbot/Crawler Prototyp P3

Die prototypische Maschinenentwicklung PLOBOT/CRAWLER P3 konnte erfolgreich auf der Messe Bautec 2018 in Berlin ausgestellt und getestet werden. Mit der entwickelten Pick and Place Einheit des Plotbot/Crawler Prototyp P3 konnten zuverlässig und mit einer gewährleisteten Wiederholgenauigkeit Solarzellen an einer Musterfassade detektiert und ausgetauscht werden. Als defekt markierte Zellen konnte der Plotbot/Crawler Prototyp P3 nach vorheriger Koordinateneingabe präzise von der Musterfassade entfernen und zum Magazin transportieren. Anhand von programmierten und parametrisch entworfenen Mustern von Zellenanordnungen konnte der Plotbot/Crawler Prototyp P3 die Zellen automatisiert an der Wand positionieren. Mithilfe der entwickelten manuellen Steuerung war es außerdem möglich, einzelne Zellen mit der Pick and Place Einheit zu entnehmen.

Diese Dauerversuchsreihen bildeten die Basis für die finale Maschinenentwicklung des Plotbot/Crawler Prototyp P3.

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den ersten Versuchsreihen konnte das Antriebssystem des Potbot/Crawler P3 erfolgreich von Zahnriemen auf Rundriemen umgerüstet werden. Das Resultat war ein geringerer räumlicher Versatz der Umlenk- und Führungsrollen, der vereinfachte Aufbau in der Z-Ebene, das reibungslose seitliche Kreuzen der Rundriemen, sowie konstruktiv bedingt leichtere Bauteile bei geringerem Materialverbrauch. Das System konnte erfolgreich auf Rundriemen aus Polyurethan (ohne Zugstrang, offene Enden, 25000 mm Länge, Durchmesser 10 mm) zu einem Omega-Antrieb umgerüstet werden. Der geometrische Aufbau des Antriebs wird wegen der Form seiner Umschlingung als Omega-Antrieb bezeichnet. (Siehe Abb. 28)

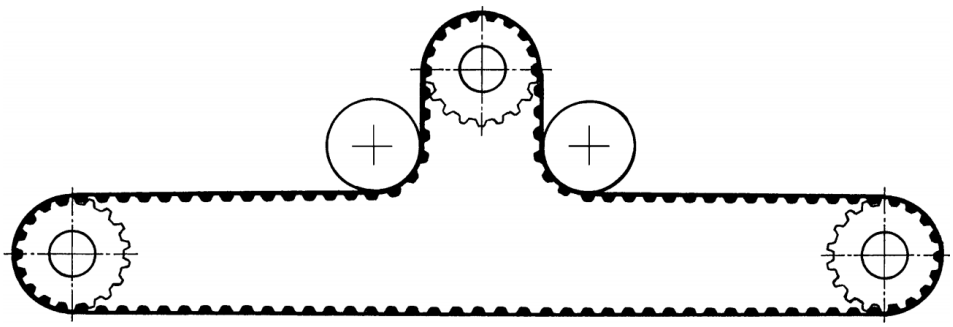

Abbildung 28 Der geometrische Aufbau des "Omega-Antriebes"

Die finale Maschinenentwicklung Plotbot/Crawler Prototyp P3 basiert auf einem Antrieb über Rundriemen. Der Arbeitsraum wird definiert durch die beiden horizontal angebrachten C-Profilschienen (Abb. 29), auf denen jeweils zwei dafür konstruierte Schlitten aus 15 mm starkem Polyoxymethylen laufen (Abb. 31). Antrieb, C-Profilschienen und Schlitten ermöglichen die präzise Bewegung und Positionierung der mobilen Basis im Core xy -System. Um die Schienen am Einsatzort zu positionieren, wurden spezielle Stahlwinkel entwickelt und konstruiert und aus 5 mm starkem Schwarzstahl CNC-gelasert und verschweißt. In die Schlitten wurden jeweils zwei Führungs- und Umlenkrollen und die Rollwagen, die sich in den Schienen bewegen, gemeinsam in ein Bauteil integriert (Abb. 32).

Bei der finalen Maschinenentwicklung des Plotbot/Crawler Prototyp P3 wurden die Antriebsmodule nach unten verlagert und an den Enden der unteren C-Profilschiene montiert. (Abb. 29, Antriebsmodule in grün) Durch die Positionierung der Antriebsmodule auf der unteren horizontalen C-Profilschiene konnte der Einbau und die Verschaltung der Hardware, sowie die Wartung des Plotbot/Crawler Prototyp P3 vereinfacht werden. Die Kreuzungsstelle der Rundriemen konnte durch die neue Positionierung der Antriebsmodule auf die Horizontale nach oben verlagert werden und stellt so keine Beeinträchtigung des Arbeitsraums dar.

Die Antriebsmodule und Antriebswellen wurden an die Rundriemen angepasst. Verschiedene Antriebswellen wurden getestet, unter anderem auch Riemenscheiben mit Trapeznut. Der niedrigste Schlupf bzw. die beste Kraftübertragung konnte bei Riemenscheiben mit großer Riemen-Kontaktfläche durch ein halbkreisförmiges Profil erreicht werden.

Um eine optimale Übertragung der Leistung des Motors auf den Rundriemen zu erreichen, wurden zwei Umlenkrollen dafür im Antriebsmodul so positioniert, dass eine optimale Reibung zwischen Antriebswelle und Riemen entsteht, man spricht hier von einem sogenannten “Omega” -Antrieb. Durch den “Omega” -Antrieb konnte der Schlupf minimiert werden, und der Motor kann so die maximale Leistung auf das System übertragen.

Um das System auf die Positionierungsgenauigkeit hin zu optimieren, wurden im Projektverlauf verschiedene Rundriemen getestet:

- Riemen aus Polyurethan ohne Zugstrang (offene Enden, 25000 mm Länge, Durchmesser 10 mm)
- Riemen aus Polyurethan mit Aramid-Zugstrang (offene Enden, 25000 mm Länge, Durchmesser 10 mm)
- Riemen aus Polyurethan mit Polyester-Zugstrang (offene Enden, 25000 mm Länge, Durchmesser 10 mm)

Aufgrund der geringsten Dehnung im Versuchsfeld wurde der Riemen aus Polyurethan mit Aramid-Zugstrang verwendet.

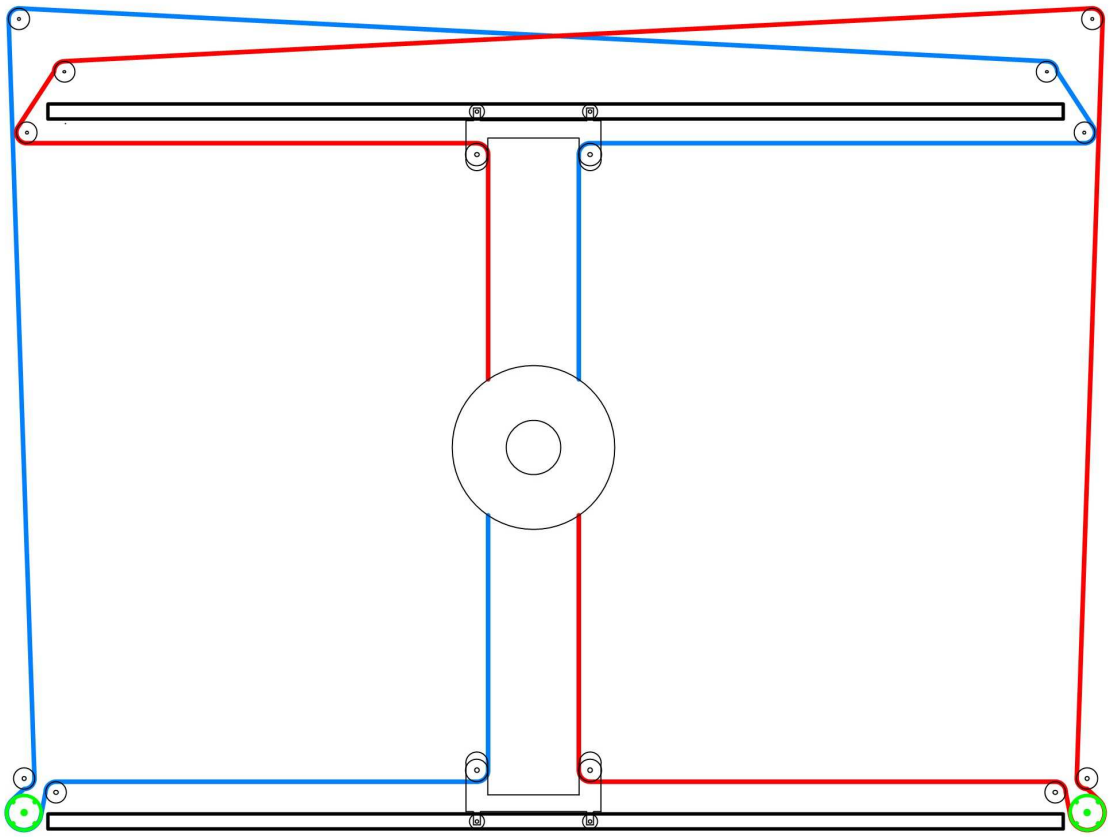

Abbildung 29 Systemskizze Plotbot/Crawler Prototyp 2 mit Rundriemen

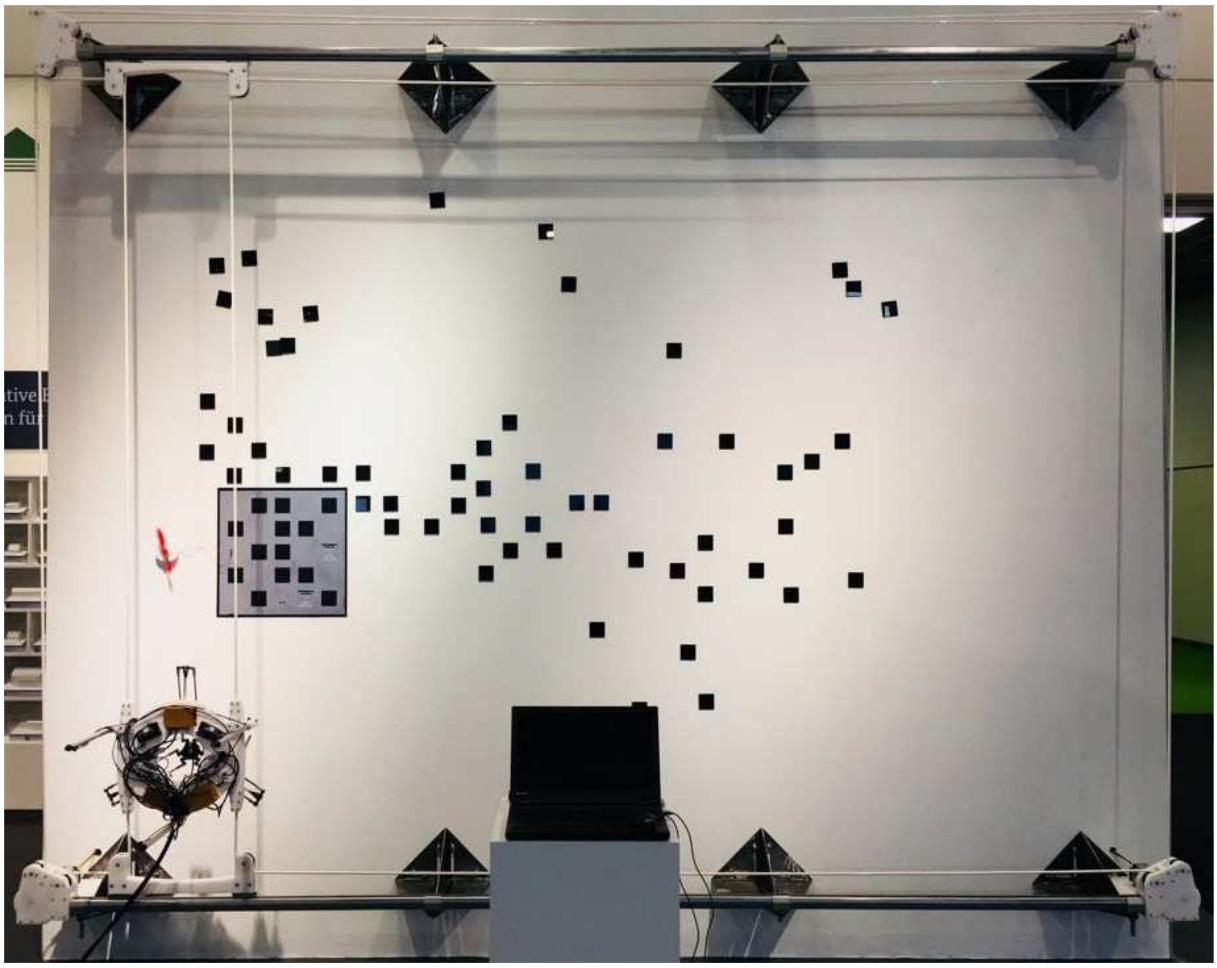

Abbildung 30 Prototyp Plotbot/Crawler Prototyp P2 mit Rundriemen auf der Bautec 2018

Abbildung 31 Schlitten- Bauteil für Rundriemen aus Polyoxylmethylen

Abbildung 32 Antrieb und Riemenumlenkung Rundriemen

4.6.10 Entwicklung Interfacestruktur und Bedienstelle (Hardware-Software-Interface) Plotbot/Crawler Prototyp P3

Die mobile Basis des Fassadenroboters ist über ein 14-adriges Datenkabel mit integrierter Stromführung mit dem Schaltschrank verbunden. Dieses Kabel versorgt die Schrittmotoren des Delta-Roboters mit Strom und sendet auf insgesamt zwölf einzelnen Leitungen die Steuersignale (Takt und Richtung) für die Ansteuerung der Motoren und der Pneumatikventile für den Vakuumgreifer (Tool 2) sowie für die ausfahrbaren Zylinder zur Positionionsstabilisierung.

Parallel zum Versorgungskabel verläuft ein 8mm Pneumatikschlauch, der an einem Leiselauf-Kompressor angeschlossen ist.

4.6.11 Definition zweier Ansteuerungsverfahren, Matrixerstellung:

4.6.11.1 Manuelle Steuerung Plotbot/Crawler Prototyp P3

Die manuelle Steuerung kann entweder über den Nummernblock der Tastatur oder per Maus durchgeführt werden. Bei Steuerung über die Tastatur erfolgt die horizontale Bewegung in der X-Achse über die Tasten „4“ und „6“, die vertikale Bewegung in der Y-Achse über die Tasten „8“ und

„2“ so wie die Hub-Bewegung des Delta-Roboters über die Tasten „7“ und „1“. Bei Bedienung mittels der Maus wird die jeweilige Achse ausgewählt und über die „+/-“-Symbole angesprochen. Ebenso ist es möglich über die „MDI“-Schaltfläche per Hand G-Code einzugeben.

4.6.11.2 Digitale Steuerung der Plotbot/Crawler Prototyp P3

Für den automatischen Ablauf eines Programmes muss dieses zuvor über das Menü „Datei“ -> „laden“ geöffnet werden. Im unteren Bereich der Oberfläche erscheint der geladene G-Code und kann Zeile für Zeile nachvollzogen werden. Das Programm wird über das dreieckige „Play“-Symbol gestartet und kann jederzeit pausiert oder unterbrochen werden.

Beispiel für einen verwendeten G-Code und der daraus resultierenden Abläufe: G-Code für die Aufnahme einer Zelle am Nullpunkt:

```
G01 A0          *mobile Basis auf X-Nullpunkt fahren*
G01 B0          *mobile Basis auf Y-Nullpunkt fahren*
G4 P5           *5 Sekunden pausieren*
G01 Z-216.3     *Delta-Roboter an die Wand ausfahren*
M64 P1          *Ventil 1 öffnen (Zelle ansaugen)*
G4 P1           *1 Sekunde pausieren*
G01 Z-123       *Delta-Roboter einfahren*
```

G-Code für die Position einer Zelle an entsprechender Koordinate:

```
G01 A3040.38    *Neue X-Position für Setzen der Zelle anfahren*
G01 B1392.11    *Neue Y-Position für Setzen der Zelle anfahren*
M64 P2          *Ventil 2 schalten (Pneumatikzylinder fahren aus)*
G4 P5           *5 Sekunden pausieren bis Zylinder*
                *ausgefahren sind*
G01 Z-416.3     *Delta-Roboter an die Wand ausfahren*
G4 P1           *1 Sekunden pausieren*
M65 P1          *Ventil 1 schließen (Vakuumtool ausschalten)*
G4 P1           *1 Sekunde pausieren*
G01 Z-123       *Delta-Roboter einfahren*
M65 P2          *Ventil 2 schalten (Pneumatikzylinder fahren ein)*
G4 P15          *15 Sekunden pausieren*
G01 A0          *mobile Basis auf X-Nullpunkt fahren*
G01 B0          *mobile Basis auf Y-Nullpunkt fahren*
                *Zyklus beginnt von vorne, neue Zelle*
```

kann wieder aufgenommen werden

4.6.12 Fehlerfreie Schnittstellenkommunikation Plotbot/Crawler Prototyp P3 <> Rechner, Tablet-PC

Die Kommunikation zwischen Steuer PC und Tablet wurde mit Hilfe eines in der Steuerung des Plotbot/Crawler Prototyp P3 integrierten Switches durch ein gesichertes kabelloses Netzwerk ermöglicht. Die Kommunikation lief auch unter schwierigen Bedingungen wie auf der Bautec 2018 problemlos.

4.6.13 Test Serienreife Maschinenentwicklung Plotbot/Crawler Prototyp P3

Das Gesamtsystem des Plotbot/Crawler Prototyp P3 wurde vor Ort montiert und erfolgreichen Funktionstest unter Betrachtung der Positioniergenauigkeit, Verfahrgeschwindigkeit, Schwingungsarmut, und Störungsfreiheit unterzogen.

4.6.14 Langzeiterprobung der Funktionsweise Plotbot/Crawler Prototyp P3 unter Realbedingungen und Auswertung der Testergebnisse

Nach dem Einsatz auf der Bautec 2018 wurde das System erneut an der Universität Kassel montiert und dort im Dauerbetrieb getestet. Die Auswertung der Testergebnisse ergab, dass die elektronische Steuerung zuverlässig arbeitet, es jedoch durch die Riemenkonstruktion zu driftenden Absolutwertkoordinaten durch Schlupf kam. Hierdurch lag die Präzision des Antriebssystems nur im Bereich von Zentimetern. Die Präzision der Positionierachsen der mobilen Basis lag im Bereich von Millimetern.

4.6.15 Fertigstellung Interface-Steuerung Plotbot/Crawler Prototyp P3

Die verwendete Steuersoftware LinuxCNC bietet die Möglichkeit das Interface frei zu konfigurieren. So konnte das Interface adaptiert und für den Plotbot/Crawler Prototyp P3 angepasst werden.

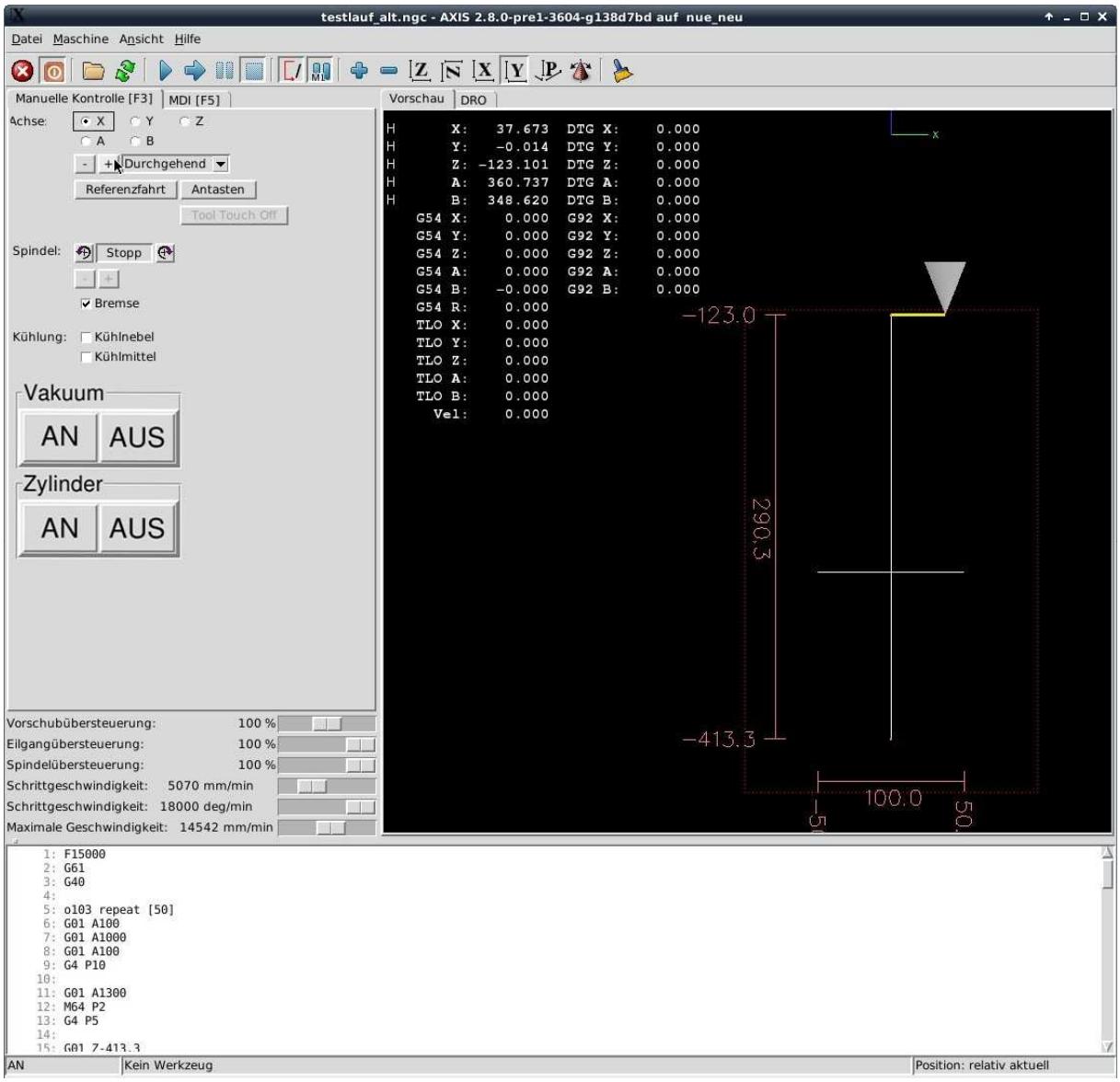

Abbildung 33 Interface LinuxCNC Axis mit zusätzlichen Software Buttons.

Das Webinterface für die gesamte Installation wurde, basierend auf der er speziell erweiterten Bedienoberfläche von LinuxCNC, durch Verwendung der Remote Access Software VNC realisiert.

4.7 Plotbot/Crawler Prototyp P4

4.7.1 Recherche zu Anforderungen hinsichtlich Präzision und Positioniergenauigkeit

Die Positioniergenauigkeit der letzten Ausbaustufe des Plotbot/Crawlers Prototyp P3 liegt für das Antriebssystem im Bereich von <= 50 mm und für das Positionierungssystems der mobilen Basis im im Bereich von <= 2 mm. Für den Auftrag und die Wartung von DysCrete -Zellen war die bisher erreichte Genauigkeit noch nicht ausreichend. Daher wurde recherchiert, wie die Präzision und Positioniergenauigkeit des Systems weiter gesteigert werden kann. Ergebnis der Recherche ist, dass eine Erhöhung der Präzision und Positioniergenauigkeit vor allem durch eine mechanische Optimierung des Antriebssystems zu erreichen ist. Schlupf im Antriebssystem ist zu minimieren, bzw. zu erkennen und über die Steuerung durch Nachregeln auszugleichen. Durch Aufdrucken von Passermarken, die durch ein Kamerasystem an der mobilen Basis bei der Wartung von DysCrete-Zellen wiedergefunden werden, kann die genaue Position bereits gedruckter Zellen durch die mobile Basis bestimmt und angefahren werden.

4.7.2 Planung und Durchführung Versuchsreihe zur Positioniergenauigkeit Antriebssystem (Parallelseilroboter, Core XY) und mobile Basis

Zur Messung der Positioniergenauigkeit des Antriebssystems wurde das Verfahren der Kreisformmessung nach ISO 230-4:2005 „Prüfregeln für Werkzeugmaschinen – Teil 4: Kreisformprüfungen für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen“ als Standardverfahren ermittelt.

In Versuchen, in denen die Achsen einzeln mit einer Messuhr auf ihre Widerholgenauigkeit getestet wurden, zeigte sich, dass die erreichte Wiederholgenauigkeit des Antriebssystems große und im dauerhaften Betrieb zunehmende Abweichungen aufwies. Durch diese Messungen wurde belegt, dass diese Antriebstopologie für den betrachteten Zweck nicht zielführend war, und auf die aufwendigen Tests entspr. ISO 230-4:2005 verzichtet werden konnte.
Ausgangspunkt für die Untersuchung der Präzision der mobilen Basis war die mobile Basis von Ausbaustufe Prototyp P2, da Prototyp P3 eine Pick and Place – Einheit besaß und nicht drucken konnte. Die mobile Basis wurde getrennt vom Antriebssystem vermessen. Um detaillierten Aufschluss über Positionsabweichungen der Feinpositionierung der mobilen Basis zu erhalten, wurden Prüfmuster auf Testplatten aufgebracht und auf Abweichung von der Sollform hin untersucht und ausgewertet.

4.7.3 Auswertung und Analyse Versuchsreihen zur Positioniergenauigkeit von Antriebssystem und mobiler Basis

Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass die Verwendung von Rundriemen ohne Verzahnung vor allem zu Abweichungen in der Wiederholgenauigkeit führen, weshalb ein Wechsel auf wiederholgenauere Zahnriemen für Plotbot-Crawler Prototyp P4 umgesetzt wurde.

Die Auswertung der Prüfmuster welche mit der mobilen Basis erzeugt wurden, zeigten sporadische Mängel in der Wiederholgenauigkeit welche auf Schrittverluste zurückgeführt werden konnten.

4.7.4 Planung und Durchführung Versuchsreihe zur Positioniergenauigkeit der Positionierungssysteme Deltabot, H-Bot und Knickarmroboter

Auch durch das Positioniersystem Deltabot wurden zunächst die Achsen einzeln mit einer Messuhr auf ihre Widerholgenauigkeit getestet, und anschließend Prüfmuster auf Testplatten aufgebracht und auf Abweichung von der Sollform hin untersucht und ausgewertet.

4.7.5 Auswertung und Analyse Versuchsreihen zur Positioniergenauigkeit der Positionierungssysteme Deltabot, H-Bot und Knickarmroboter sowie technische Dokumentation

Schon bei ersten qualitativen Versuchen zeigte sich, dass der Einfluss der Schwerkraft auf den waagerecht (statt wie sonst üblich senkrecht) montierten Deltabot zu signifikanten Abweichungen von der Sollform führten. Da der Deltabot bei zunehmender Auskragung der Arme ein immer größer werdendes Drehmoment in die mobile Basis einleitet, und diese an Rundriemen hängt, ist eine Absenkung der Arbeitsplattform an der Spitze des Deltabot unvermeidlich und kann nicht kompensiert werden. Die ergänzend montierten Pneumatikfüße verringerten diese Problematik, dennoch konnten keine für die DysCrete -Zellenbeschichtung notwendigen Genauigkeiten erreicht werden. Deshalb wurde auf weitere Messungen verzichtet.

Da der Knickarmroboter aufgrund seiner grundsätzlich massereicheren Konstruktion im Vergleich zum Deltabot ein noch größeres Moment in die mobile Basis einleitet, und damit die gravitationsbedingten Abweichungen noch größer sind, wurde auf eine Untersuchung dieser Antriebstopologie verzichtet.

Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass die H-Bot Konstruktion für das Anwendungsfeld DysCrete Auftrag am geeignetsten ist, weil diese sehr geringe Abweichungen in Z Richtung aufweist und die Freiheitsgrade des H-Bot den Schichtauftrag mit allen hiermit verbundenen Anforderungen erlauben. Der H-Bot ist im Anwendungsfeld des Plotbot/Crawlers dem Knickarmroboter und Deltabot vorzuziehen.

4.7.6 Planung und Erstellung des Anforderungsprofils/Zielkatalogs Plotbot/Crawler Prototyp P4

4.7.6.1 Anforderungsprofil im Hinblick auf Positioniergenauigkeit und Mobilität an der Fassade in der X, Y, Z-Achse (Versprünge, Oberflächenbeschaffenheit, Umwelteinflüsse)

Anforderungsprofil:

Feinpositionierung

- Größtes Einzelmuster in mehreren horizontalen Durchläufen 200 mm x 200 mm
- Maximale Verfahrgeschwindigkeit 3 m/min
- Positioniergenauigkeit in X/Y <= 0,1 mm (innerhalb des Einzelmusters)
- Minimale Wiederholgenauigkeit 0,05mm
- Stabilisierung gegen Schwingungen im Druckbetrieb: Füße oder Vakuum

Grobpositionierung

- Maximale Verfahrgeschwindigkeit: 3 m/min
- Positioniergenauigkeit <= 5 mm
- Minimale Wiederholgenauigkeit 5 mm

4.7.6.2 Anforderungsprofil im Hinblick auf den Einsatzbereich Detektion und Wartung

Anforderungsprofil:

- Ansteuerung von gedruckten Passermarken mittels optischer Erkennung
- Erkennung defekter Zellen
- Wartung durch Austausch der modularen mobilen Basis

4.7.7 Recherche zu Anforderungen hinsichtlich der Optimierung der Größe des Arbeitsbereichs

Die Recherche ergab, dass eine Lösung anzustreben ist, die unproblematisch an jede planare Fassade in ihrer Ausbreitung angepasst werden kann. Der Arbeitsbereich des Prototypen P1 und P2 ist durch die Seilführung wesentlich kleiner als beim Prototyp P3, da in den Randbereichen zur Vermeidung von zu unzulässig hohen Seillasten ein breiter Bereich nicht angefahren werden kann.

4.7.8 Recherche zu Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Handhabung

Die Konstruktion des Plotbot/Crawlers wurde gemäß Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 (und folgender Änderungen) über Maschinen ausgelegt.

Die vor Inverkehrbringen eines Serienproduktes nötige Konformität mit den CE Regularien wurde grundsätzlich berücksichtigt und angewandt.

In der Durchführung der Gefährdungsbeurteilung wurde die z.B. im Arbeitsschutz übliche iterative Vorgehensweise angewandt:

1. Zustand *vor* Einleitung von Maßnahmen (Beurteilung des Ausgangsrisikos) ->
2. Nötigenfalls Einleitung von *technisch/konstruktiven Maßnahmen* (und folgende Beurteilung des verbleibenden Restrisikos)
3. Nötigenfalls Einleitung von *Schutzmaßnahmen* (und folgende Beurteilung des verbleibenden Restrisikos)
4. Nötigenfalls Einleitung weiterer Maßnahmen.

Die Gefährdungsbeurteilung im Projekt Plotbot/Crawler kann in die Bereiche

- elektrische Gefährdung
- chemische Gefährdung
- mechanische Gefährdung

aufgegliedert werden.

4.7.8.1 Elektrische Gefährdung

Eine elektrische Gefährdung (Gefahr gefährlicher Körperströme) wird zuverlässig durch zwei Schutzmaßnahmen ausgeschlossen.

- Alle dem Benutzer zugänglichen Maschinenteile werden durchgängig mit Sicherheitskleinspannung (SELV = Safety Extra Low Voltage) versorgt. Dies schließt gefährliche Körperströme bei direkter oder indirekter Berührung stromführender Teile sicher aus.
- Darüber hinaus wird die gesamte, dem Benutzer zugängliche und der Witterung ausgesetzte Installation in der Schutzklasse IP65 ausgeführt. Dies schließt sowohl einen Schutz gegen Berührung, einen Schutz gegen Fremdkörper als auch einen Schutz gegen Wasser ein. Der Schutz gegen Berührung ist bei der angewandten Schutzklasse IP65 vollständig, da keine Berührung stromführender Teile mit Fingern, auch nicht mit Werkzeugen oder Drähten, möglich ist.

4.7.8.2 Chemische Gefährdung

Die bei der Konstruktion angewandten mechanischen Komponenten (Feststoffe wie Aluminium, Maschinenstahl, Edelstahl, etc.) weisen kein Gefährdungspotential in chemischer Hinsicht auf. Die verwendete Tinte zur Bedruckung muss hingegen gesondert betrachtet werden. Im Prototypen P4 wird zur Demonstration eine Tinte zum Druck auf Papier verwendet, für die das Sicherheitsdatenblatt des Herstellers die Angeben Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 [CLP] Augenreizung (Kategorie 2) (Eye Irrit. 2), H319 enthält.

Im Betrieb der Maschine ist keine Gefährdung gegeben, weil die Tintenmenge im µl-Volumenbereich sowie der geringe Abstand zum Druckmedium von <= 4 mm diese ausschließt. Beim Wechsel der Kartuschen durch Fachpersonal ist Persönliche Schutzausrüstung in Form von Augenschutz und Handschuhen zu tragen.

4.7.8.3 Mechanische Gefährdung

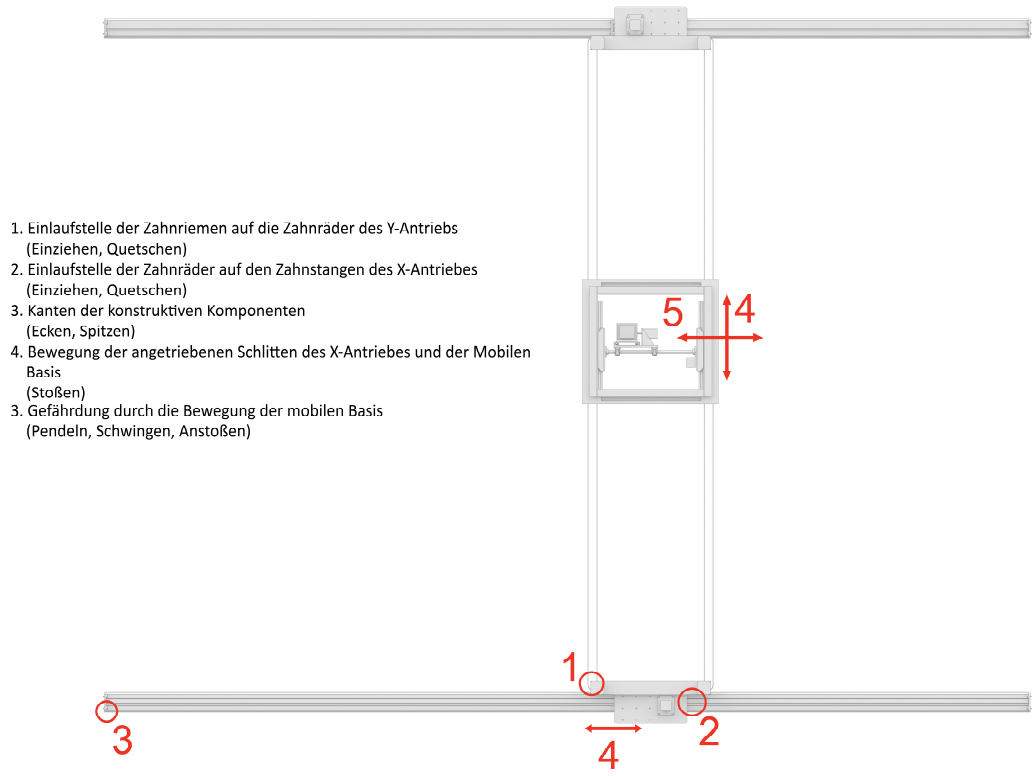

Abbildung 34 mechanische Gefahrstellen

Der Zustand vor Einleitung von Maßnahmen am Plotbot/Crawler weist aufgrund der Wirkungsweise und grundsätzlichen Konstruktion der Maschine die folgenden Gefährdungsbereiche auf:

- Gefährdungen durch ungeschützt bewegte Teile, z. B. Schneiden, Stechen, Fangen, Einziehen, Stoßen, Abscheren, Quetschen
- Teile mit gefährlicher Oberfläche, z. B. Ecken, Kanten, Spitzen, Klingen, raue Teile
- Gefährdungen durch unkontrolliert bewegte Teile, z. B. Pendeln, Schwingen, Rollen, Rutschen, herausgeschleuderte Teile oder Lasten
- Gefährdungen durch bewegliche Transportmittel oder Arbeitseinrichtungen, z. B. Anstoßen, Überfahren, Kippen

Im ersten iterativen Schritt der Gefährdungsbeurteilung und der schrittweisen Sicherung der Maschine wurden nach der Betrachtung des Zustandes vor Einleitung von Maßnahmen technisch/konstruktive Maßnahmen eingeplant, die das Anfangsrisiko auf ein Restrisiko reduzieren.

Im zweiten iterativen Schritt wurden technisch/konstruktive Maßnahmen zur Verringerung der Gefährdung ergriffen. Dies sind Abdeckbleche über den Einlaufstellen der Zahnriemen auf die Zahnräder, und eine Begrenzung der maximalen Verfahrgeschwindigkeit auf 3 m/min, so dass sich das Restrisiko nach dem zweiten Iterationsschritt nun in einem Bereich bewegt, in dem grobe Fahrlässigkeit bzw. Vorsatz notwendig ist, um in einen gefährlichen Bereich zu gelangen und zu greifen, z.B. durch anstellen einer Leiter.

Das verbleibende Restrisiko kann durch Einleitung zweier zusätzlicher Schutzmaßnahmen noch weiter verringert werden:

- Anbringung eines horizontal detektierenden Lichtvorhangs unter der Maschine.
- Anbringung von flächig ausgedehnten Sensoren an den verbleibenden Gefährdungsstellen (Eintritt der Zahnstangen / Zahnriemen in die Umhausung)

Beide Sensorsysteme führen zu einer unmittelbaren Abschaltung und dem Stillstand der Maschine. Der bis zum Stillstand der Maschine zurück gelegte Weg ist bei der max. Verfahrgeschwindigkeit von 3 m/min und der eingestellten Bremsverzögerung von -5 m/s² mit 0,25mm so klein, dass kein Verletzungsrisiko mehr besteht.

4.7.8.4 Handhabung

Zur Handhabung der Maschine wurden vier Betriebssituationen identifiziert: Einrichtbetrieb, Automatischer Betrieb, Wartung, Umrüstung.

Im Einrichtbetrieb können manuell vor dem ersten Druck Passermarken auf der Wand gesetzt werden, um die genaue Vermessung der Nullposition zu ermöglichen. Die mobile Basis verfährt dabei im Schleichgang und manuell gesteuert (Einrichtbetrieb), und erkennt damit die markierte

Nullposition und speichert diese. Alternativ kann von Hand eine beliebige Position als Nullposition angefahren und gespeichert werden.

Im Automatikbetrieb fährt die mobile Basis die programmierten Positionen ohne Benutzerinteraktion ab.

Im Wartungsmodus fährt die mobile Basis auf eine Position, die vom Boden aus gut erreichbar ist. In diesem Modus erfolgen die typischen Arbeitsgänge: Nachfüllen von Suspensionen, Reinigen, Schmieren, Austausch von Verschleißteilen.

Zur Umrüstung fährt die mobile Basis ebenfalls auf eine Position, die vom Boden aus gut erreichbar ist. In diesem Modus kann der gesamte Innenteil der mobilen Basis herausgenommen und gewechselt werden: Druckköpfe, Ansteuerung, Kamera, sowie die gesamte Mechanik der Feinpositionierung. An der Wand verbleibt Rahmen mit den Befestigungen der Zahnriemen.

4.7.9 Planung und Durchführung sowie Auswertung und Analyse Versuchsreihe zu Sicherheit und Handhabung Antriebssystem, Mobile Basis, Positionierungssystem

Die nach den geltenden Normen und anerkannten Regeln der Technik durchgeführte Gefährdungsbeurteilung ersetzt die Versuchsreihe und zugehörige Auswertung und Analyse zu Sicherheit und Handhabung in vollem Umfang.

4.7.10 Recherche zu Anforderungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und Witterungseinflüsse

4.7.10.1 Witterungseinflüsse

Die Konstruktion des Plotbot/Crawlers Prototyp P4 wurde nach gültigen Normen auf Korrosionsbeständigkeit für Betrieb im Außeneinsatz ausgelegt. Komponenten wurden entsprechend projektiert, um einen durchgängigen Betrieb im Freien aufgrund der zugesicherten Eigenschaften zu erlauben.

Die elektrischen Komponenten wurden gemäß Schutzklasse IP65 ausgelegt, so dass die Verwendung von Kabeln, Steckern, Gehäusen einen durchgängigen Betrieb im Freien aufgrund der zugesicherten Eigenschaften erlauben.

4.7.10.2 Dauerhaftigkeit

Es wird zwischen wartbaren Teilen (Verschleißteilen) und nicht wartbaren Teilen unterschieden.

Nicht wartbare Teile wurden einer Gesamt-Lebensdauerabschätzung unterzogen. Diese betrifft vor allem die Dauerhaftigkeit der Lager, Zahnräder, Zahnstangen und Zahnriemen bei einer regelmäßigen Beanspruchung, welche von der Anzahl der geplanten Beschichtungs/Bedruckungsvorgängen pro Tag abhängt.

Höher beanspruchte oder aus Kostengründen einfacher konstruierte Komponenten, wie z.B. die Gleitlager der mobilen Basis wurden so ausgelegt, dass sie bei einem jährlichen Wartungszyklus durch Austausch einem dauerhaften Betrieb standhalten. Bei diesen Wartungen werden auch alle Nicht-Verschleißteile gereinigt und geschmiert.

4.7.11 Planung und Durchführung sowie Auswertung und Analyse Versuchsreihe zu Dauerhaftigkeit und Witterungseinflüssen

Versuche zur Dauerhaftigkeit wie der HAST Highly Accelerated Stress Test, bei dem in der Klimakammer Temperatur- und Feuchtezyklen durchfahren werden, sowie Ermüdungs- und Verschleißtests, in denen Bewegungszyklen in Echtzeit in hoher Zyklenzahl durchfahren werden, sind nur bei selbst konstruierten und gefertigten Teilen notwendig. Beim Einsatz von Industriekomponenten mit zugesicherten Eigenschaften kann die Lebensdauer vorausgesagt und gesteuert werden, und ersetzt damit eigene Versuchsreihen vollumfänglich.

4.7.12 Erstellung Lastenheftes auf Basis der Auswertung der Versuchsreihen und des Anforderungsprofils

Die Ergebnisse der Recherchephasen wurden in einem Lastenheft zusammengeführt.

Druckeinheit

- Größe (maximale Höhe) des Druckbildes in einem Durchgang 1/2“ = 12,7 mm
- Erforderliche Druckauflösung maximal 100 dpi
- Minimaler und maximaler Abstand Wand - Druckkopf, wenn Feinpositionierung aktiv: Minimal 0,5 mm, maximal 4 mm.
- Zulässiges Gewicht komplette Druckeinheit mit Treiber und Tintentank: 10 kg

Feinpositionierung

- Abmaße des größten Einzeldruckbildes in mehreren horizontalen Durchläufen 200 mm x200 mm
- Maximale Verfahrgeschwindigkeit 3 m/min
- Maximaler Positioniertoleranz 0,1 mm
- Minimale Wiederholgenauigkeit 0,05mm
- Stabilisierung gegen Schwingungen im Druckbetrieb: Notwendig

Grobpositionierung

- Maximale Verfahrgeschwindigkeit: 3 m/min
- Maximale Positioniertoleranz 5 mm
- Minimale Wiederholgenauigkeit 5 mm

Maschinensteuerung

- Software: Linux CNC
- Ansteuerung Druckeinheit: via Python Plugin von LinuxCNC

4.7.13 Auswahl des Antriebssystems, das am besten geeignet ist, das Lastenheft zu erfüllen

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Positioniergenauigkeit des Core XY Systems sind Dehnung und der Schlupf der Rundriemen. Deshalb wurde das Antriebssystems so weiterentwickelt, dass kürzere Riemenlängen ohne Überkreuzung der Riemen zum Einsatz kommen. Durch die überkreuzungsfreie Konstruktion können Zahnriemen statt Rundriemen eingesetzt werden. Gegenüber den in der Vorgängervariante verwendeten Rundriemen hat der Zahnriemen folgende Vorteile:

- höhere Steifigkeit parallel zum Riemenprofil,
- kein Schlupf
- hohe Wiederholgenauigkeit

Um die Riemenlänge zu verkürzen und in der horizontalen X-Achse eine hohe Steifigkeit und hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen, wurden beide Torschienenführungen der Core XY Variante gegen Linearführungen mit Zahnstangenantrieb ausgetauscht. Vorteilhaft ist, dass der Zahnstangenantrieb auch bei großen Verfahrwegen sehr steif und wiederholgenau ist.

4.7.14 Planung und Entwicklung des Befestigungs- und Antriebssystems sowie Optimierung und Konstruktion der baulichen Einzelkomponenten Antriebssystem Plotbot/Crawler Prototyp P4

4.7.14.1 Planung, Entwicklung und Optimierung sowie Konstruktion der Montagevorrichtung Gebäudehülle

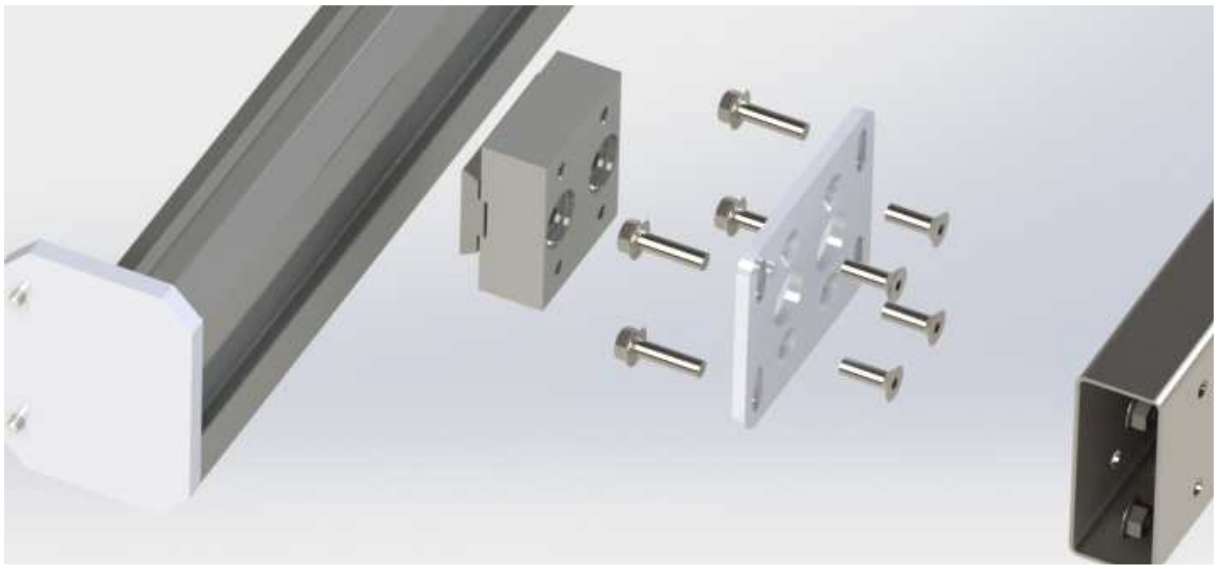

Abbildung 35 Detail Montagevorrichtung

Bei der Weiterentwicklung der Montagevorrichtung wurde der Fokus darauf gelegt, dass die Justage der Führungen auch bei großen Fassaden genug Spielraum bietet, um die nach DIN 18202 „Toleranzen im Hochbau - Bauwerke“ zulässigen Toleranzen ausgleichen zu können. Die Montagevorrichtung wurde so entwickelt, dass eine selbsttragende anreihbare Linearschiene die Basis bildet, aufgesetzt auf ein Vierkant-Edelstahlhohlprofil. Vorteil ist der geringe konstruktive Eingriff in die Architektur, da die so verstärkte Linearschienenkonstruktion nur alle 5 m punktuell an der Fassade befestigt werden muss. So wird eine vereinfachte Montage gewährleistet.

4.7.14.2 Planung, Entwicklung und Optimierung und Konstruktion der mechanischen sowie elektronischen Komponenten des Antriebssystems

Das Antriebssystem wurden durch eine eigenstabile, anreihbare Führung so weiterentwickelt, dass die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit, Skalierbarkeit, Montage erfüllt werden. Siehe Abb. 36

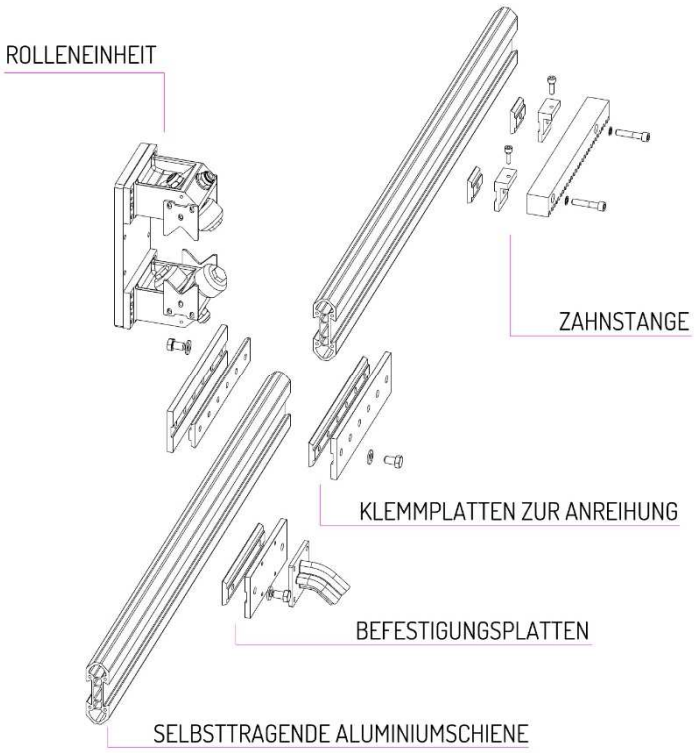

Abbildung 36 relevante Systemelemente Rollon Speedyrail 120

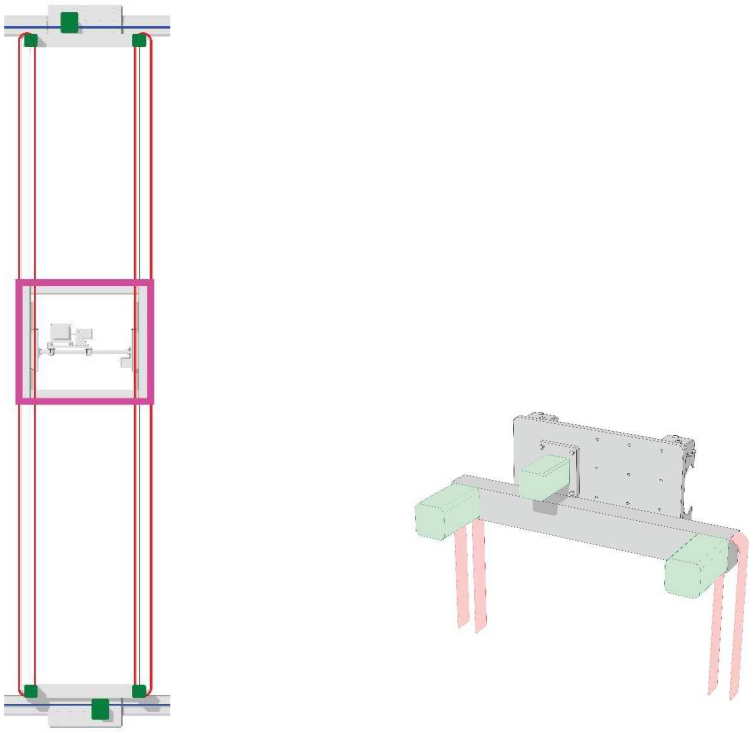

Abbildung 37 System Riemenantrieb Y und X

Da für den Einsatz an der Fassade die Skalierbarkeit in vertikaler Richtung sowie das Gesamtgewicht des Plotbot/Crawlers Prototyp P4 entscheidend sind, wurde für die vertikale Positionierung eine skalierbare und im Vergleich zu biegesteifen Linearachsen sehr leichte Riemenkonstruktion entwickelt. Siehe Abb. 37. Sie besteht aus zwei Servomotoren Typ Panasonic Minas Liqi MSMD102J1S, die über ein Planetengetriebe Typ Neugart 100256214 den Zahnriemen antreiben.

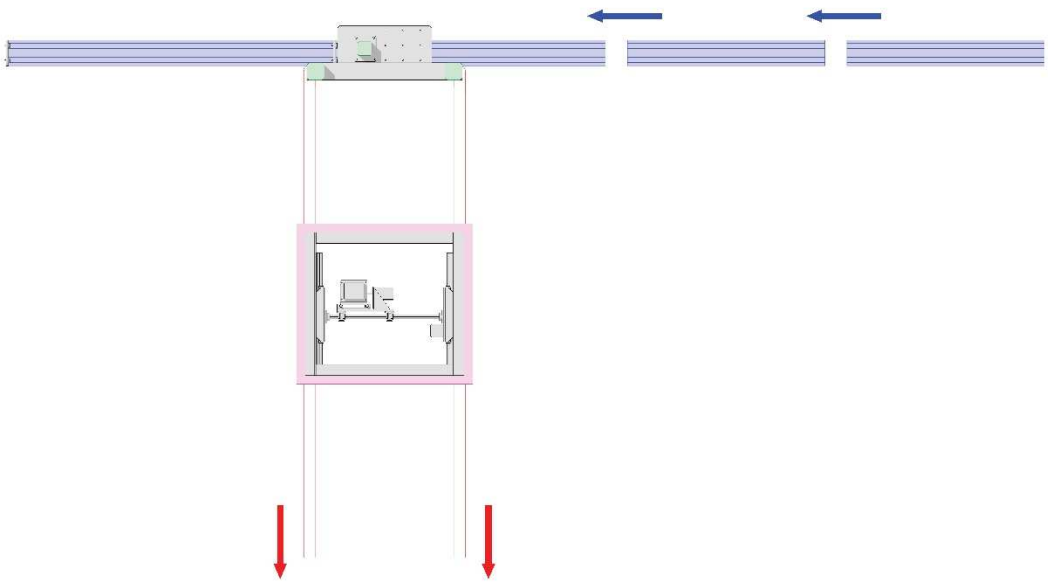

Abbildung 38 Systembild Skalierbarkeit Plotbot/Crawler

Durch die Verwendung beliebig lang konfektionierbarer Zahnriemen auf der Y-Achse und der anreihbaren Linearschienen auf der X-Achse wurde die Möglichkeit geschaffen, den Arbeitsraum des Plotbot/Crawler Prototyp P4 jeweils an die unterschiedlichen architektonischen Gegebenheiten anzupassen. Siehe Abb. 38

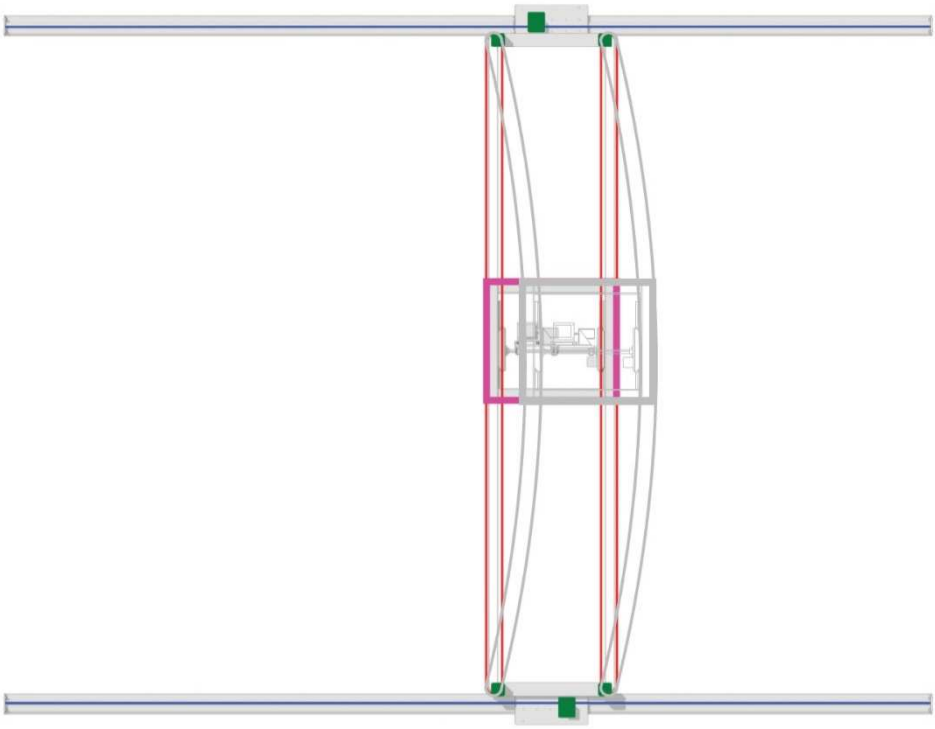

Abbildung 39 Systembild Schwingung in X Richtung

Abbildung 40 Zahnstangenantrieb in X-Richtung

Im Vergleich zu biegesteifen Konstruktionen ist bei dieser Konstruktionsart eine höhere Neigung zum Aufschwingen in X-Richtung gegeben, die sich ohne regelungstechnische Kompensation nachteilig auswirken würde. Siehe Abb. 39

Lösungsansätze sind:

4.7.14.2.1 Bedämpfung über elektrischen Antrieb mit PID Regler

Durch den Einsatz eines Servoreglers, welcher über Encoderposition und Motorstromaufnahme Schwingungen erkennt und im Betrieb mit einem „proportional integral differential“ (PID)-Regler kann der Motor aktiv bedämpft werden. Bei diesem Regelungsansatz ist die Sollgröße die Geschwindigkeit bzw. als deren Integral die Position des Antriebs. Diese Regler implementieren kein Modell der Regelstrecke. Mit diesem Verfahren kann bei einem Stopp des hier betrachteten X-Antriebes dieser zu einem sofortigen Halt gebracht werden, ohne ein Nachlaufen, selbst wenn die mobile Basis nachschwingt.

Da die Schwingungen vor allem bei Positionierfahrten erwartet werden, kann dem Servoregler ein großer Regelspielraum eingeräumt werden. Es wird davon ausgegangen, dass so eine effektive Bedämpfung der Schwingungen zur Verringerung des Einflusses auf den Schichtauftrag erreicht werden kann.

4.7.14.2.2 Modellbasierte Regelung

Bei modellbasierten oder prädiktiven Regelungen werden zuerst die Parameter des Gesamtsystems in einer Trainingsphase ermittelt. Im vorliegenden Fall sind dies die Massenträgheitsmomente von mobiler Basis, Zahnriemen und aller beweglichen Teile, alle Federkonstanten der elastischen Komponenten und alle Werte für Schlupf und Spiel. Mit den nun bekannten Systemparametern kann ein hinreichendes physikalisches Modell des Gesamtsystems aufgebaut werden. Eine modellbasierte Regelung nutzt die dann bekannten Systemeigenschaften, um das Systemverhalten zu antizipieren. Damit kann im vorliegenden Fall die mobile Basis bspw. zu einem abrupten Halt ohne Nachschwingen gebracht werden, indem die Regelung vorhält, also übersteuert.

Nähere Betrachtungen verdienen in Zukunft modellbasierte Algorithmen, wie ein Zustandsbeobachter kombiniert mit einem Zustandsregler, siehe [4], H∞-Regler, siehe [5] oder „linear parameter-varying“ (LPV)-Regler, siehe [6].

Für den Prototypen Plotbot/Crawler Prototyp P3 wurden für das Antriebssystem Servomotoren mit integrierter Schwingungsdämpfung (Typ Panasonic Minas A6) eingesetzt.

Zusätzlich wird die mobile Basis beim Beschichtungsvorgang an der Fassade fixiert. Hierfür wurde das System, das den Endeffektor bei Positionierfahrten zur Überwindung von Gesimsen und anderen Vorsprüngen an der Fassade von dieser zurückzieht, nun auch für die Stabilisierung weiterentwickelt.

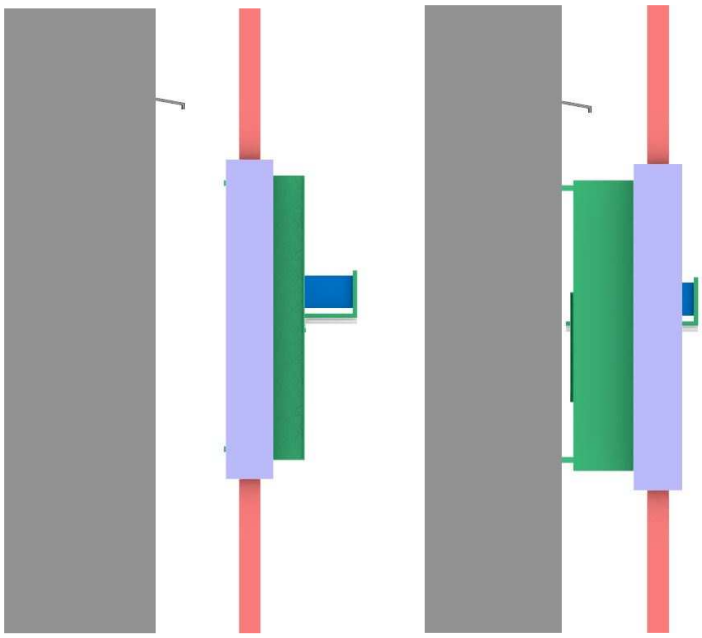

Abbildung 41 Systembild mobile Basis in Verfahr- und Arbeitsposition

Die Feinpositioniereinheit wurde um ein Dreipunktauflager erweitert, das im ausgefahrenen Zustand gegen die Fassade gedrückt und so die Feinpositionierung gegen den Riemen verspannt. Damit ist die mobile Basis fixiert, das Kamerasystem kann die Druckziele erfassen und die Feinpositionierung der mobilen Basis kann die Druckköpfe exakt zum Ziel führen. Siehe Abb. 41

4.7.15 Planung und Entwicklung der Schnittstelle Positioniersystem zu mobiler Basis

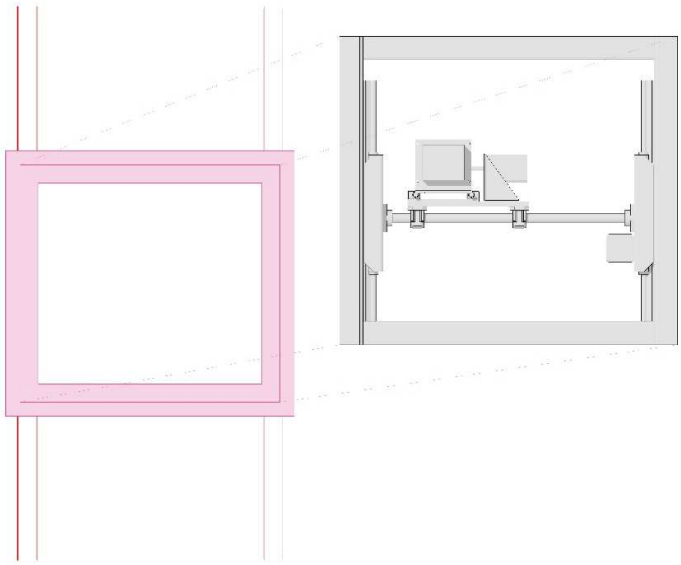

Abbildung 42 Systembild Schnellwechselsystem

Um die mobile Basis für die turnusmäßigen Wartung und im Fall eines Defekts einfach austauschen zu können, wurde die Schnittstelle zwischen Antriebssystem und mobiler Basis mit dem Ziel einfache Montage und Demontage weiterentwickelt.

Die Schnittstelle zwischen Positioniersystem und mobiler Basis besteht in elektrischer Hinsicht aus:

- Einspeisung der zum Betrieb notwendigen elektrischen Energie mit einer Spannung von 48 V über einen Industrie-Steckverbinder.
- Zum Betrieb notwendige Datenverbindung für die Steuerung der Druckeinheit und den Datenstrom für die Kamera über ein Ethernetkabel der Kategorie CAT6 mit einem Industrie-Steckverbinder.
- Anschluss des Notauskreises über eine drahtbruchsichere Stromschleife mit einem Industrie-Steckverbinder.

Die elektrische Schnittstelle wurde so weiterentwickelt, dass alle Verbindungen über Steckverbinder binnen kurzer Zeit getrennt und wieder verbunden werden können.

Die mechanische Schnittstelle wurde so weiterentwickelt, dass eine Montageplatte permanent mit den Zahnriemen verbunden bleibt. Die mobile Basis wird mit Hilfe von Passstiften an der Montageplatte registriert und durch Schraubverbindungen fixiert.

4.7.16 Vernetzung der einzelnen Komponenten des Antriebssystems und Inbetriebnahme

Die Einzelkomponenten wurden im zentralen Schaltschrank zusammengeführt, mit der PC-Steuerung verbunden und in Betrieb genommen.

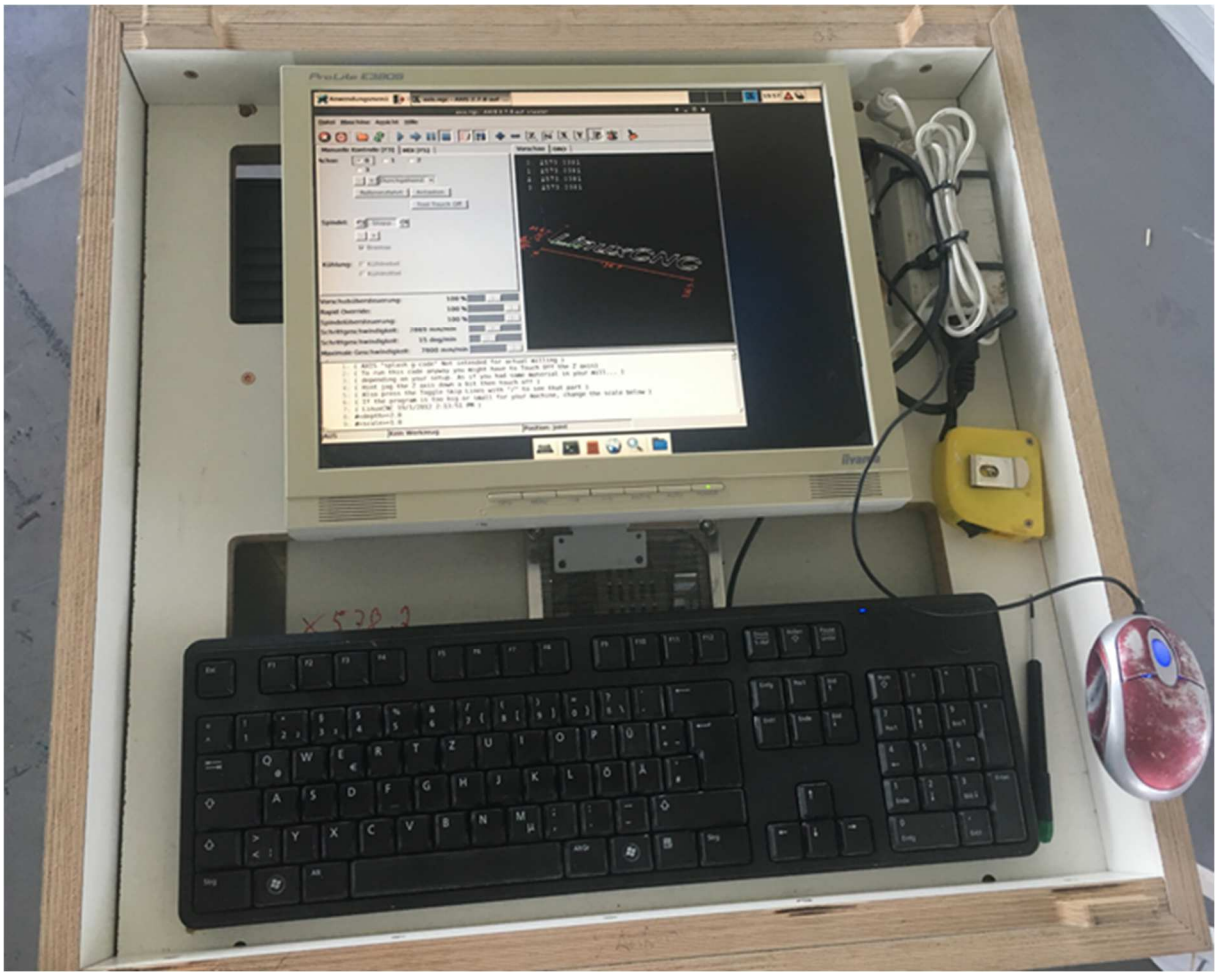

Abbildung 43 Zentraler Schaltschrank mit der PC-Steuerung, Bedienteil

Abbildung 44 Zentraler Schaltschrank mit der PC-Steuerung, Ansicht Verdrahtung

5 Ergebnisse und Interpretation der Ergebnisse

5.1 Positioniergenauigkeit

Rundriemen ohne Verzahnung führten vor allem zu Abweichungen in der Wiederholgenauigkeit, deshalb wurden bei Plotbot/Crawler Prototyp P4 wiederholgenaue Zahnriemen in der vertikalen Positionierung und Zahnstangen und geschliffene Führungen in der horizontalen Positionierung projektiert. Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass die H-Bot Konstruktion für das Anwendungsfeld des Plotbot/Crawlers am geeignetsten ist, weil diese sehr geringe Abweichungen in Z Richtung aufweist und die Freiheitsgrade des H-Bot den Schichtauftrag mit allen hiermit verbundenen Anforderungen erlauben. Der H-Bot ist im Anwendungsfeld des Plotbot/Crawlers aufgrund der geforderten Genauigkeit dem Knickarmroboter und Deltabot vorzuziehen.

5.2 Größe des Arbeitsbereichs

Die rechnerischen Betrachtungen haben gezeigt, dass bei Seilaufhängungen in den Randbereichen zur Vermeidung von zu unzulässig hohen Seillasten ein Bereich nicht angefahren werden kann. In Versuchsreihen wurde diese Einschränkung verifiziert. Aus diesem Grund sind XY-Führungen einer Seilaufhängung überlegen.

Da für den Einsatz an der Fassade die Skalierbarkeit in vertikaler Richtung sowie das Gesamtgewicht des Plotbot/Crawlers Prototyp P4 entscheidend sind, wurde sowohl für die vertikale als auch die horizontale Positionierung ein skalierbares Antriebssystem entwickelt, welches einen hohen Anpassungsgrad an die Gebäudehülle bietet.

5.3 Sicherheit und Handhabung

Die erstellte Gefährdungsbeurteilung führte im ersten Schritt zu technisch/konstruktiven Maßnahmen wie Abdeckblechen über den Einlaufstellen der Zahnriemen auf die Zahnräder und einer Begrenzung der maximalen Verfahrgeschwindigkeit. Ein horizontal detektierender Lichtvorhang unter der Maschine und Anbringung von flächig ausgedehnten Kollisionssensoren sorgt zusammen mit der hohen Bremsverzögerung und dem dadurch extrem kurzen Bremsweg für einen sicheren Betrieb der Maschine.

Für die Handhabung des Plotbot/Crawler im Einrichtbetrieb, Automatischer Betrieb, Wartung, Umrüstung sind jeweils softwareunterstützte Betriebsmodi vorhanden, die jeden einzelnen Arbeitsschritt erleichtern.

5.4 Dauerhaftigkeit und Witterungseinflüsse

Die Konstruktion des Plotbot/Crawlers wurde nach geltenden Normen auf Korrosionsbeständigkeit ausgelegt. Komponenten wurden entsprechend gewählt, um einen durchgängigen Betrieb im Freien aufgrund der zugesicherten Eigenschaften zu erlauben. Die elektrischen Komponenten wurden

gemäß Schutzklasse IP65 ausgelegt, so dass die Verwendung von Kabeln, Steckern, Gehäusen einen durchgängigen Betrieb im Freien erlauben.

5.5 Auswahl des Antriebssystems

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Positioniergenauigkeit sind Dehnung und Schlupf der Antriebskomponenten. Deshalb wurde das Antriebssystems so weiterentwickelt, dass kürzere Riemenlängen ohne Überkreuzung der Riemen zum Einsatz kommen. Um die Riemenlänge zu verkürzen und in der horizontalen X-Achse eine hohe Steifigkeit und hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen, wurden Linearführungen mit Zahnstangenantrieb eingesetzt. Die aufgrund der mechanischen Konstruktion zu erwartenden Schwingungen im Positionierbetrieb oder bei Windlasten werden über intelligente Steueralgorithmen in den Servotreibern ausgeregelt.

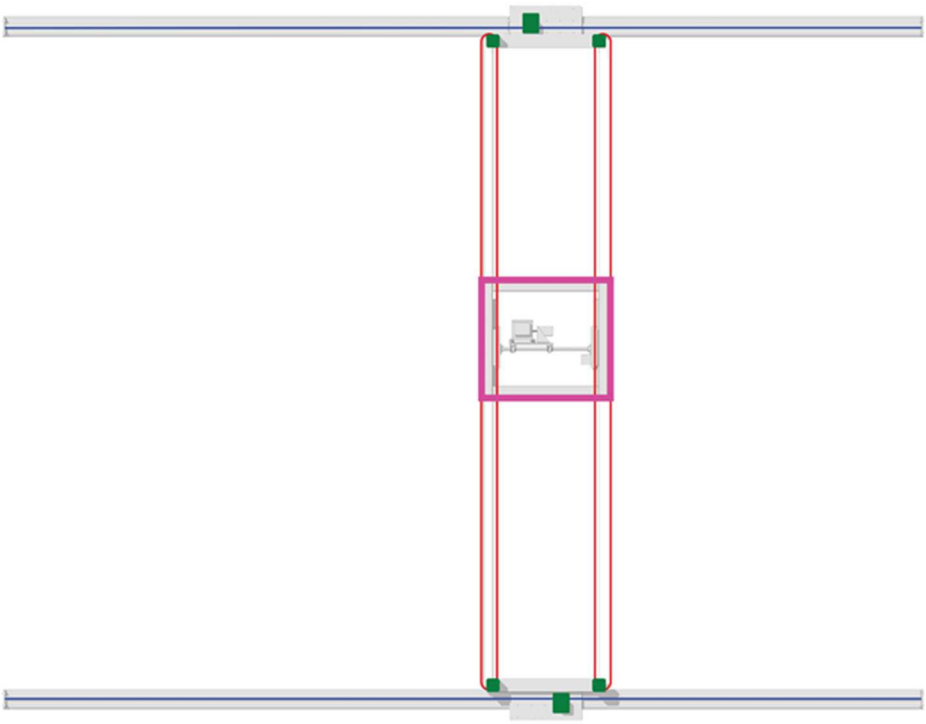

Abbildung 45 Systembild Plotobot/Crawler P4

5.6 Montagevorrichtung an der Gebäudehülle

Bei der Weiterentwicklung der Montagevorrichtung wurde der Fokus daraufgelegt, dass die Justage der Führungen auch bei großen Fassaden genug Spielraum bietet, um die nach DIN 18202 „Toleranzen im Hochbau - Bauwerke“ zulässigen Toleranzen ausgleichen zu können. Die Montagevorrichtung wurde so entwickelt, dass eine selbsttragende anreihbare Linearschiene die Basis bildet, aufgesetzt auf ein Vierkant-Edelstahlhohlprofil. Durch hohe Verwindungssteifigkeit der Gesamtkonstruktion wurde die Anzahl der nötigen Befestigungspunkte an der Gebäudehülle

minimiert, was in Bezug auf bauphysikalische Fragestellungen (Isolationsschichten auf der Gebäudehülle) von Vorteil ist.

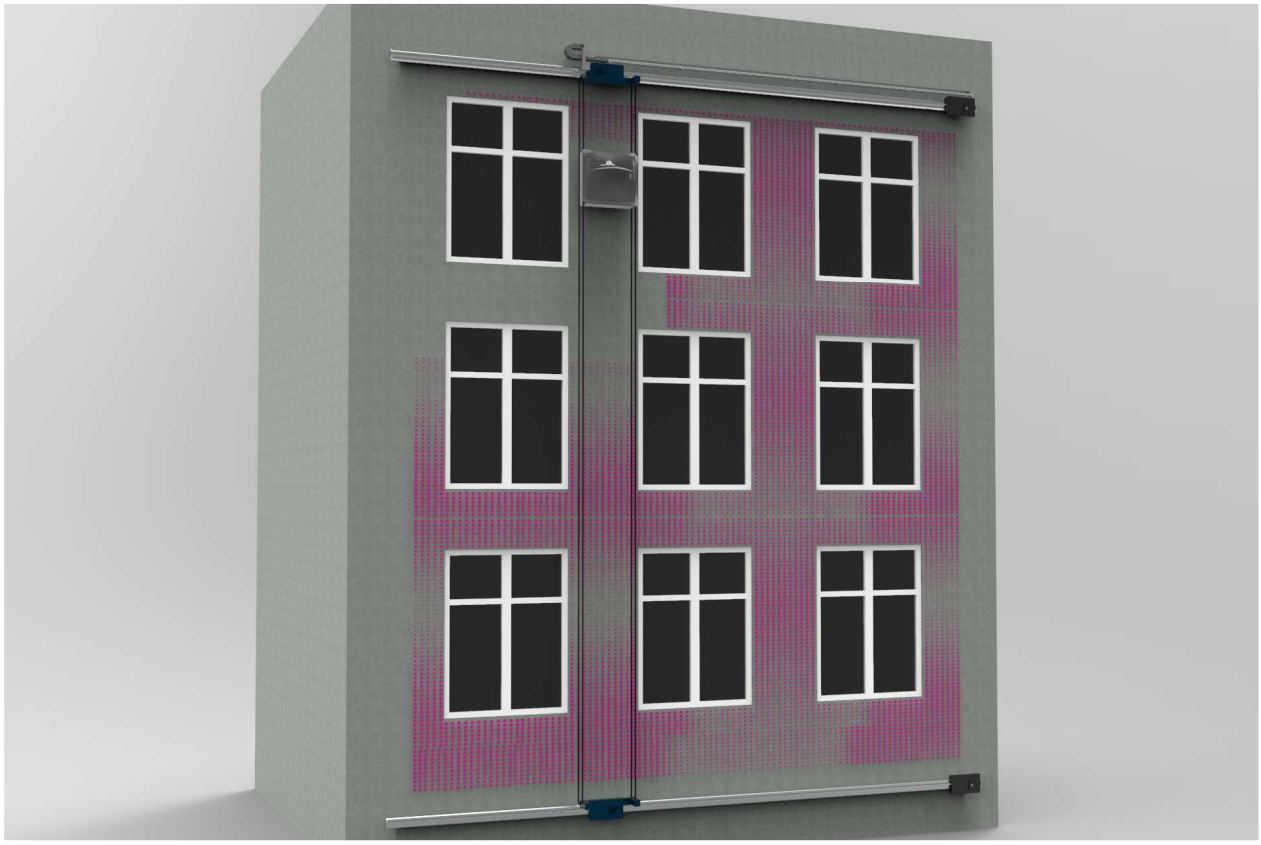

Abbildung 46 Visualisierung P4 an Fassade

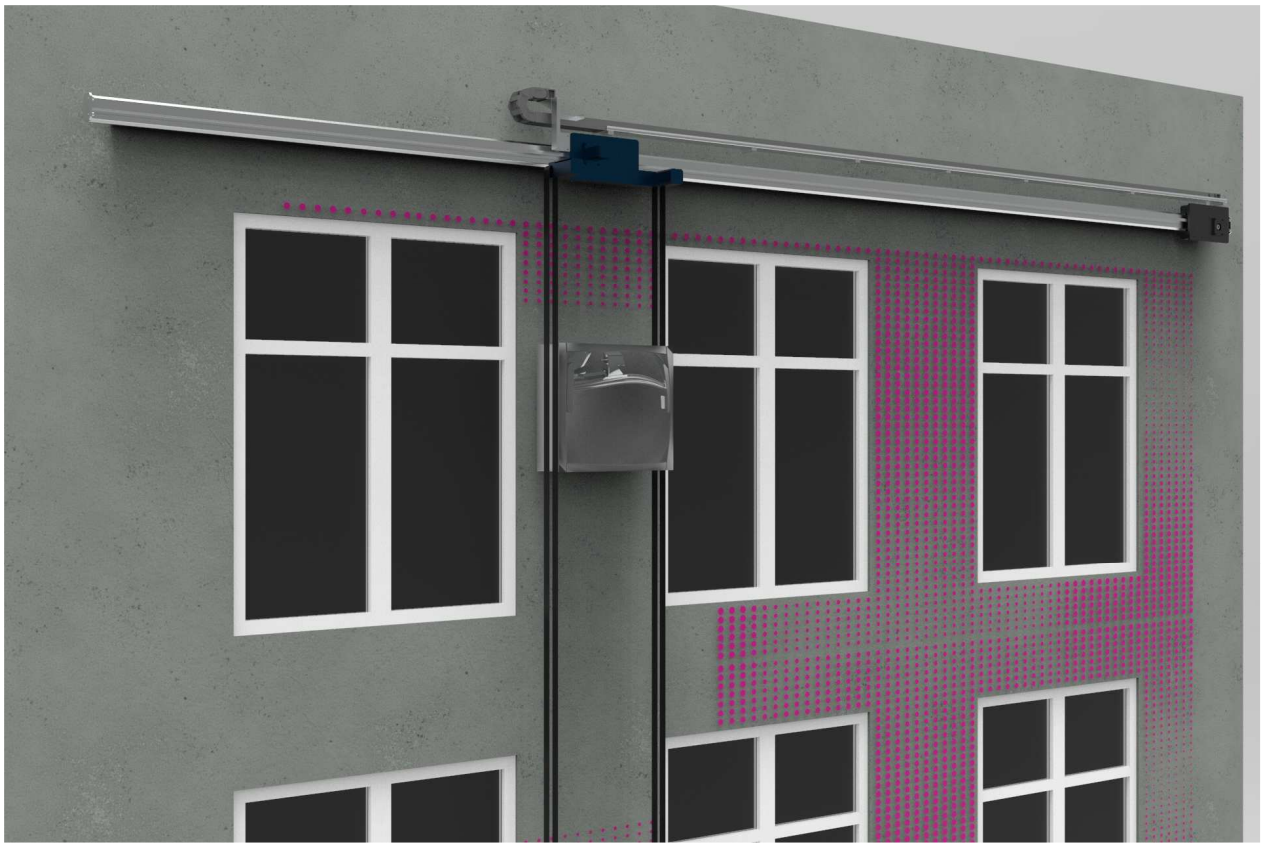

Abbildung 47 Visualisierung P4 an Fassade Detail

5.7 Mechanische und elektronische Komponenten des Antriebssystems

Durch die Verwendung beliebig lang konfektionierbarer Zahnriemen auf der Y-Achse und der anreihbaren Linearschienen auf der X-Achse wurde die Möglichkeit geschaffen, den Arbeitsraum des Plotbot/Crawler Prototyp P4 jeweils an die unterschiedlichen architektonischen Gegebenheiten anzupassen. Für den Antrieb aller Systemkomponenten wurde eine aktive Bedämpfung über einen elektrischen Antrieb mit „proportional integral differential“ (PID)-Regler gewählt, der Schwingungen aktiv reduziert.

5.8 Schnittstelle Positioniersystem zu mobiler Basis

Die Schnittstelle zwischen Positioniersystem und mobiler Basis besteht in elektrischer Hinsicht aus Industrie-Steckverbindern für die Energieversorgung, die Datenverbindung und den NotAus-Kreis.

Die mechanische Schnittstelle wurde so weiterentwickelt, dass eine Montageplatte permanent mit den Zahnriemen verbunden bleibt. Die mobile Basis wird mit Hilfe von Passstiften an der Montageplatte registriert und durch Schraubverbindungen fixiert.

5.9 Vernetzung der einzelnen Komponenten des Antriebssystems

Die zentrale Steuerung auf Basis von LinuxCNC läuft auf einer im Schaltschrank integrierten PC Arbeitsstation. Der PC ist über eine schnelle Datenleitung mit dem Plotbot/Crawler verbunden. Über diese Leitung gehen die Antriebs- und Roboterbefehle und in Gegenrichtung die Sensordaten des

Plotbot/Crawler. Im vernetzten Betrieb ist die Arbeitsstation über ein CAT6 Ethernetkabel mit einem Router mit dem Internet verbunden.

6 Arbeitspakete aus dem Projektquartal 4 Zuwendungsbescheid (Aufstockung) 12.02.2019

Die genannten Arbeitspakete werden aufgrund des verspäteten Beginns des Projektes final im Q1 2020 bearbeitet.

7 Fazit

Die Positioniergenauigkeit und Größe des Arbeitsbereichs konnten durch Antriebskonstruktion und aktive Regelung signifikant verbessert werden. Die Konstruktion des Gesamtsystems führte zu einer optimalen Montagefreundlichkeit an der Gebäudehülle und zu einem witterungsfesten, modularen System mit austauschbaren Wirkeinheiten in der mobilen Basis. Die strukturierten Sicherheitsmaßnahmen gewährleisten einen sicheren automatischen Betrieb.

8 Empfehlungen an die Bereiche Politik, Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft

8.1 Politik

Die Herausforderungen des sich beschleunigenden Klimawandels lassen sich nur durch eine nachhaltige Bündelung aller Bemühungen zur Reduktion des Energieverbrauches, zur Bereitstellung einer vollständig regenerativen Energieversorgung und von weitestgehend geschlossenen Stoffkreisläufen bewältigen. Die Politik kann einer umfassenderen Nutzung aller denkbaren Flächen für die photovoltaische Erzeugung elektrischen Stromes den Weg ebnen. Hierzu sind weitere Novellen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes notwendig, welche die Einspeisevergütung erhöhen und vor allem Fassadenflächen zur Stromerzeugung wirtschaftlich interessanter machen.

8.2 Wissenschaft

Die Wissenschaft sollte sich auf eine Reduktion der Kosten der Photovoltaik-Generatoren in €/W konzentrieren, um durch einen signifikanten Ausbau der PV-Erzeugungskapazität auch einen weitgehend abgeregelten Betrieb der Anlagen wirtschaftlich zu machen, und damit das Stromangebot wesentlich gleichmäßiger gestalten zu können. Auf diese Weise können erhöhte Investitionen in Leitungsnetze und Speichersysteme teilweise vermieden werden.

8.3 Wirtschaft

Für die Wirtschaft ist in Anbetracht der in Zukunft voraussichtlich stark steigenden Ausgleichsabgaben für CO_2-Emmissionen eine frühzeitige Fokussierung auf CO_2-arme Stromerzeugungsverfahren zu empfehlen. Eine Umstellung auf “grünen Strom” ist auch nicht zuletzt als Wettbewerbsvorteil von steigender Bedeutung.

8.4 Gesellschaft

Die ökologische Umgestaltung von Industrie, Handwerk und Privathaushalten erfordert von allen Beteiligten eine hohe Toleranz und eine Einsicht in die Tatsache, dass sich Energie nicht unsichtbar und ohne jede Beeinträchtigung erzeugen und transportieren lässt. Das bedeutet, dass die Haltung "not in my back yard" aufgegeben werden muss. Solar- und Windanlagen sowie Hochspannungsleitungen gehören ebenso wie Autobahnen und Müllverbrennungsanlagen zu den Belastungen, die von allen Bürgern zu tragen sind.

9 Ergebnistransfer

9.1 Messen

9.1.1 BAU 2017 - Weltleitmesse für Architektur, Material und Systeme in München am Stand der Forschungsinitiative Zukunft BAU

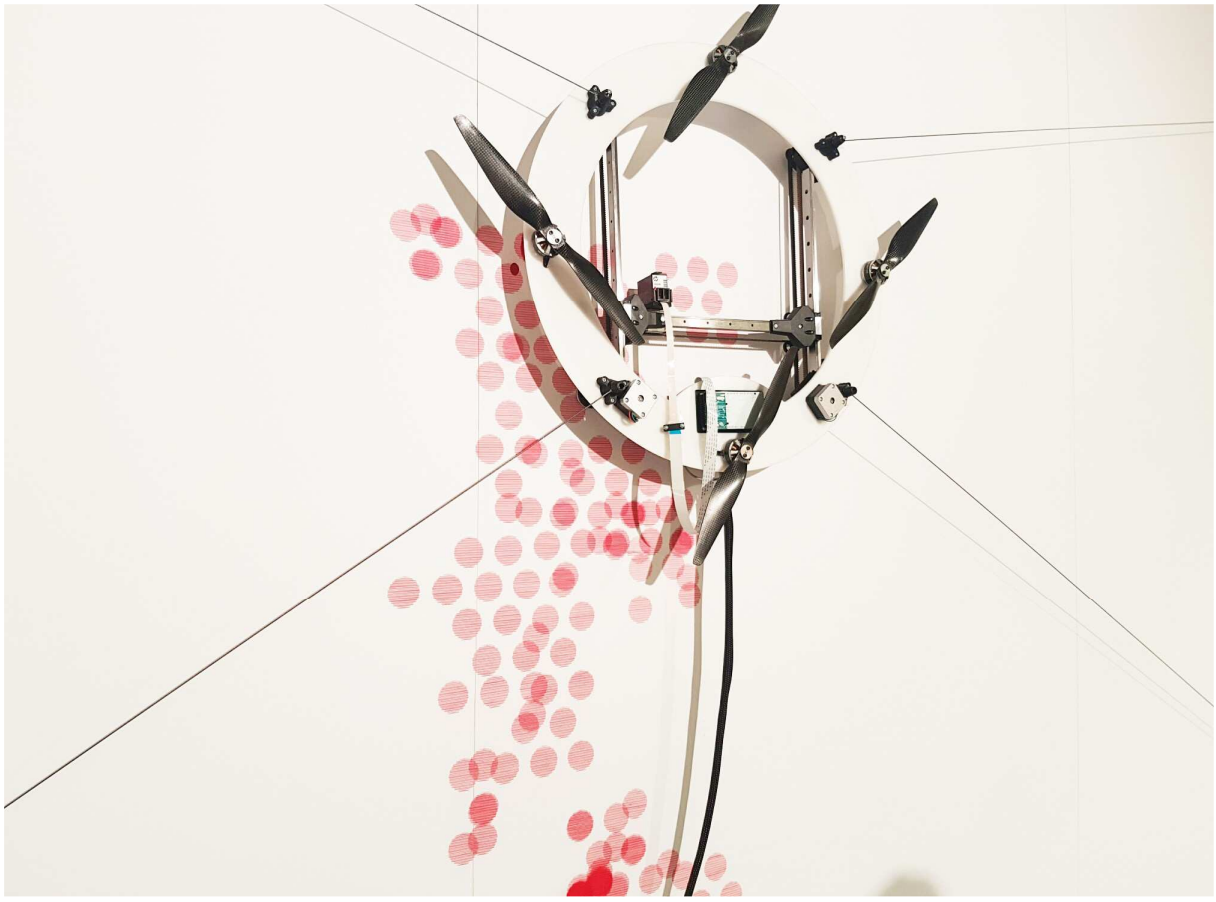

Abbildung 48 Mobile Basis des Plotbot/Crawler Prototyp P2 auf der BAU 2017 in München am Stand von ZukunftBau

Abbildung 49 Plotbot/Crawler Prototyp P2 auf der BAU 2017 in München am Stand von ZukunftBau

9.1.2 BauTec 2018 - Internationale Fachmesse für Bauen und Gebäudetechnik in Berlin am Stand der Forschungsinitiative Zukunft BAU

Abbildung 50 Mobile Basis des Plotbot/Crawler Prototyp P3 auf der Bautec 2018 in Berlin am Stand von ZukunftBau

Abbildung 51 Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Barbara Hendricks begutachtet den Plotbot/Crawler Prototyp P3 auf der Bautec 2018 in Berlin am Stand von ZukunftBau

9.1.3 Interzum Köln 2019 - "Disruptive Materials – Changing the Future"

Abbildung 52 mobile Basis des Plotbot/Crawler auf der Interzum Köln 2019 - am Stand von "Disruptive Materials – Changing the Future"

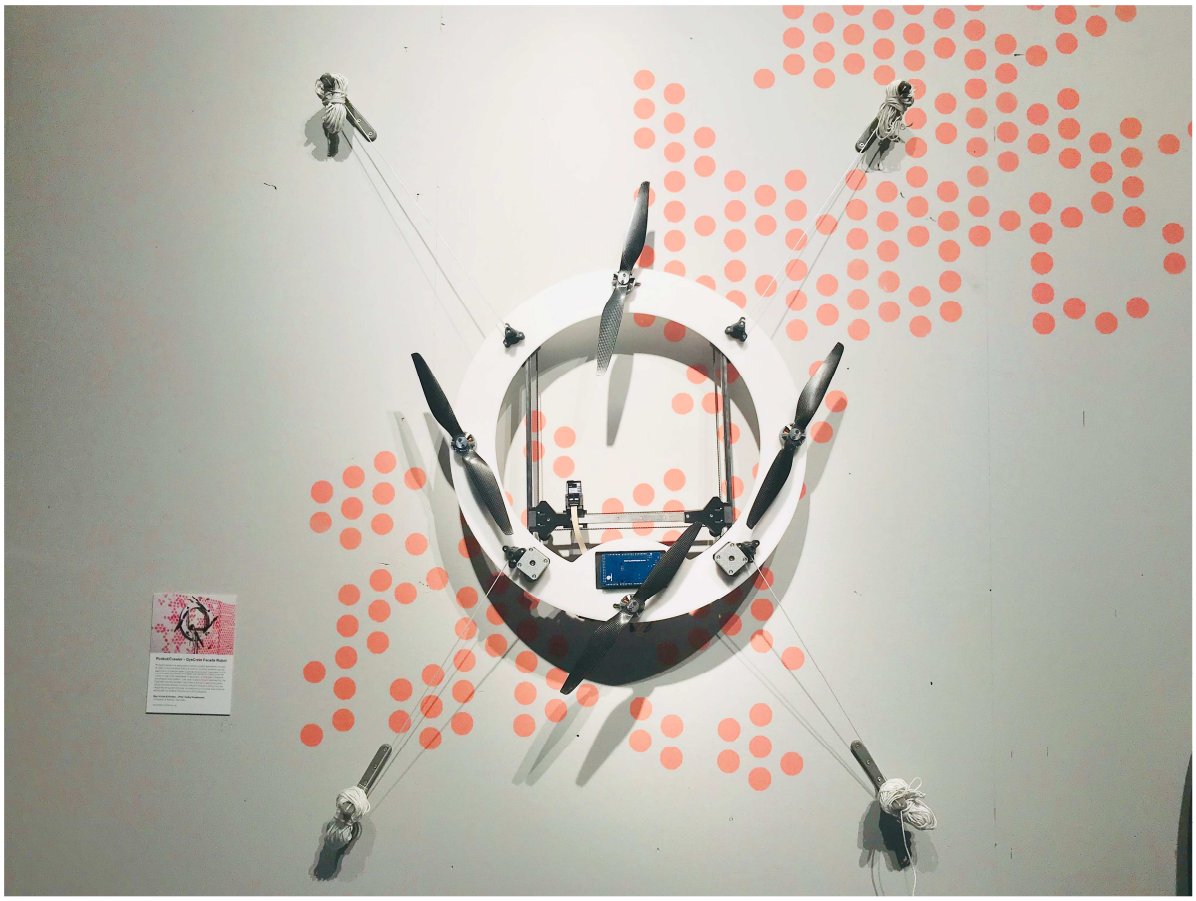

Abbildung 53 mobile Basis des Plotbot/Crawler auf der Interzum Köln 2019 - am Stand von "Disruptive Materials – Changing the Future"

9.1.4 Expo 2020 Dubai (in Vorbereitung)

Abbildung 54 Plotbot/Crawler im deutschen Pavillon auf der Expo 2020 in Dubai

9.2 Publikationen

Peer Reviewed Journals:

- Thorsten Klooster und Heike Klussmann: „Research and Development of Innovative Materials at the Convergence of Art, Architecture and New Technologies“ in: Powerskin. Proceedings, Delft 2017, pp. 135 -146.

Mediale Resonanz | Auswahl

- DBZ – Deutsche Bauzeitschrift „Fassaden-Roboter für Solarbeton Kasseler Forschungsgruppe entwickelt Fassaden-Roboter“, 02/2018
- OpusC – Architektur und Design mit Beton, „Kasseler Forschungsgruppe entwickelt Fassaden-Roboter“, 02/2018
- xia Intelligente Architektur – Zeitschrift für Architektur und Technik, „Kasseler Forschungsgruppe entwickelt intelligenten Fassadenroboter“, 06/2018
- Meistertip, „Innovative Sanierung mit Fassaden-Roboter Plotbot/Crawler“, 28.02.2018 VDI-Nachrichten, Zukunft des Bauens – barrierefrei und digital, 01/2017
- Architekturblatt, Kasseler Forschungsgruppe entwickelt Fassaden-Roboter, 02/2018
- BI Medien, „Bautec 2018: Roboter beschichtet Fassaden mit Solarbeton“, 02/2018
- Helden am Bau, „Kasseler Roboter erklettert Fassaden von allein“, 03/2018
- Bauhandwerk| Bauverlag BV – Das Profimagazin für Ausbau, Neubau, Sanierung „Neu entwickelter Fassaden-Roboter „Plotbot/Crawler“, 06/2018
- Springer Professional, „Roboter beschichtet Gebäudefassaden“, 01.03.2018 GFF – Das Praxismagazin für Produktion und Montage, „Fassaden sanieren und beschichten“, 05/2018
- Zukunft Bauen | Digitale Bauwelt, Magazin der Forschungsinitiative Zukunft Bau, „Plotbot/ Crawler“, 01/2018
- BIM – Building Information Modeling | Management | Band 2 | Digitale Planungswerkzeuge in der interdisziplinären Anwendung. Plotbot/Crawler – ein universell einsetzbarer Fassadenroboter, Detail Verlag, 11/2017

10 Zusammenfassung

10.1 Generation der Prototypen

10.1.1 Plotbot/Crawler Prototyp P1

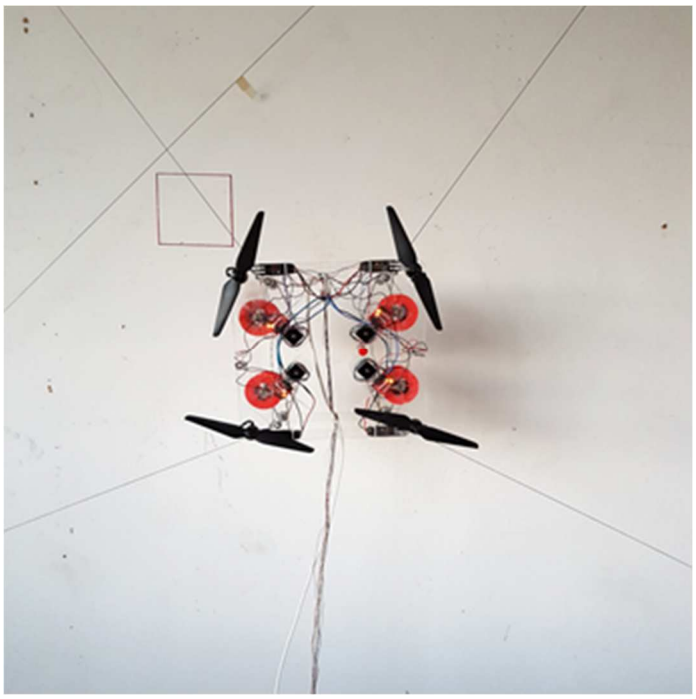

Abbildung 55 Plotbot/Crawler P1

Zur Positionierung der mobilen Basis wurde diese vertikal ausgerichtet an vier Seilen befestigt, die jeweils an den Eckpunkten der Fassade bzw. der zu bearbeiteten Fläche verankert sind. Hierfür wurde das bei Stadionkameras eingesetzte horizontale Bewegungssystem zu einem vertikalen Bewegungssystem weiterentwickelt. In Versuchsreihen konnten mit einer provisorischen Zeichenvorrichtung erste am Computer generierte Geometrien auf die Wand übertragen werden.

10.1.2 Plotbot/Crawler Prototyp P2

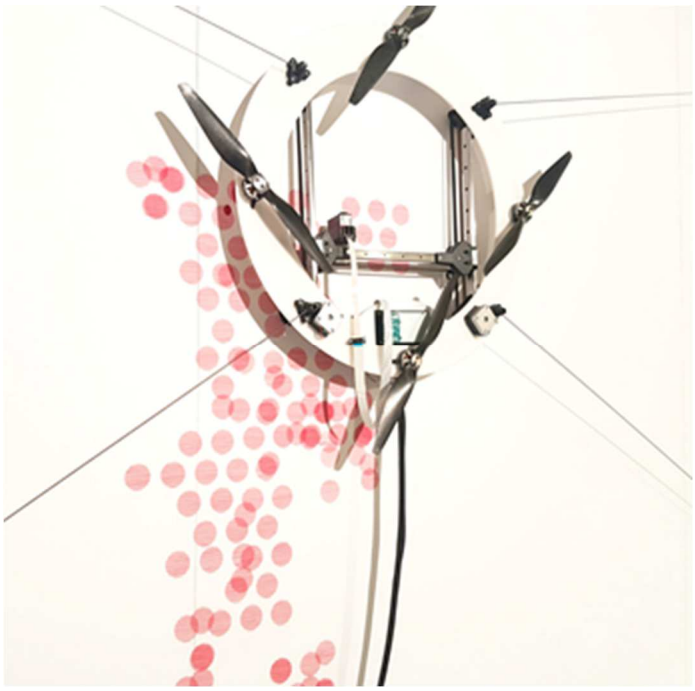

Abbildung 56 mobile Basis Plotbot/Crawler P2

Das Funktionsprinzip von Prototyp P2 ist angelehnt an Prototyp P1 ein Parallelseilsystem. Um leistungsstärkere Motoren ohne eine dadurch bedingte Erhöhung des Leergewichtes der mobilen Basis einsetzen zu können, wurde ein Seilumlenkungssystem entwickelt. Dadurch konnten die Motoren in einer Antriebseinheit konzentriert am Boden in eine transportable Einheit ausgelagert werden.

Durch die Integration eines CNC gesteuerten H-Bots samt Druckkopf in die mobile Basis konnten mit P2 die ersten Druckversuche in der vertikalen Achse durchgeführt werden. Es zeigte sich jedoch, dass auch mit den leistungsstärkeren Motoren, bedingt durch die Seilkinematik und den sich daraus ergebenden Kräften, nicht die volle von den Umlenkungsrollen einbeschriebene Fläche angefahren werden konnte. Mit den Propellern war es möglich, bei gleichzeitiger Verringerung der Seilspannung einen Abstand der mobilen Basis zu Fassade zur Überwindung von Hindernissen zu erreichen.

10.1.3 Plotbot/Crawler Prototyp P3

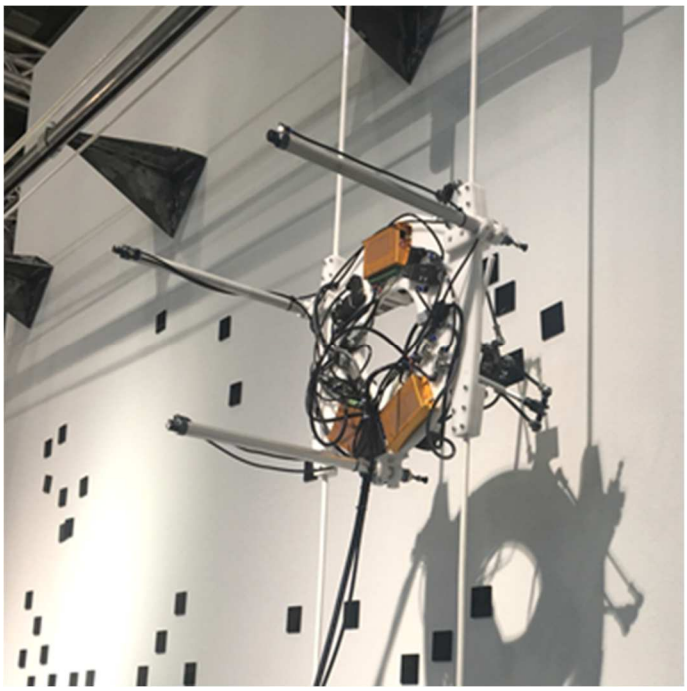

Abbildung 57 mobile Basis Plotbot/Crawler P3

Für den Prototypen P3 wurde das Antriebsverfahren für die mobile Basis überarbeitet und die Werkzeuge für den Plotbot/Crawler Prototyp P2 weiterentwickelt, so dass die mobile Basis nicht mehr direkt an der Fassade geführt und über Propeller auf Abstand zu der Bearbeitungsfläche gehalten wird. Der Prototyp P3 wird dauerhaft in einem Abstand von 40 cm zu der zu bearbeitenden Fassade gehalten. Dadurch konnten an der Fassade befindliche Hindernisse, wie beispielsweise Fenstervorsprünge, Gesimse, Sonnenverschattungen und andere Anbauten direkt umfahren werden. Um die Distanz zwischen der mobilen Basis und der zu bearbeitenden Fläche zu überwinden und das Werkzeug an die Fassade zu führen wurde ein sogenannter Delta-Roboter entwickelt und als Werkzeug an der mobilen Basis installiert.

Für den Plotbot/Crawler Prototyp P3 wurde mit der Pick and Place Einheit ein neues Werkzeug entwickelt, das neuartige Einsatzmöglichkeiten und Bearbeitungsweisen von Fassadenflächen ermöglicht.

10.1.4 Plotbot/Crawler Prototyp P4

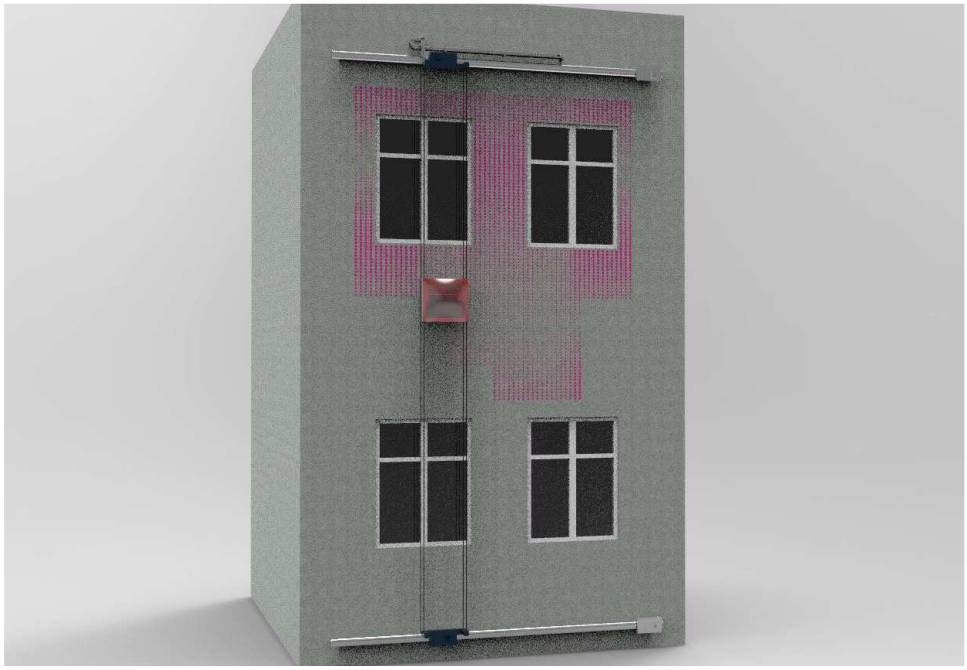

Abbildung 58 Visualisierung Plotbot/Crawler P4

Zur weiteren Erhöhung der Präzision wurde das mechanische Antriebssystem beim Prototypen P4 mit wiederholgenaueren Zahnriemen und Linearführungen mit Zahnstangen ausgestattet, dadurch wurde eine höhere Steifigkeit des Gesamtsystems parallel zum Riemenprofil erreicht. Weiter konnte der Vermeidung von Schlupf verringert sowie eine hohe Wiederholgenauigkeit erreicht werden. Darüber hinaus wurde die Positioniergenauigkeit bei langen Verfahrwegen durch die Verwendung von gedruckten Passermarken und deren Auswertung mittels optischer Erkennung verbessert. Statt des Delta Roboters wird eine für die Anwendung des Schichtauftrags optimierte kartesische 3d Feinpositionierung als Weiterentwicklung der 2d Version von Variante P2 eingesetzt.

11 Ausblick

Bei der Präsentation des Plotbot/Crawler auf Messen sowie Fachkongressen zeigte sich, dass das neben der in diesem Forschungsprojekt entwickelten Funktion als Beschichtungssystem für Farbstoffsolarzellen die entwickelte Mechanik des Plotbot/Crawler auch für andere Anwendungsgebiete von Relevanz ist. Von besonderem Interesse ist hierbei die Fassadenbegrünung, welche im Rahmen des Klimawandels immer mehr Bedeutung bei der Verbesserung des Mikroklima der Verbesserung der Luftqualität [7] im städtischen Raum sowie der Energieeffizienz von Gebäuden einnimmt.

Bei vielen dieser Systeme müssen die Pflanzen in regelmäßigen Zyklen gepflegt werden.

Zumeist werden diese Arbeiten sehr aufwändig von Gärtnern mithilfe von Arbeitsbühnen oder an der Fassade kletternd durchgeführt [8].

Da begrünte Hochhausfassaden mit dieser Arbeitsweise nur sehr kostenintensiv unterhalten werden können, kann ein automatisiertes System dabei helfen, diese grüne Technik weiter zu etablieren.

Da der Plotbot/Crawler sehr ähnlichen Anforderungen, wie dauerhafter bewitterter Einsatz an der Fassade, präzise Arbeiten an der Fassade, Mustererkennung etc., unterliegt soll untersucht werden ob das entwickelte System bis zur mobilen Basis des Plotbot/Crawler so umgerüstet werden kann, dass er für diesen Einsatz geeignet ist.

Literaturverzeichnis

[1] Jaime Gallardo-Alvarado: Kinematic Analysis of Parallel Manipulators by Algebraic Screw Theory 2016, S. 282

[2] Andrey A. Radionov, Oleg A. Kravchenko, Victor I. Guzeev, Yurij V. Rozhdestvenskiy, Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), Band 1, Springer Nature, 30.11.2019, S. 462-470

[3] Moyer, Ilan E.: Principle of Operation, In: corexy.com. (2012). URL: http://corexy.com/theory.html [abgerufen am: 17.12.2019]

[4] Kurze, M.: Modellbasierte Regelung von Robotern mit elastischen Gelenken ohne abtriebsseitige Sensorik, Fakultät für Elektrotechnik and Informationstechnik der Technischen Universität München, Dissertation, 2008

[5] Löhning, M.: Globally optimized H∞-controllers with application to elastic robots. In: European Control Conference (ECC), 2009, S.3353–3358

[6] Saupe, F. ; Pfifer, H.: Applied LPV control exploiting the separation principle for the single axis positioning of an industrial manipulator. In: Proc. Conference on Control Applications (CCA), 2011

[7] Pugh, T.A.M. et al.: Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons, In: Environmental Science and Technology. 2012, 46, 14, 7692-7699 (04.06.2012); URL: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es300826w [abgerufen am 10.12.2019]

[8] Nagel, Britta: Dieses Hochhaus ist ein kleiner Wald. In: welt.de. (19.11.2014). URL: https://www.welt.de/finanzen/immobilien/article134513421/Dieses-Hochhaus-ist-ein-kleiner-Wald.html [abgerufen am: 10.12.2019]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Test Druck-Sprüheinheit und Verfahrwege eines Automaten in kompakter Bauweise; Steuerung erfolgt mittels Laptopapplikation 9
Abbildung 2 Plotbot/Crawler Prototyp P1, mobile Basis an Testfläche 13
Abbildung 3 Prinzipielle Kinematik des Plotbot/Crawlers 15
Abbildung 4 Grafik Positionsbestimmung Plotobot/Crawler P1/P2 16
Abbildung 5 Plotbot/Crawler Prototyp P2, H-Bot auf mobiler Basis, Drehrichtung der Motoren und Bewegungsrichtung der mobilen Basis 19
Abbildung 6 Entwicklung der Geometrie der mobilen Basis im Hinblick auf Stabilität und Gewichtsminimierung, Material POM (Polyoxymethylen) 20
Abbildung 7 Entwicklung der Halterungen der Motoren aus PLA (Polylactide) für den H-Bot auf dem 3D-Drucker 21
Abbildung 8 Plotbot/Crawler Prototyp P2, H-Bot mit Sprüh-Druckkomponente 23
Abbildung 9 Plotbot/Crawler Prototyp P2, Antriebseinheit mit Servomotoren 25
Abbildung 10 Plotbot/Crawler Prototyp P2, mobile Basis mit H-Bot und Sprüh-Druckkomponente an Testfläche 26
Abbildung 11 Plotbot/Crawler Prototyp P2, mobile Basis mit Steuer-Einheit, H-Bot und Abstandshaltern mit Kugelrollen 27
Abbildung 12 Plotbot/Crawler Prototyp P2, Ausstellung im Rahmen der BAU2017, Stand der Forschungsinitiative Zukunft BAU 29
Abbildung 13 Kinematisches-System Deltaroboter mit X-, Y- und Z-Verfahrwegen (Quelle: Optimization of KNTU Delta Robot for Pick and Place Application - Scientific Figure on ResearchGate. Url: https://www.researchgate.net/figure/a-Kinematic-parameters-of-delta-robot-b-kinematic-chain-projected-in-Y-Z-plane_fig2_291312317 [zugriff am 22.12.2019]) 31
Abbildung 14 mobile Basis P3 mit montierten Eigenbau-Deltaroboter 32
Abbildung 15 Plotbot/Crawler Prototyp P3: mobile Basis mit ausgefahrenem Stabilisierungszylindern – Delta-Roboter Pick and Place-Einheit 33
Abbildung 16 BAU KUNST ERFINDEN – Plotbot/Crawler Prototyp P3– Vakuum betriebener Sauger zum Greifen und anschließendem Platzieren von Zellen 34
Abbildung 17 Der Plotbot/Crawler Prototyp P3 platziert eine Solarzelle auf der Fassade – BAUTEC 2018, Berlin 35
Abbildung 18 Graphischer Algorithmus in Grasshopper zur Konvertierung der CAD-Daten in Maschinenkoordinaten (G-Code) 37
Abbildung 19 Seilsystem Plotbot/Crawler P2 38
Abbildung 20 Systemskizze Core xy-System mit Umlenkrollen (Quelle: Principle of Operation Url: http://www.corexy.com/theory.html [Zugriff am 22.12.2019]) 39
Abbildung 21 Core xy System mit Schrittmotoren (Quelle: Principle of Operation Url: http://www.corexy.com/theory.html [Zugriff am 22.12.2019]) 39

Abbildung 22 Core xy System mit Schrittmotoren, Kreuzung der Riemen aus dem Arbeitsbereich nach oben verschoben (Quelle: Reference Mechanism Url: http://www.corexy.com/theory.html [Zugriff am 22.12.2019]) 40
Abbildung 23 Systemskizze Riemenführung Plotbot/Crawler Prototyp P3 (Zahnriemen) 41
Abbildung 24 Plotbot/Crawler Prototyp P3 aus MDF mit Zahnriemen 41
Abbildung 25 Antriebsbauteil Motor, Getriebe mit Welle für Zahnriemen aus MDF 42
Abbildung 26 Umlenk/Führungs-Rollen-Modul für Riemen aus MDF 43
Abbildung 27 Schlittenmodul aus MDF für Zahnriemen 44
Abbildung 28 Der geometrische Aufbau des "Omega-Antriebes" (Quelle: Perneder, Raimund: Handbuch Zahnriementechnik, Springer Science & Business Media, 2009) 46
Abbildung 29 Systemskizze Plotbot/Crawler Prototyp 2 mit Rundriemen 48
Abbildung 30 Prototyp Plotbot/Crawler Prototyp P2 mit Rundriemen auf der Bautec 2018 49
Abbildung 31 Schlitten- Bauteil für Rundriemen aus Polyoxylmethylen 49
Abbildung 32 Antrieb und Riemenumlenkung Rundriemen 50
Abbildung 33 Interface LinuxCNC Axis mit zusätzlichen Software Buttons. 53
Abbildung 34 mechanische Gefahrstellen 58
Abbildung 35 Detail Montagevorrichtung 63
Abbildung 36 relevante Systemelemente Rollon Speedyrail 120 (Quelle: Modifiziert nach Rollon Linear Line Interaktive E-Katalog Seite 218 [Zugriff am 18.11.2019] 64
Abbildung 37 System Riemenantrieb Y und X 65
Abbildung 38 Systembild Skalierbarkeit Plotbot/Crawler 65
Abbildung 39 Systembild Schwingung in X Richtung 66
Abbildung 40 Zahnstangenantrieb in X-Richtung (Quelle: Rollon Produktwebseite Speedy Rail A; Url: https://www.rollon.com/DE/de/produkte/linearachsen-actuator-line/42-speedy-rail-a/ [Zugriff am 22.12.2019] 66
Abbildung 41 Systembild mobile Basis in Verfahr- und Arbeitsposition 68
Abbildung 42 Systembild Schnellwechselsystem 68
Abbildung 43 Zentraler Schaltschrank mit der PC-Steuerung, Bedienteil 70
Abbildung 44 Zentraler Schaltschrank mit der PC-Steuerung, Ansicht Verdrahtung 71
Abbildung 45 Systembild Plotobot/Crawler P4 73
Abbildung 46 Visualisierung P4 an Fassade 74
Abbildung 47 Visualisierung P4 an Fassade Detail 75
Abbildung 48 Mobile Basis des Plotbot/Crawler Prototyp P2 auf der BAU 2017 in München am Stand von ZukunftBau 77
Abbildung 49 Plotbot/Crawler Prototyp P2 auf der BAU 2017 in München am Stand von ZukunftBau 78
Abbildung 50 Mobile Basis des Plotbot/Crawler Prototyp P3 auf der Bautec 2018 in Berlin am Stand von ZukunftBau 78
Abbildung 51 Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Barbara Hendricks begutachtet den Plotbot/Crawler Prototyp P3 auf der Bautec 2018 in Berlin am Stand von ZukunftBau 79

Abbildung 52 mobile Basis des Plotbot/Crawler auf der In-terz-um Köln 2019 - am Stand von "Dis-rup-ti-ve Ma-te-rials – Chan-ging the Fu-tu-re" *80*
Abbildung 53 mobile Basis des Plotbot/Crawler auf der In-terz-um Köln 2019 - am Stand von "Dis-rup-ti-ve Ma-te-rials – Chan-ging the Fu-tu-re" *81*
Abbildung 54 Plotbot/Crawler im deutschen Pavillon auf der Expo 2020 in Dubai (Quelle, expo2020.de „Die Architektur"; Url: https://www.expo2020germany.de/der-deutsche-pavillon/die-architektur/ [Zugriff am 22.12.2019] *81*
Abbildung 55 Plotbot/Crawler P1 *83*
Abbildung 56 mobile Basis Plotbot/Crawler P2 *84*
Abbildung 57 mobile Basis Plotbot/Crawler P3 *85*
Abbildung 58 Visualisierung Plotbot/Crawler P4 *86*

Publikationsliste

Siehe Kapitel "Publikationen"

Veranstaltungsliste

Siehe Kapitel "Ergebnistransfer / Messen"