Institut für Baubetrieb und Baumanagement
Prof. Dr.-Ing. Alexander Malkwitz

SCHRIFTENREIHE

Aileen Pfeil

Auslegung und Betrieb einer durch Seilrobotertechnik teilautomatisierten Baustelle

2024

Universität Duisburg-Essen

Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Abteilung Bauwissenschaften
Institut für Baubetrieb und Baumanagement

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor Ingenieur

über das Thema

Auslegung und Betrieb einer durch Seilrobotertechnik teil-automatisierten Baustelle

von M. Sc. Aileen Pfeil

Eingereicht am:	18.10.2023
Tag der mündlichen Prüfung:	31.01.2024
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Alexander Malkwitz
	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Schramm

Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb und Baumanagement
der Universität Duisburg-Essen
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Alexander Malkwitz

Aileen Pfeil

Auslegung und Betrieb einer durch Seilroboter-technik teilautomatisierten Baustelle

Shaker Verlag
Düren 2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9460-2
ISSN 2510-4977

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Automatisierung von Teilen der Bauproduktion ist eine wachsende Chance, die sich aus der Digitalisierung von Bauprojekten ergibt. Nachdem die Digitalisierung in der Planungsphase zunehmend eingesetzt wird, ist die automatisierte Produktion auf der Baustelle nur in sehr geringem Umfang entwickelt.

Dazu werden inzwischen verschiedene Ansätze verfolgt: An der Universität Duisburg-Essen werden seit einigen Jahren die Möglichkeiten der Seilrobotertechnik erforscht. Hier geht es vor allem um die automatisierte Herstellung von Rohbauten, insbesondere von Wänden und Decken aus Kalksandstein-Mauerwerk. Dabei wird ein digitales Gebäudemodell mit Hilfe von Informationstechnologie in ein Maschinensteuerprogramm umgesetzt, das dann Kalksandsteine automatisiert vermauert. Die Besonderheit gegenüber anderen Ansätzen der automatisierten Produktion besteht darin, dass alle Arbeiten auf der Baustelle ausgeführt werden und nicht in einem Werk zum Beispiel vormontiert oder vorproduziert werden. Es stellt sich die Frage, wie die Baustelle gestaltet und ausgelegt werden muss, um diese teilautomatisierte Produktion zu ermöglichen und vor allem auch wirtschaftlich und effizient ausführen zu können. Denn die Bedingungen unterscheiden sich ganz grundlegend von traditionellen Baustellen. Dabei ist zu beachten wie logistische, arbeits- und verfahrenstechnische Aspekte sowie sicherheitstechnische Aspekte berücksichtigt werden.

Hier setzt der Forschungsansatz von Pfeil an. Ziel war die Konzeption und Planung einer Baustellenproduktion, bei der die Rohbauerstellung mit Hilfe der Seilrobotertechnologie effizient und wirtschaftlich teilautomatisiert werden kann.
Systematisch entwickelt sie die notwendigen Handlungsfelder für die Planung einer durch Seilrobotertechnik betriebenen Baustellenproduktion. Dabei werden alle relevanten Bereiche bzw. Handlungsfelder der Planung der Baustellenproduktion betrachtet. Für jedes Handlungsfeld werden konkrete Gestaltungskriterien entwickelt, die die Produktionsplanung ausrichten und die Erfüllung aller Anforderungen sicherstellen. Dazu gehört auch ganz wesentlich, dass die teilautomatisierte Baustellenproduktion effizient und wirtschaftlich erfolgen kann. Um die Baustelle auch ganz konkret planen zu können, wird dies anhand der konkreten Vorgaben des an der Universität Duisburg-Essen entwickelten Seilroboters „Carlo“ an einem fiktiven Projektbeispiel entwickelt. Trotz dieses fiktiven Projektbeispiels bleiben die Lösungsansätze je Handlungsfeld allgemeingültig.

Frau Pfeil hat seit Jahren intensiv an der Entwicklung des Seilroboters „Carlo“ gearbeitet und ist daher mit den Besonderheiten dieses Forschungsansatzes bestens vertraut. Mit dieser spezifischen Expertise und ihrem wissenschaftlichen Know-how baubetrieblicher Prozesse und der Bauproduktionsplanung ist sie für die Entwicklung und Umsetzung dieses Forschungsansatzes besonders prädestiniert.

Für alle, die an der automatisierten Baustellenproduktion interessiert sind, stellt dieses Werk einen sehr wertvollen Beitrag zur Einführung der teilautomatisierten Produktion auf der Baustelle dar. Daher ist dem Werk eine breite Verbreitung zu wünschen.

Essen, im Februar 2024
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Malkwitz

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baubetrieb und Baumanagement der Universität Duisburg-Essen. An dieser Stelle möchte ich meinen aufrichtigen Dank an all diejenigen aussprechen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Malkwitz, bedanken. Als Leiter des Instituts für Baubetrieb und Baumanagement ermöglichte er mir die Verfassung dieser Arbeit. Aus seiner langjährigen Erfahrung konnte ich in vielen gemeinsamen Diskussionen immer relevante Forschungsansätze für die automatisierte Fertigung auf der Baustelle gewinnen und auch für die Strukturierung und Umsetzung dieser Arbeit nutzen.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Schramm, Leiter des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen, für die Erstellung des Zweitgutachtens. Bedanken möchte ich mich auch bei Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Carolin Birk für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Wittowsky und Herrn Prof. Dr.-Ing. André Niemann als weitere Mitglieder der Prüfungskommission.

Meinen Kollegen am Institut für Baubetrieb und Baumanagement danke ich herzlich für die vergangenen Jahre, die gemeinsamen Publikationen, die Zusammenarbeit an Forschungsanträgen und die schöne Zeit, die wir miteinander verbringen durften und noch verbringen werden. Auch den Kollegen am Lehrstuhl für Mechatronik möchte für die angenehme Zusammenarbeit und die Aufnahme in das „Robotik Team“ danken. Ohne die gemeinsamen Projekte, die vielen gemeinsamen Ideen und die gegenseitige Unterstützung auf fachlicher wie auf menschlicher Ebene, wäre diese Arbeit ebenfalls nicht möglich gewesen.

Bei meiner Familie möchte ich mich für die beständige Unterstützung bedanken und dafür, dass ich immer auf Euch zählen kann. Insbesondere meinem Mann möchte ich für die stetige Motivation und Unterstützung danken. Ohne diesen Rückhalt wäre das Verfassen dieser Dissertation nicht möglich gewesen. Vielen Dank dafür.

Essen, im Februar 2024
Aileen Pfeil

Kurzfassung

Auslegung und Betrieb einer durch Seilrobotertechnik teilautomatisierten Baustelle

Die Baubranche befindet sich in einer Phase der digitalen Transformation, die durch die Notwendigkeit von kostengünstigem und umweltfreundlichem Wohnraum, einem zunehmendem Fachkräftemangel sowie einer stagnierenden Produktivität angetrieben wird. Die Digitalisierung und der Einsatz von Automatisierungslösungen, insbesondere Robotern, werden als Lösungen für diese Herausforderungen betrachtet. Allerdings sind viele dieser Technologien noch gar nicht, oder nicht flächendeckend in der Baubranche angekommen, hauptsächlich aufgrund der traditionellen handwerklichen Arbeitsweise der Branche sowie mangelndem Wissen über die Anwendbarkeit. An dieser Stelle knüpft die Arbeit an. Es wird die Anwendung von Seilrobotertechnik auf Baustellen und deren Auswirkungen auf die Bauprozesse untersucht. Dabei werden die spezifischen Anforderungen und Herausforderungen berücksichtigt, die sich aus den Besonderheiten einer Baustelle ergeben. Diese Besonderheiten umfassen die Individualität und Unikatfertigung von Bauwerken, die ständig wechselnden Standorte und die Vielfalt der Umgebungsbedingungen, einschließlich Witterungsverhältnissen. Jede Baustelle erfordert eine maßgeschneiderte Infrastrukturplanung, die Aspekte wie Projektgröße, vorhandene öffentliche Infrastruktur, Baustoffversorgung und Lagermöglichkeiten, Bauzeit und Bauverfahren berücksichtigt. Diese Vielfalt stellt eine der zentralen Herausforderungen für die Einführung von Automatisierungstechnologien und im speziellen Seilrobotertechnik in der Bauindustrie dar.

Die Einführung von Seilrobotertechnik beeinflusst alle Aspekte der Bauproduktion und erfordert Veränderungen in der Planung und Durchführung von Bauprozessen. Daher ist es unerlässlich, sowohl die Entwicklung solcher Automatisierungstechnologien als auch die Anpassung der Bauprozesse und -bedürfnisse auf der Baustelle gleichzeitig anzugehen und individuelle Produktions- oder Baustellenkonzepte zu entwickeln.

In dieser Arbeit wird ein Baustellenkonzept für die automatisierte Erstellung von Mauerwerk und den Einbau von Fertigteildecken im Wohnungsbau entwickelt. Anhand einer Beispielbaustelle werden zunächst die Handlungsfelder identifiziert, welche maßgeblich durch den Einsatz eines Seilroboters beeinflusst werden. Anhand dieser werden im weiteren Verlauf systematisch die Herausforderungen herausgestellt und geeignete Teillösungskonzepte entwickelt und zu einem Gesamtbaustellenkonzept zusammengefügt. Insgesamt schafft diese Arbeit die Grundlage für die erfolgreiche Anwendung von Seilrobotertechnik auf Baustellen.

Abstract

Design and operation of a construction site partially automated by rope robot technology

The construction industry is undergoing a phase of digital transformation driven by the need for cost-effective and environmentally friendly housing, the growing shortage of skilled labour, and stagnant productivity. Digitalization and the adoption of automated solutions, especially robots, are considered as solutions to address these challenges. However, many of these technologies have not yet been widely adopted in the construction industry, primarily due to the industry's traditional craftsmanship and a lack of knowledge regarding their applicability. This is where the study intervenes.

The study investigates the application of cable-driven robots on construction sites and its impact on construction processes. It takes the specific requirements and challenges arising from the unique characteristics of construction sites into account. These characteristics include the individuality and customized production of buildings, constantly changing locations, and diverse and variable environmental conditions, including weather. Each construction site requires customized tailored infrastructure planning, considering different factors such as project size, existing public infrastructure, material supply, storage capabilities, construction timelines, and construction types. This diversity represents one of the central challenges for the introduction of automation technologies, specifically cable robot technology, in the construction industry.

The implementation of a cable-driven robot affects all aspects of construction and requires changes in the plan and execution of construction operations. Therefore, it is imperative to simultaneously address the further development of such automation technologies and their integration into construction processes. The individual requirements of each construction site motivate the conceptualization of a new construction-oriented framework as well coupled with automated solutions.

This new construction-oriented framework is designed specifically for the automated construction of masonry and the installation of precast concrete slabs in residential buildings. Being focused on a case-study, the study initially identifies the constructional aspects that are significantly influenced by the use of a cable-driven robot. Subsequently, the challenges are systematically highlighted based on these aspects, and suitable individual and unique solutions are firstly developed and then integrated into an overall construction-oriented framework. In conclusion, this work is indeed a basis for the successful application of cable robot technology on construction sites.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung, Zielsetzung und Forschungsfrage 1

1.1 Aktuelle Situation der Baubranche 1

1.2 Herausforderungen in der Baubranche und Problemstellung 1

1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage 3

1.4 Aufbau der Arbeit 4

2 Automatisierung, Robotik und Seilrobotertechnik auf der Baustelle 5

2.1 Automatisierung 5

2.1.1 Automatisierungsgrade 6

2.2 Robotik 7

2.2.1 Seilrobotik 10

2.3 Stand der Automatisierung 11

2.3.1 Automatisierung mit Seilrobotertechnologie in der Bauproduktion 13

2.4 Seilroboter *„CaRLO“* der Universität Duisburg-Essen 15

2.4.1 Endeffektor 16

2.4.2 Rahmen und Absetzvorrichtung 17

2.4.3 Antrieb und Bewegungssteuerung 18

2.4.4 Arbeitsraum 19

2.4.5 Bemörtelungseinheit 20

2.4.6 Verwendung und Funktionsweise 20

2.5 Building Information Modeling (BIM) als Voraussetzung für die Anwendung von Automatisierungstechnologien 22

3 Definition des Untersuchungsgegenstandes 24

3.1 Herleitung des Beispielprojektes und Definition des Gebäudetyps 24

3.2 Anordnung des Seilroboters und Simulation des Arbeitsraumes 25

3.3 Konkretisierung des definierten Beispielprojektes 29

4 Identifikation der Handlungsfelder und Definition der Gestaltungskriterien 32

4.1 Handlungsfelder für die Baustellenplanung und -organisation bei automatisierten Fertigungskonzepten 32

4.2 Gestaltungskriterien für die Entwicklung von Baustellenkonzepten für eine durch Seilrobotertechnik teilautomatisierte Baustelle 40

5 Entwicklung typischer Baustellenkonzepte für den Einsatz von Seilrobotertechnik 43

5.1 Teilkonzept für die Ablauf- und Terminplanung 43

5.1.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und zu berücksichtigende Anforderungen 43

5.1.2 Lösungskonzepte für die Ablauf- und Terminplanung 45

5.2 Teilkonzept für die Ressourcenplanung 59

5.2.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und zu berücksichtigende Anforderungen 59

5.2.2 Lösungskonzepte für die Ressourcenplanung 61

5.3 Teilkonzept für Schnittstellen zum digitalen Gebäudemodell 67

5.3.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und zu berücksichtigende Anforderungen 67

5.3.2 Lösungskonzept für die Schnittstellen zum digitalen Gebäudemodell 68

5.4 Teilkonzept für Folgegewerke und Mensch-Maschine-Kollaboration 70

5.4.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und zu berücksichtigende Anforderungen 70

5.4.2 Lösungskonzepte für Folgegewerke und Mensch-Maschine-Kollaboration 72

5.5 Teilkonzept für die Baustelleneinrichtung und die Baustellenver- und -entsorgung 73

5.5.1 Lagerflächen 73

5.5.1.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und resultierende Anforderungen 74

5.5.1.2 Lösungskonzepte für Lagerflächen 76

5.5.2 Verkehrswege 79

5.5.2.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und zu berücksichtigende Anforderungen 79

5.5.2.2 Lösungskonzepte für Verkehrswege 81

5.5.3 Containereinsatz 83

5.5.3.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und resultierende Anforderungen 83

5.5.3.2 Lösungskonzepte Containereinsatz 85

5.5.4 Baustellenver- und -entsorgung 87

5.5.4.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und resultierende Anforderungen 87

5.5.4.2 Lösungskonzepte Baustellenver- und entsorgung 89

5.6 Teilkonzept für die Arbeitssicherheit 90

5.6.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und resultierende Anforderungen 90

5.6.2 Lösungskonzepte Arbeitssicherheit 96

5.7 Teilkonzept für den Umweltschutz bzw. Schutz der Umgebung 109

5.7.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und resultierende Anforderungen 109

5.7.2 Lösungskonzepte Umweltschutz 111

5.8 Teilkonzept für die Baustellensicherung 112

5.8.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und resultierende Anforderungen 112

5.8.2 Lösungskonzepte Baustellensicherung 114

5.9 Teilkonzept für die Baustellenlogistik 115

5.9.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und resultierende Anforderungen 115

5.9.2 Lösungskonzepte Baustellenlogistik 119

5.9.2.1 Konzepte für die Produktionslogistik/Kommissionierung 119

5.9.2.2 Konzepte für die Transport-/Verkehrslogistik 120

5.9.2.3 Konzepte für die Herstellung/Materialbereitstellung 127

5.10 Teilkonzept für das Qualitätsmanagement 141

5.10.1 Herausforderungen durch den Einsatz von Seilrobotertechnik und resultierende Anforderungen 141

5.10.2 Lösungskonzepte für das Qualitätsmanagement 142

6 Weitere Entwicklungsmodule und Erweiterung der erstellten Konzepte 144

6.1 Flexibilität hinsichtlich der Herstellrichtung 144

6.1.1 Einbau von Wärmedämmung, Fassaden und Klinker 147

6.1.2 Einbau weiterer Bauelemente wie Fenster und Türen 148

6.2 Flexibilität hinsichtlich des Bauverfahrens 151

6.2.1 Mauerwerk und Betondruck 151

6.3 Flexibilität hinsichtlich kollaborativer Arbeiten 153

6.4 Flexibilität hinsichtlich der Dimensionen 153

7 Gesamtdarstellung 158

7.1 Einordnung der Ergebnisse und offene Fragestellungen 159

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die Automatisierungsgrade 6

Abbildung 2: Übersicht über die Anteile der verschiedenen Roboterarten 9

Abbildung 3: Seilroboter „CaRLO“ zum automatischen Erstellen von Kalksandstein-Mauerwerk ..16

Abbildung 4: Überblick über das Beispielprojekt 25

Abbildung 5: Abmessungen des Beispielprojektes und Anordnung des Seilroboters 26

Abbildung 6: Auszug aus dem Matlab Programm zur Auslegung und Überlagerung der berechneten Arbeitsräume 28

Abbildung 7: Doppelter Halbschnitt des Arbeitsraums des Seilroboters Carlo in verspannter Konfiguration 29

Abbildung 8: Abmessungen der Wände einer Einheit des Reihenhauses 30

Abbildung 9: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs anhand des klassischen Bauablaufs 32

Abbildung 10: Aspekte und Aufgaben bei einer klassischen Baubetriebsplanung und -durchführung im Rohbau 33

Abbildung 11: Handlungsfelder und -bedarfe bei der Baubetriebsplanung für ein Baustellenkonzept mit Seilrobotik 35

Abbildung 12: Handlungsfelder und -bedarfe bei der Baudurchführung für ein Baustellenkonzept mit Seilrobotik 38

Abbildung 13: Zusammenhang zwischen den Handlungsfeldern und den Gestaltungskriterien 40

Abbildung 14: Visualisierung des schichtenweisen Errichtungsprozesses 46

Abbildung 15: Konventioneller Bauablauf für typische Wohngebäude 46

Abbildung 16: Geänderter Ablauf bei einer schichtenweisen Errichtung der Gebäude 47

Abbildung 17: Parallelisierung von Tätigkeiten und Verbindung der Rohbau- und Innenausbauphase zu einer „Bauphase“ 48

Abbildung 18: Darstellung der Wege und Prozessdauern der Phasen B und E für den Laborgrundriss (links) und das Beispielprojekt (rechts) 51

Abbildung 19: Verwendung von zwei Endeffektoren in einem Gerüst 63

Abbildung 20: Nicht abgedeckter Arbeitsbereich bei zwei Endeffektoren 64

Abbildung 21: Beispielhafte Visualisierung einer Steinzerlegung im 3D-Modell 69

Abbildung 22: Beispielhafte Steinzerlegung und visuelle Darstellung des Verlegeplans in Matlab. 70

Abbildung 23: Verschiebung des Arbeitsbereichs des Seilroboters nach Errichtung des ersten Geschosses 73

Abbildung 24: Abmessungen für die Entladestelle von Mauerwerk in direkter Nähe zur Bemörtelung 82

Abbildung 25: Beispielhafter Bürocontainer als Schaltzentrale und Überwachung für den Seilroboter 86

Abbildung 26: Gefahrenbereich und Lage der notwendigen Schutzeinrichtung bei Errichtung des Erdgeschosses 98

Abbildung 27: Schnitt (links) und Ansicht (rechts) einer möglichen Schutzeinrichtung im Erdgeschoss 99

Abbildung 28: Lage der notwendigen Schutzeinrichtung bei Errichtung des Obergeschosses 100

Abbildung 29: Schnitt mit den möglichen Schutzeinrichtungen für ein paralleles Arbeiten im Erdgeschoss (EG) und Obergeschoss (OG) 101

Abbildung 30: Abmessungen und Einrichtung des Arbeitsplatzes zur Überwachung des Seilroboters 103

Abbildung 31: Lage und Abmessungen der nötigen Flucht-/Rettungswege sowie Notausgänge im Beispielprojekt 105

Abbildung 32: Phasen der Logistik einer Baustelle 116

Abbildung 33: Palettierungsmöglichkeiten für Steine 119

Abbildung 34: Mögliche Positionierungen der Bemörtelung und des Mauerwerklagers 121

Abbildung 35: Beispielhafte Anordnung einer Fläche „seitlich“ und einer „oben“ 122

Abbildung 36: Beispielhafte Anordnung beider Elemente „seitlich“ 123

Abbildung 37: Beispielhafte Anordnung beider Elemente „oben“ 124

Abbildung 38: Verkehrs- und Transportflächen für das gewählte Grundkonzept 125

Abbildung 39: Integration der Flucht und Rettungswege/Arbeitssicherheit im gewählten Grundkonzept 126

Abbildung 40: Seilroboter mit manueller Materialbereitstellung des Mauerwerks 128

Abbildung 41: Erweiterung des Rahmens über die Lagerfläche für Mauersteine 129

Abbildung 42: Erweiterung des Seilroboters durch einen zweiten Endeffektor (EF) für die Materialbereitstellung 132

Abbildung 43: Anordnung der Lagerfläche für Deckenbauteile „seitlich-innen“ 133

Abbildung 44: Ansicht der Materialbereitstellung durch einen Hilfsroboter 134

Abbildung 45: Anordnung eines Hilfsroboters zur Materialbereitstellung von Mauerwerk (maßstäblich) 135

Abbildung 46: Beispielhafte Anordnung der Paletten innerhalb des Arbeitsbereichs des Hilfsroboters 136

Abbildung 47: Anordnung des Hilfsroboters im Gesamtkonzept für das Beispielprojekt 137

Abbildung 48: Anordnung der Paletten „außerhalb“ des Arbeitsbereichs eines Hilfsroboters mit Förderband (links) und verfahrbar (rechts) 138

Abbildung 49: Beidseitig verfahrbarer Hilfsroboter 139

Abbildung 50: Übersicht über Qualitätssicherheitsmaßnahmen während der Nutzung des Seilroboters 142

Abbildung 51: Potenzielle Herstellrichtungen des Seilroboters 144

Abbildung 52: Schematische Darstellung eines möglichen vertikalen Arbeitsraums 145

Abbildung 53: Notwendige Verschiebungsrichtungen der oberen und unteren Seilrollen 146

Abbildung 54: Vakuumgreifer am Endeffektor zum Einbau von Fenstern 149

Abbildung 55: Seitlicher Einbau von Fenstern 150

Abbildung 56: Horizontales Versetzen des Seilroboters zur Errichtung verschiedener Bauabschnitte 154

Abbildung 57: Unterteilung in mehrere Bauabschnitte und Verschieben des Rahmens 155

Abbildung 58: Kletterfähigkeit des Seilroboters 156

Abbildung 59: Modulare Erweiterung des Rahmens und Anpassung der Roboterkomponenten 157

Abbildung 60: Beispielhaftes Gesamtkonzept für das betrachtete Beispielprojektes 158

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gesamtdarstellung des verwendeten Kalksandstein-Mauerwerks unter Berücksichtigung verschiedener Steinformate 31

Tabelle 2: Überblick über die Gestaltungskriterien für die effiziente- bzw. wirtschaftliche Konzeptionierung 41

Tabelle 3: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für die Ablauf- und Terminplanung 45

Tabelle 4: Repräsentative Prozessdauern der Phasen eines Setzprozesses und Bewertung der Relevanz für die Aufwandswertermittlung 50

Tabelle 5: Prozessdauern der automatisierten Mauerwerkserstellung für die Positionen P1 und P1* der Bemörtelungsanlage 52

Tabelle 6: Aufwandswerte verschiedener Steinformate unter Berücksichtigung der Position der Bemörtelungsanlage in [s/m³] 53

Tabelle 7: Aufwandswerte verschiedener Steinformate unter Berücksichtigung der Position der Bemörtelungsanlage in [h/m³] 53

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Richtzeiten des konventionellen Prozesses und der Aufwandswerte des automatisierten Prozesses 54

Tabelle 9: Aufwandswerte verschiedener KS-Quadro Steinformate unter Berücksichtigung der Position der Bemörtelungsanlage in [s/m³] 55

Tabelle 10: Aufwandswerte verschiedener KS-Quadro Steinformate unter Berücksichtigung der Position der Bemörtelungsanlage in [h/m³] 55

Tabelle 11: Prozessdauern des verwendeten Kalksandstein-Mauerwerks unter Berücksichtigung verschiedener Steinformate in [h] 56

Tabelle 12: Gegenüberstellung der Prozessdauern für den konventionellen und automatisierten Mauerwerkserstellungsprozess für verschiedene Arbeitszeiten 57

Tabelle 13: Aufwandswerte bei einer theoretischen Reduktion der Dauer pro Stein in [h/m³] 58

Tabelle 14: Gegenüberstellung der aktuellen und optimierten Gesamtdauer unter Berücksichtigung eines Betriebes von 16 h/AT für das Beispielprojekt 58

Tabelle 15: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für die Ressourcenplanung 60

Tabelle 16: Anzahl benötigter Steine in Abhängigkeit verschiedener Steinformate für das Beispielprojekt 65

Tabelle 17: Anzahl benötigter Steine pro Tag im Mehrschichtsystem in Abhängigkeit verschiedener Steinformate für das Beispielprojekt 66

Tabelle 18: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für die Schnittstellen zum digitalen Gebäudemodell 68

Tabelle 19: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für die Mensch-Maschine-Kollaboration 72

Tabelle 20: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für die Lagerflächen 75

Tabelle 21: Anzahl benötigter Paletten in Abhängigkeit verschiedener Steinformate für das Beispielprojekt 76

Tabelle 22: Lagerflächenbedarf in 24 Stunden zur kontinuierlichen Versorgung des Seilroboters 77

Tabelle 23: Maximaler Platzbedarf aller Paletten einer LKW-Beladung für das Beispielprojekt 78

Tabelle 24: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für die Verkehrswege 81

Tabelle 25: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für den Containereinsatz 85

Tabelle 26: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für die Baustellenver- und -entsorgung 89

Tabelle 27: Zusammenfassung der relevanten Schutzaspekte und die zugehörigen Vorschriften und Empfehlungen 95

Tabelle 28: Übersicht über die einzuhaltenden Grundsätze zum Schutz vor Absturz und dem Betreten von Gefahrenbereichen aus der Betrachtung der Baustelle als Arbeitsplatz 96

Tabelle 29: Übersicht über die einzuhaltenden Grundsätze zum Schutz vor Absturz und dem Betreten von Gefahrenbereichen aus der Nutzung von Robotern in der Arbeitsstätte 97

Tabelle 30: Übersicht über die in den Arbeitssicherheitskonzepten einzuhaltenden Grundsätze für Raumabmessungen und Bewegungsflächen 102

Tabelle 31: Übersicht über die in den Arbeitssicherheitskonzepten einzuhaltenden Grundsätze für Flucht-/Rettungswege und Notausgänge 104

Tabelle 32: Übersicht über die in den Arbeitssicherheitskonzepten einzuhaltenden Grundsätze für Brandgefahren 106

Tabelle 33: Übersicht über die in den Arbeitssicherheitskonzepten einzuhaltenden Grundsätze für Verkehrsflächen 107

Tabelle 34: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für den Umweltschutz bzw. Schutz der Umgebung 110

Tabelle 35: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für die Baustellensicherung 113

Tabelle 36: Übersicht über die Herausforderungen und resultierenden Anforderungen für die Baustellenlogistik 118

Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensionalität
AK	Arbeitskraft
AR	Augmented Reality
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift
BA	Bauabschnitt
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BIM	Building Information Modeling
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
CaRLO	Cable Robot for Large Scale Operations
CAD	Computer Aided Design
CAx	Computer Aided everything
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EF	Endeffektor
EG	Erdgeschoss
FD	Flachdach
IFC	Industry Foundation Classes
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
KI	Künstliche Intelligenz
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAN	Local Area Network
LE	Löscheinheiten
LKW	Lastkraftwagen

LKWÜberIStVAusnV	Verordnung über Ausnahmen von straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge
LOD	Level of Development
NU	Nachunternehmer
OG	Obergeschoss
RAB	Regeln zum Arbeitsschutz auf Baustellen
RAS	Richtlinie für die Anlage von Straßen
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
StellplatzVO	Stellplatzverordnung
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WLAN	Wireless Local Area Network