

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**

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 reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen 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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

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](http://www.baukunsterfinden.org)

Autoren:

Frederik Ecke, Helmut Fligge, Jan Juraschek und Heike Klussmann

Kassel, 31.12.2019

**U N I V E R S I T Ä T K A S S E L**  
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 farbstoffsensitvierten 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

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>AUSGANGSLAGE</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>PROJEKTAUFBAU</b>	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>Team</b>	<b>9</b>
<b>3.2</b>	<b>Methodologie</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>PROJEKTDURCHFÜHRUNG</b>	<b>11</b>
<b>4.1</b>	<b>Recherche und Untersuchungen zu Hardware Sensor-Aktor Maschinenkomponenten</b>	<b>11</b>
4.1.1	Fassadenklammer	11
4.1.2	Drohnen/Multikopter	11
4.1.3	Seil-/Parallelroboter	11
<b>4.2</b>	<b>Entwurf und funktionelle Entwicklung der Verfahrensschritte und Systemkomponenten</b>	<b>12</b>
<b>4.3</b>	<b>Plotbot/Crawler Prototyp P1</b>	<b>12</b>
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
<b>4.4</b>	<b>Plotbot/Crawler Prototyp P2</b>	<b>18</b>
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
<b>4.5</b>	<b>Zwischenfazit</b>	<b>27</b>
<b>4.6</b>	<b>Plotbot/Crawler Prototyp P3</b>	<b>30</b>
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 Verfahrswege 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 Verfahrswege 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

<b>4.7</b>	<b>Plotbot/Crawler Prototyp P4</b>	<b>54</b>
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
<b>9.2</b>	<b>Publikationen</b>	<b>82</b>
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>83</b>
<b>10.1</b>	<b>Generation der Prototypen</b>	<b>83</b>
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
<b>11</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>86</b>