

Auswahlverfahren für geeignete Deckensysteme zur Automatisierung der Rohbauerstellung

Selection procedure for suitable ceiling systems for the automation of the shell construction

Christoph Jeziorek, Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland, christoph.jeziorek@uni-due.de

Aileen Pfeil, Universität Duisburg-Essen, Institut für Baubetrieb und Baumanagement, 45127 Essen, Deutschland, aileen.pfeil@uni-due.de

Martin Piechullik, Universität Duisburg-Essen, Institut für Baubetrieb und Baumanagement, 45127 Essen, Deutschland, martin.piechullik@uni-due.de

Simon Romanowski, Universität Duisburg-Essen, Institut für Baubetrieb und Baumanagement, 45127 Essen, Deutschland, simon.romanowski@stud.uni-due.de

Robin Heidel, Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland, robin.heidel@uni-due.de

Roland Boumann, Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland, roland.boumann@uni-due.de

Patrik Lemmen, Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland, patrik.lemmen@uni-due.de

Alexander Malkwitz, Universität Duisburg-Essen, Institut für Baubetrieb und Baumanagement, 45127 Essen, Deutschland, alexander.malkwitz@uni-due.de

Tobias Bruckmann, Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland, tobias.bruckmann@uni-due.de

Kurzfassung

In einem vom Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Digitalisierung des Landes Nordrhein-Westfalen geförderten Projekt soll die Digitalisierung in der Bauwirtschaft vorangetrieben werden. Das Ziel ist es, wesentliche Teile des Rohbaus auf Basis eines digitalen Gebäudemodells automatisch mit parallelen Seilrobotern zu errichten. Nach der Realisierung der automatisierten Mauerwerkserrichtung soll die automatische Erstellung von Decken entwickelt werden. In diesem Beitrag wird der Auswahlprozess von Deckensystemen für die automatisierte Deckenerstellung beschrieben. Das Verfahren basiert auf drei im Detaillierungsgrad zunehmenden Bewertungsdurchläufen verschiedener Deckensysteme. Der erste Durchlauf ist eine Vorauswahl von Deckensystemen, die sich auf die Machbarkeit der Automatisierung und die Traglast des vorhandenen Seilroboters konzentriert. Der zweite Durchlauf umfasst eine detailliertere Analyse, die sich auf Wirtschaftlichkeitsmodelle, Errichtungszeiten, erwartete Akzeptanz, Anwendbarkeitsspektrum sowie Lager- und Logistikbedingungen bezieht. Im letzten Durchlauf soll das Legen der ausgewählten Deckensysteme mit einem bestehenden Seilroboter validiert werden, was zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung noch aussteht.

Abstract

In a project funded by the Ministry for Regional Identity, Local Government, Building and Digitalization of the Land of North Rhine-Westphalia, digitalization in the construction industry is to be advanced. The aim is to automatically build significant parts of the shell using parallel cable robots on the basis of a digital building model. After the realization of the automated masonry erection, the automatic creation of ceilings is to be developed. This paper describes the selection process of ceiling systems for automated ceiling production. The process is based on three evaluation runs of different floor systems with increasing levels of detail. The first run is a pre-selection of ceiling systems focusing on the feasibility of automation and the payload of the existing cable robot. The second run includes a more detailed analysis related to economic models, deployment times, expected acceptance, applicability spectrum, and storage and logistics conditions. The final run will validate the laying of the selected ceiling systems with an existing cable robot, which is still pending at the time of this publication.



1 Einleitung

Die Baubranche ist weitgehend von menschenzentrierten Prozessen und Verfahren geprägt. In der Umsetzung von Automatisierungsprozessen ist daher die Konzeption und Realisierung von Verfahren nötig, die eine Automatisierung nicht nur technisch ermöglichen, sondern auch wirtschaftlich und bauprozess technisch effizient umsetzen [3, 12, 15]. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit und eines kontinuierlichen Baufortschritts ist anzustreben, dass ein Seilroboter möglichst viele Arbeitsschritte der Bauprozesse selbstständig durchführen kann. Nach der erfolgreichen Demonstration des automatischen Setzprozesses von Kalksandsteinen durch einen Seilroboter der Universität Duisburg-Essen inklusive des Vermörtelns [9, 20] ist dabei der nächste bauprozess technisch notwendige Schritt das Errichten einer Rohbaudecke mit Hilfe des Seilroboters. Dieses Vorhaben wird vom Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Digitalisierung des Landes Nordrhein-Westfalen in einem Forschungsprojekt gefördert. Der adressierte Prozess hat die Anforderung, dass die Art der Deckensysteme für eine automatisierte Realisierung geeignet sein muss, was Gegenstand einer ersten Untersuchung innerhalb der Projektumsetzung ist. Die ersten Schritte entsprechender Analysen werden in diesem Beitrag dargelegt und sind Grundlage für die zukünftigen Forschungsarbeiten.

2 Stand der Technik

In der Baubranche ist es unumgänglich, geltende Vorschriften und Standards einzuhalten. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, auch für automatisierte Prozesse bereits zugelassene Deckensysteme zu bevorzugen, um aufwändige Genehmigungsverfahren zu vermeiden. Weiterhin erhöht die Verwendung von branchenüblichen Systemen die allgemeine Akzeptanz in der durch etablierte Verfahren, Werkstoffe und Methoden geprägten deutschen und internationalen Bauindustrie.

2.1 Deckensysteme im Wohnungsbau

Im Wohnungsbau finden verschiedene Deckensysteme Anwendung. Diese unterscheiden sich aufgrund des Baumaterials und den daraus resultierenden Eigenschaften in der Häufigkeit der Verwendung und bei der statischen Bemessung in Beton-, Holz- und Ziegelkonstruktionen. Des Weiteren sind bei jedem Material verschiedene Varianten der Ausführung vorhanden, sodass sich eine Vielzahl von einsetzbaren Deckensystemen ergibt.

Bei Verwendung von Geschossdecken in Betonbauweise kann zwischen Ortbeton, also einer Fertigung auf der Baustelle, Fertigelementdecken, bei denen ein vorgefertigtes Flächenelement mit Ortbeton ergänzt wird und Vollmontagedecken, d.h. komplett vorgefertigten Elementen, unterschieden werden [17]. Als weitere Alternative einer Betondecke können Hohlkörperdecken verwendet werden, welche aus vorgefertigten Betondielen mit innenliegenden Hohlräumen bestehen und somit ein geringeres Eigengewicht als Vollquerschnitte aufweisen. Allgemein

unterscheiden sich die Deckensysteme aus Beton auch im Grad der Vorfertigung und den damit verbleibenden Arbeitsschritten auf der Baustelle.

Holzdeckenkonstruktionen können in drei Kategorien eingeteilt werden: Man unterscheidet zwischen Holzbalkendecken mit tragenden Balken und einer aufgebracht flächigen Schalung als Tragkonstruktion, den Holzmassivdecken (z.B. Brettstapeldecken mit vertikal nebeneinander angeordneten Dielen) sowie Decken aus vorgefertigten Holztafel- oder Hohlkastenelementen [18].

Bei Ziegeldecken werden Hohlkörperziegel auf vorgefertigten Stahlbetonrippen aufgelegt, sodass diese gemeinsam tragend wirken. Die Zwischenräume der beiden Komponenten werden mit Beton vergossen [10].

Aufgrund bauphysikalischer, brandschutztechnischer und konstruktiver Anforderungen sowie aus wirtschaftlichen Aspekten, werden heute häufig Betondecken im Wohnungsbau verwendet [13].

In Abhängigkeit der verschiedenen Ausgangsmaterialien für die Geschossdecke gelten entsprechende Bemessungsvorschriften. Hierbei richtet sich die statische Bemessung nach den europäischen Normen, den sogenannten Eurocodes [4-7]. Als Grundlage für alle Bemessungen gilt dabei der Eurocode 1, welcher die anzusetzenden Lastannahmen festlegt. Die weiteren Eurocodes gliedern sich entsprechend den einzelnen Disziplinen des konstruktiven Ingenieurbaus. Weitere Anforderungen an die Konstruktionen können sich aus nationalen Normen (bspw. DIN), speziellen Planungshandbüchern [2] sowie aus bauphysikalischen Bedingungen wie dem Schall- oder Brandschutz ergeben. Außerdem müssen bei Verwendung von vorgefertigten Elementen die Angaben und Montageanleitungen der Hersteller beachtet werden.

2.2 Seilroboter

Seilroboter verfügen über eine Plattform, die durch angetriebene Seile bewegt wird. Die Plattform kann als Werkzeugträger dienen, aber auch Traglasten umfassen, die im Raum positioniert werden können. Die Verwendung von Seilen, die über Umlenkrollen durch Winden angetrieben werden, ermöglicht sehr große Arbeitsräume. Die Verwendung von Seilen als äußerst leichte kraftübertragende Elemente und dessen parallele Anordnung führen zu geringen zu bewegenden Eigenmassen des Seilrobotersystems und daraus resultierend großen Nutzlasten bei hoher Energieeffizienz und Dynamik. Eine vollständige Verspannung der Plattform mit redundanten Seilen macht das System robust gegenüber Störungen wie beispielsweise Wind [1].

Dieser mechanisch einfach und flexible Aufbau ermöglicht eine gute Skalierbarkeit der Arbeitsraumgröße und der möglichen Traglasten. Aufgrund dieser Eigenschaften sind Seilroboter gerade für großskalierte Anwendungen, wie das Errichten von Bauwerken, gut geeignet. So gibt es bereits einige Projekte, die sich mit der automatischen Erstellung von Gebäudestrukturen mit Seilrobotern befassen: In [21] wird das Mauern komplexer Strukturen an einem verkleinerten Maßstab dargestellt. In [14] wird beschrieben, wie Vorhangfassadenmodule automatisch an einem realitätsnahen Demonstrationsgebäude angebracht werden können. In [20] wird das automatische Vermörteln und Mauern von Kalksandsteinen demonstriert.

Der Arbeitsraum eines Roboters ist eine wichtige Kenngröße zur Klassifizierung. Speziell bei Seilrobotern ist die Berechnung der Arbeitsräume nicht intuitiv und muss numerisch berechnet werden. Eine ausführliche Darstellung der Klassifizierung und Berechnung von Seilrobotern ist in [19] dargestellt. Für die vorliegende Arbeit wird unter der Bezeichnung Arbeitsraum der „Wrench-Feasible-Workspace“ verstanden, also der Raum, der bei einer vorgegebenen Last unter Einhaltung von oberen und unteren Seilkraftgrenzen erreicht werden kann. Im Betrieb werden die Seilkräfte nach oben durch die Bruchlast der mechanischen Komponenten in der kinematischen Kette und nach unten zur Vermeidung von Durchhang begrenzt.

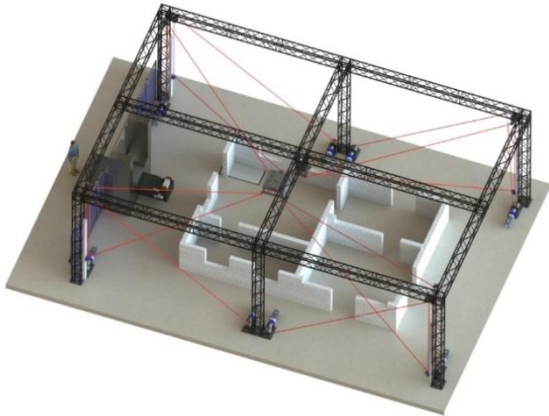


Bild 1 Seilroboter zum automatischen Erstellen von Mauwerk [11]

Der in [20] beschriebene Seilroboter der Universität Duisburg-Essen mit Namen *CarLO* (**C**able **R**obot for **L**arge-**S**cale **O**perations) soll auch zur Demonstration für das automatische Erstellen von Zwischendecken verwendet werden (siehe **Bild 1**). Der Seilroboter ist für eine Nutzlast von bis zu 100 kg über den gesamten Arbeitsbereich (9 x 6 x 3 m, Länge x Breite x Höhe) ausgelegt. Darüber hinaus besitzt der Prototyp die Besonderheit, dass die unteren Seilumlenkrollen im Betrieb vertikal verschoben werden können. Dies dient dazu, eine Kollision der Seile mit bereits gemauerten Wänden bei „wachsendem“ Gebäude zu vermeiden. Zusätzlich kann die Funktion dazu verwendet werden die Nutzlast zu erhöhen: Wenn alle unteren Umlenkrollen über die Höhe der Plattform verschoben werden, ziehen alle Seile nach oben, was zum Heben schwerer Lasten effektiver ist. Nachteilig ist, dass der Seilroboter dann nur noch durch Gewichtskräfte verspannt ist. Speziell ohne zusätzliche Nutzlast wirkt in diesem Fall nur noch die Gewichtskraft der Plattform. Damit sinkt der Widerstand gegen Störungen. Für diesen Fall ist weiterhin das Arbeitsraumvolumen durch die Forderung der Mindestseilspannung leicht reduziert.

3 Forschungsmethode

Das Ziel des Projektes ist das automatische Erstellen von Zwischendecken mit dem Seilroboter. Zur Erfüllung dieses Ziels muss ein Deckensystem gewählt werden, welches sowohl bautechnische und bauwirtschaftliche als auch Automatisierungstechnische Anforderungen erfüllt. Darüber hinaus sind geltende Vorschriften und Standards im Bau einzuhalten. Daher ist es sinnvoll, bereits zugelassene Deckensysteme zu bevorzugen, um aufwändige Genehmigungsverfahren zu vermeiden. Grundsätzlich ist die Ent-

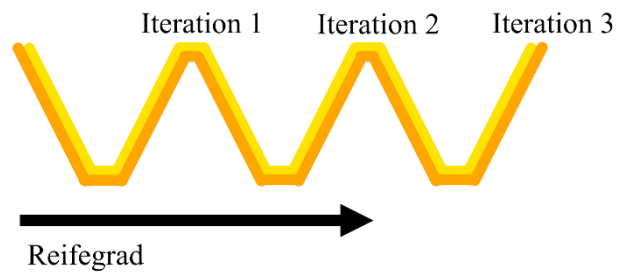


Bild 2 Fortschreitender Reifegrad im V-Modell. Angelehnt an [16]

wicklung neuer Deckensysteme im Rahmen des Vorhabens aber auch nicht ausgeschlossen.

Für eine strukturierte Bewertung der Deckensysteme wurde entsprechend der VDI 2206 [16] nach dem V-Modell für die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme vorgegangen. Dadurch ist der Entwicklungsprozess strukturiert und vereinfacht die Entwicklung komplexer technischer Systeme.

Zu Beginn des V-Modells steht die Anforderungserhebung. Dementsprechend werden alle Anforderungen an die Deckensysteme definiert und in Pflichtenanforderungen, die zwingend erfüllt werden müssen, und Wunschanforderungen gegliedert.

Für eine effiziente Bewertung der verschiedenen Deckensysteme wird ein iteratives Vorgehen gewählt und eine sukzessive Verknüpfung von drei V-Modellen verwendet. Mit jeder Iteration werden die Analysen, Simulationen und Modelle der verschiedenen Deckensystemen zunehmend detaillierter (siehe **Bild 2**). Um den Aufwand zu minimieren, sollen nicht geeignete Deckensysteme auf diese Weise schnell identifiziert und von einer weiteren Bewertung ausgeschlossen werden. Die Bewertung der verschiedenen Anforderungskriterien wird in allen Iterationsschritten von Expertinnen und Experten für Seilrobotik und Baumanagement wie im folgenden Kapitel beschrieben durchgeführt. Gegenstand der weiteren Betrachtungen in diesem Beitrag ist Iteration 1.

4 Konzept und Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Auswahl geeigneter Deckensysteme beschrieben. Vorbereitend für den gesamten Auswahlprozess wird eine repräsentative Liste verschiedener zugelassener Deckensysteme erstellt. Diese Liste umfasst dabei 46 gängige Deckensysteme von verschiedenen Herstellern.

4.1 Anforderungserhebung

Für die Auswahl geeigneter Deckensysteme sind zunächst die Anforderungen für die geplante Demonstration zu erheben. Wie bereits in der Einleitung beschrieben, konnte das automatische Mauern und Vermörteln von Mauersteinen bereits demonstriert werden. Auf diesem erstellten Mauerwerk soll nun das Legen von Zwischendecken demonstriert werden. Das Bauwerk hat die Maße eines kleinen Einfamilienhauses. Das Mauerwerk hat keine vollständige Geschosshöhe, da der Bauraum durch die Größe der Versuchshalle begrenzt ist und zunächst nur die prinzipielle Machbarkeit der beteiligten Bauprozesse nachgewiesen werden soll. Für diese Demonstration sind die Anforderungen aus systemtechnischer, baubetrieblicher und prozesstechnischer Sicht zu berücksichtigen. Darüber hinaus werden für künftige Projekte Anforderungen für die Demonstration an einer realitätsnahen Baustelle im Außenbereich mit aufgenommen und dokumentiert.

Dazu wurden die für die Selektion der Deckensysteme notwendigen Anforderungen strukturiert erhoben und dargestellt. Auf dieser Basis können die Anforderungen außerdem thematisch geordnet werden.

Im nächsten Schritt werden die Anforderungen in Pflicht- und Wunschanforderungen priorisiert. Die Pflichtanforderungen sind möglichst zu quantifizieren, so dass objektiv geprüft werden kann, ob die Deckensysteme diese erfüllen. Die Wunschanforderungen können genutzt werden, um unter allen verbleibenden, grundsätzlich geeigneten Deckensystemen das optimale System zur Automatisierung zu finden.

4.2 Umsetzung von Iteration 1

Im ersten Iterationsschritt werden Deckensysteme aussortiert, die sich prinzipiell als ungeeignet für den betrachteten Anwendungsfall herausstellen. Diese erste Beurteilung erfolgt größtenteils auf Basis von Produktdatenblättern, Abschätzungen und überschlägigen Berechnungen. Als Ergebnis dieses Bewertungsschrittes werden alle Deckensysteme ausgewählt, deren Errichtung als grundsätzlich automatisierbar gilt. Die übrigen Deckensysteme werden im weiteren Prozess nicht weiter berücksichtigt.

Im Folgenden werden sechs Pflichtanforderungen, welche zwingend für die Automatisierbarkeit erfüllt werden müssen, vorgestellt. Einerseits steht für die geplante Demonstration die Realisierbarkeit unter Laborbedingungen im Fokus, wodurch Limitationen hinsichtlich der Gebäude- und Roboterabmessungen sowie der verfügbaren Lager- und Logistikflächen in den Anforderungen verankert werden müssen. Parallel wird im Sinne einer Fortführung der Entwicklungsarbeiten die Situation auf einer realitätsnahen

Baustelle betrachtet und für den perspektivischen Einsatz berücksichtigt.

Geometrische Pflichtenforderungen

Die Deckenelemente für die geplante Demonstration müssen eine Mindestspannweite von 4,10 m aufweisen. Die Maßangabe ergibt sich aus der Geometrie des Versuchsgrundrisses. Innerhalb des Grundrisses fordert der breiteste Raum eine Spannweite von 3,90 m. Um das Element sicher an beiden Enden auf dem Mauerwerks auflagen zu können und die Mindestauflagertiefe erfüllen zu können, ist somit die genannte Mindestspannweite erforderlich. Darüber hinaus sind kürzere Spannweiten für typische Einfamilienhäuser ungeeignet und daher auch perspektivisch nicht sinnvoll. Es wird hierbei eine Mindestspannweite (Länge ohne sonstige Unterstützung) und nicht die Mindestlänge (Länge mit ggf. notwendiger Unterstützung) definiert, da das Element im Endzustand ohne Zwischenauflagerung oder Unterstützung errichtet wird. Die Anforderung der Mindestspannweite variiert somit je nach Grundriss.

Eine weitere Anforderung bezieht sich auf die Bauteillogistik vor dem eigentlichen Setzprozess. Im betrachteten Fall wird der Setzprozess in einer Werkhalle stattfinden. Diese ist räumlich begrenzt, sodass die Lagerfläche neben dem Gebäudegrundriss eingeschränkt ist. Aufgrund des verfügbaren Platzes in der Halle, der Größe des Roboterrahmens und der Zugänglichkeit zum Arbeitsraum ergibt sich für die Deckenelemente eine maximale Länge von 6 m und eine maximale Breite von 1,20 m.

Die nächste Anforderung legt fest, dass die Deckenelemente grundsätzlich für den Seilroboter handhabbar sein müssen. Der Seilroboter muss dafür einen Arbeitsraum aufweisen, der alle Arbeitsbereiche, die für das Erstellen der Zwischendecke nötig sind, unter der geforderten Nutzlast abdeckt. Begrenzt wird der Arbeitsraum insbesondere durch die geforderte Traglast. Grundsätzlich kann die Traglast von Seilrobotern leicht skaliert werden. Allerdings steigen die Investitionskosten mit stärkeren Antrieben. In diesem Projekt soll das Setzen der Decken mit dem bestehenden Seilroboter *CaRLO* realisiert werden. Beim Mauern sind Nutzlasten von 100 kg zum Transport von Stürzen ausreichend. Entsprechend ist der vorhandene Seilroboter für diese Nutzlast ausgelegt worden. Die Deckenelemente werden deutlich schwerer sein. Daher ist die Nutzlast des Seilroboters unter alternativen Konfigurationen neu zu bewerten:

Es werden Arbeitsraumberechnungen mit unterschiedlichen Nutzlasten bei hängender und verspannter Konfiguration durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in **Bild 3** und **Bild 4** dargestellt. In den Grafiken ist das zu bauende Gebäude im zweifachen Halbschnitt dargestellt, sodass ein Viertel des Bauwerks ersichtlich ist. Die Position der unteren Umlenkrollen wurden in der Berechnung auf die mechanisch maximale Höhe für *CaRLO* festgelegt. Für diese hängende Konfiguration zeigt die Grafik, dass eine Nutzlast bis ca. 1000 kg möglich ist. Der Bereich ist allerdings sehr klein und technisch nicht sinnvoll nutzbar. Wenn die Seilrollen auf minimale Höhe eingestellt sind (siehe **Bild 4**) ist die Nutzlast kleiner. Allerdings ist,

wie in Kapitel 2.2 beschrieben, dass der Arbeitsraum bei geringen Nutzlasten gerade im unteren Bereich größer ist als in der hängenden Konfiguration. Die Plattform des Seilroboters muss die langen Deckenelemente mittig greifen. Wenn die Deckenelemente die gesamte Gebäudebreite überspannen, muss die Plattform die nötige Nutzlast lediglich entlang der Längsachse oberhalb des Gebäudes bewegen.

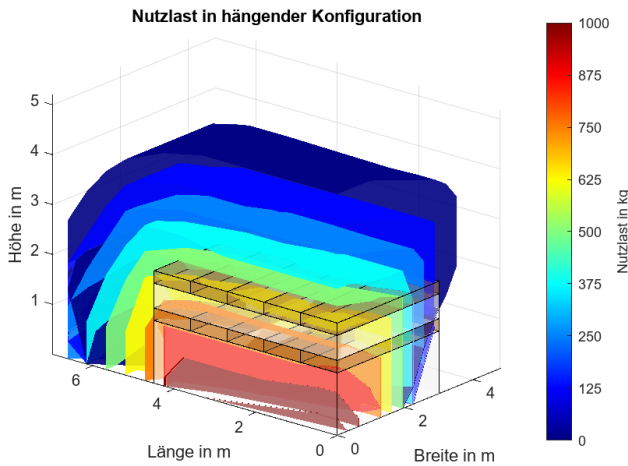


Bild 3: Doppelter Halbschnitt durch den Arbeitsraum des Seilroboters *CaRLO* in hängender Konfiguration mit geplantem Gebäude. Mauern (weiß), Deckenelemente (beige)

So ergibt sich eine mögliche Nutzlast von 350 kg in der hängenden Konfiguration (siehe **Bild 3**) für die Aufgabe des automatischen Deckenlegens mit dem bestehenden Seilroboter.

Weiterhin wurden für den zukünftigen Einsatz von Seilrobotern auf einer realen Baustelle Berechnungen mit zehnfach größeren Nutzlasten (3500 kg) durchgeführt. Bei diesem potentiellen Einsatz werden auch Deckensysteme berücksichtigt, die nicht mit dem bestehenden Seilroboter gelegt werden können. Um diese Verfahren trotzdem mit dem vorhandenen Seilroboter *CaRLO* demonstrieren zu können, werden in dem aktuellen Projekt entweder Lösungen zum Einsatz kommen, die möglichst schmale und somit leichte Elemente benutzen, oder es wird auf leichte repräsentative Modelle eigentlich massiver Deckenelemente zurückgegriffen.

Prozesstechnische Pflichtenforderungen

Einige Deckensysteme fordern einen vollflächigen Auftrag von Ortbeton. Der Auftrag von Beton mit Seilrobotern ist beispielsweise in [8] gezeigt. Allerdings sind für Zwischendecken sehr große Mengen an Beton zu bewegen. Grundsätzlich kann der Beton in einem Reservoir an der Plattform des Seilroboters transportiert werden, aber aufgrund der hohen Dichte kann dies nur in einem geringen Volumen erfolgen. Alternativ kann der Beton kontinuierlich mit einer Betonpumpe über die Plattform appliziert werden. Bei einem typischen Schlauchdurchmesser von 65 mm bei einer notwendigen Länge von 9 m über das gesamte Bauwerk ergibt sich ein ungefähres Gewicht von 70 kg, das undefiniert Kraft auf die Plattform ausübt. Diese Störung ist speziell in der hängenden Konfiguration

kritisch. Zusätzlich würde die große unkontrollierte Masse des Zuführungsschlauchs die Dynamik der Plattform erheblich stören, sodass davon abgesehen wird. Zusätzlich sind für vollflächige Ortbetonschichten umfangreiche Vor- und Nachbehandlungen nötig: So muss Bewehrung gelegt und verbunden werden und der Beton muss verdichtet und nivelliert werden. Darüber hinaus sind für die Aushärtung der Betonschicht lange Trocknungszeiten nötig, die das Errichten des gesamten Gebäudes erheblich verzögern. Aus diesen Gründen werden Deckensysteme ausgeschlossen, die eine vollflächige Ortbetonschicht fordern. Sofern Deckensysteme für die Verfüllung von Fugen oder für einen notwendigen Ringanker jedoch kleine Mengen Ortbeton benötigen, sind solche vergleichsweise geringen Volumina an Beton jedoch kein Ausschlusskriterium.

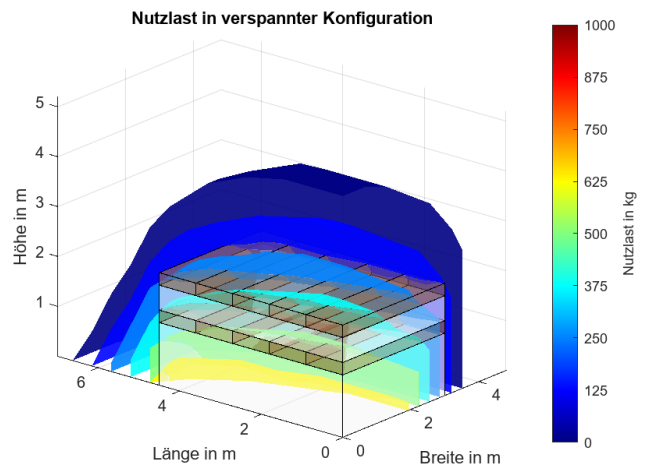


Bild 4: Doppelter Halbschnitt durch den Arbeitsraum des Seilroboters *CaRLO* in verspannter Konfiguration mit geplantem Gebäude. Mauern (weiß), Deckenelemente (beige)

Weiterhin sollen keine Bewehrungsmatten durch den Seilroboter gelegt werden. Grundsätzlich ist es denkbar, dass der Seilroboter einzelne Bewehrungseisen auf den zuvor platzierten Elementen verlegt, speziell die Verbindungen von Bewehrungselement durch Verdrahten oder Verschweißen wird allerdings als sehr schwierig eingestuft. So ist bereits die automatische Positionserkennung der Verbindungsstellen mechatronisch sehr komplex, da diese an variablen Positionen aufzufinden sind. Die manuelle Erstellung der Bewehrung würde die Akzeptanz des Systems deutlich senken und soll daher vermieden werden.

Die letzte Pflichtenforderung stellt eine möglichst weitgehende Automatisierung sicher: Der nötige Eingriff durch Personen darf nicht hochfrequent und nur punktuell erfolgen. Der Mensch soll die Anlage nur rüsten, vor- und nachbereiten sowie im Betrieb (fern-)überwachen. Daher werden Deckensysteme, deren Erstellung kontinuierliche menschliche Unterstützung benötigt, ausgeschlossen.

Nun wurde geprüft, welche der 46 Deckensysteme alle zuvor erläuterten sechs Pflichtenforderungen erfüllen. Nur die verbleibenden Systeme werden für die weitere Auswahl berücksichtigt. 15 Deckensysteme erfüllen alle Pflichtenforderungen.

Wunschanforderungen

Die 15 nun verbleibenden Deckensysteme wurden nach zwölf Wunschanforderungskategorien bewertet, deren Gewichtung in **Tabelle 1** zu sehen ist. Die Gewichtungen wurden in der Expertenrunde durch einen paarweisen Vergleich bestimmt.

Tabelle 1 Übersicht der Wunschanforderungskategorien und zugehörige Gewichtungen

<i>Wunschanforderungskategorie</i>	<i>Gewichtung in %</i>
Maßtoleranzen	10
Verbindungen (konstruktiv)	11
Komplexität	13
Zusatzarbeiten	11
Greifen und Montieren	32
Automatisierungspotenzial	8
Kosten	5
Liefermodalitäten	3
Statik	2
Bauphysik	0
Anlieferung	5

Maßtoleranzen

Für einen reibungslosen Arbeitsablauf des Roboters ist es wichtig, Elemente zu verbauen, deren Soll- und Ist-Maße produktionsbedingt bis auf wenige Millimeter übereinstimmen. Ansonsten bestünde die Gefahr einer ungewollten Überlappung. Auch ein zu kurzes bzw. zu schmales Element ist problematisch, da somit Lücken entstehen oder die Elemente nicht mehr ausreichend weit ineinandergreifen. Die Maßtoleranz der Deckenelemente spiegelt sich im weiteren Verlauf des Projektes in Anforderungen an das Seilrobotersystem wider. Bei der automatischen Manipulation muss ein Greifer die Deckenelemente wiederholgenau greifen können. Daher müssen ggf. verwendete und in der Produktion angebrachte Anker möglichst genau an den Elementen positioniert sein, um von dem Seilroboter gezielt angesteuert werden zu können. Die Anforderung der Maßgenauigkeit ist jedoch nicht nur bezüglich der Produktion der Elemente von Bedeutung, sondern unterliegt ggf. auch später materialbedingten Schwankungen. In Bezug auf den Werkstoff Holz sind die Verformungen, die sich aus Kriechen und Schwinden ergeben, als problematisch anzusehen. Teilweise können hier Sensorsysteme im Seilrobotersystem kompensieren.

Im erhärteten und unbelasteten Zustand treten bei Beton- und Ziegeldecken nur sehr geringe Verformungen auf. Dieser Sachverhalt ist ebenfalls in dieser Anforderungskategorie zu berücksichtigen.

Verbindungen und automatisierte Montage

Des Weiteren wird geprüft, wie aufwendig es ist, die konstruktiv erforderliche Endauflagerverbindung sowie die

Verbindung zwischen den Elementen automatisch auszuführen.

Bei der Behandlung dieser Anforderung ist die Zahl der nötigen Verbindungsprozessschritte ein entscheidender Indikator. Zudem gilt es zu berücksichtigen, wie technisch anspruchsvoll die Arbeitsschritte sind, beispielsweise bezüglich der hierbei notwendigen Präzision. Dieses Themenfeld wird aus zwei Perspektiven beleuchtet:

Die konstruktive Sicht bezieht sich auf die Anzahl und Komplexität der notwendigen Tätigkeiten, die grundsätzlich zum Erstellen der Decken nötig sind. Das Spektrum reicht von einfachem Ab- und Nebeneinanderlegen der Elemente bis zum aufwendigen Erstellen von Ringankern und Betonfugen.

Aus Sicht der Automatisierung kommen zusätzliche Herausforderungen hinzu, wenn es um die automatisierte Realisierung dieser Tätigkeiten geht. So ist beispielsweise das Einpassen von Elementen zwischen mehreren Bauteilen nur mit großem messtechnischem Aufwand möglich. Das Verbinden von Elementen durch das Ausüben großer Kräfte ist für einen Seilroboter durch die Begrenzung der Seilkräfte sehr schwierig. Die Verwendung von Hämmern, wie es in der manuellen Erstellung von Decken üblich ist, ist durch den Stoß eine Herausforderung für die Seilkraftregelung. Entsprechend der beiden Perspektiven gibt es jeweils eine eigene Anforderungskategorien.

Komplexität

Um die Komplexität eines Deckensystems zu bewerten, wird die Gesamtanzahl der nötigen Arbeitsschritte und die Anzahl der benötigten Elemente betrachtet. Die Arbeitsschritte beim Setzen von Deckenelementen sind traditionell auf die manuelle Durchführung abgestimmt und oft nur schwer in der Automatisierung zu adaptieren. Daher ist teilweise der Eingriff des Menschen in den automatisierten Prozess eine einfache Lösung. Jedoch gilt es, dies im Sinne der Wirtschaftlichkeit strikt zu vermeiden oder, falls unvermeidbar, auf definierte Phasen zu minimieren. Als benötigtes Element gilt jedes Teil, was im Deckensystem verbaut wird. Bei vielen verschiedenen Elementen bzw. Elementabmessungen sind ggf. Greifer- und Werkzeugwechsel erforderlich. Die Anzahl dieser Wechsel und die Anzahl der verschiedenen Werkzeuge ist gering zu halten, um die Investitionskosten und Entwicklungsaufwand für die Werkzeuge zu reduzieren. Zusätzlich erhöhen Werkzeugwechsel die Prozesszeit, was die Produktivität senkt.

Zusatzarbeiten

Zusatzarbeiten sind Arbeitsschritte, die vor bzw. nach dem Setzprozess zu erledigen sind. Einige Arbeitsschritte setzen entweder zusätzliche Funktionen des Seilroboters oder ein Eingreifen von Menschen voraus. Das Ziel ist ein hoher Grad der Automatisierung. Dafür sollten möglichst wenige Zusatzaufgaben nötig sein, die zudem leicht zu automatisieren sein sollen.

Greifen

Durch diese Anforderungskategorie soll sichergestellt werden, dass die Deckenelemente wiederholgenau, zuverlässig und ohne ungewolltes Fallenlassen gegriffen und transportiert werden können. Dafür werden mögliche Greifpunkte bezüglich des Zugangs und einer kraft- oder formschlüssigen Verbindungsmöglichkeit analysiert. Eine formschlüssige Verbindung ist aufgrund der nicht notwendigen Klemmkräfte zu bevorzugen. Der Zugang zu Greifpunkten von der Oberseite der Elemente hat den Vorteil, dass während der Montage keine Hindernisse, wie darunterliegende Wände oder bereits gelegte Deckenelemente, stören. Zusätzlich wird geprüft, ob ein Greifen ohne eine kontinuierliche Energiezufuhr möglich ist. Dies ist im Falle eines Energieausfalls, wenn das Element nicht mehr gehalten werden kann, aus sicherheitstechnischer Sicht kritisch. Weiterhin wird geprüft, wie die Greifpunkte in Form und Position variieren, was mitunter zusätzliche Anforderungen an einen Greifer stellt.

Weitere Wunschanforderungskategorien

Neben den bereits zuvor erläuterten Wunschanforderungskategorien wurden weitere, vor allem bautechnisch geprägte Kategorien, ermittelt. Diese umfassen das Automatisierungspotenzial aller einzelnen Prozessschritte (zum Beispiel das Setzen von Bewehrung), sowie Stoff- und Ausführungskosten, Liefermodalitäten (Standardmaße, Sonderanfertigungen und Lieferzeiten), statische und bauphysikalische Anforderungen und die Anlieferung der Bauteile. Die Stoff- und Ausführungskosten dienen der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit, welche Voraussetzung für den zukünftigen Einsatz des Systems ist. Statische und bauphysikalische Anforderungen sollen nach aktuellem Stand der Technik berücksichtigt werden, um aufwendige Genehmigungsprozesse und Prüfungen zu vermeiden. Die Kategorie Anlieferung der Bauteile umfasst logistische Anforderungen. Diese ergeben sich insbesondere durch die eingeschränkten Flächen in der Laborumgebung. Die genannten Anforderungskategorien weisen jedoch, wie in Tabelle 1 dargestellt, eine geringe Gewichtung auf, da zunächst die grundsätzliche Machbarkeit des Deckenlegens nachgewiesen werden soll.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde der erste Schritt zur Auswahl geeigneter Deckensysteme zur Rohbauerstellung vorgestellt. Dabei wurden Anforderungen ermittelt, die an 46 identifizierte Deckensysteme gestellt wurden. Mithilfe von sechs Pflichtanforderungen wurden ungeeignete Deckensysteme von weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Zur weiteren Auswahl der übrigen Deckensysteme wurden zwölf Wunschkategorien vorgestellt, welche verschiedenste Wunschanforderungen beinhalten. Innerhalb dieser Wunschkategorien wurden Gewichtungen berücksichtigt, um die ungleiche Anzahl der Wunschanforderungen je Kategorie und die entsprechende Relevanz zu berücksichtigen.

Die weiteren Iterationsschritte innerhalb der Lösungsfindung sind nicht mehr Teil dieses Beitrags.

In Iteration 2 sollen die ausgewählten Deckensysteme auf Basis von detaillierten Wirtschaftlichkeitsmodellen, Errichtungszeiten, erwarteter Akzeptanz, Anwendbarkeitspektrum sowie Lager- und Logistikbedingungen vertieft bewertet werden. Das Legen der verschiedenen Deckensysteme soll auf Basis von physikalischen Mehrkörpermodellen simuliert werden. Dafür werden zunächst die nötigen Trajektorien unter Berücksichtigung der physikalischen Rahmenbedingungen mittels numerischer Optimierung bestimmt. In der Simulation werden diese Trajektorien anschließend abgefahren, um die Belastungen, Energieverbräuche und den benötigten Zeitbedarf des Seilroboters zu erhalten. Die Simulation umfasst unter anderem Regler-, Seil- und Antriebsmodelle und wird innerhalb der Software MATLAB/Simulink erfolgen.

Die Ergebnisse dienen der vertieften Analyse und validieren die Auswahl der Deckensysteme, um das automatisierte Verlegen an der realen Anlage umsetzen zu können.

Im letzten Schritt des laufenden Projekts sollen in Iteration 3 die ausgewählten Deckensysteme automatisch mit dem Seilroboter *CaRLO* gesetzt werden, um die Lösungskonzepte experimentell zu validieren. Zur Realisierung dieser Aufgabe müssen die nötigen Werkzeuge entwickelt und die entsprechenden Schnittstellen am Endeffektor des Seilroboters erweitert werden. Dabei wird auch ein automatischer Werkzeugwechsel angestrebt.

Wie bereits erwähnt, wurde die Anforderungserhebung mit dem Fokus auf der Realisierung unter Laborbedingungen durchgeführt. So ergeben sich beispielsweise harte Begrenzungen hinsichtlich des Gewichtes der einzelnen Bauteile und deren Abmessungen. Jedoch wird eine zukünftige Durchführung auf einer realitätsnahen Baustelle in allen Iterationsstufen parallel berücksichtigt. Dennoch ist festzuhalten, dass aufgrund der Individualität jeder Baustelle Abweichungen in den Parametern der Anforderungen möglich sind, deren Variabilität zukünftig in Einzelprüfungen adressiert werden müssen. Die hier vorgestellte Anforderungsanalyse für ein System zur automatisierten Zwischendeckenerstellung kann dazu als Basis dienen und bietet die nötige Flexibilität, um die zukünftige Umsetzung auf Baustellen untersuchen zu können und eine Umsetzung unter realen Bedingungen zu erreichen.

6 Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Digitalisierung des Landes Nordrhein-Westfalen im Rahmen der Projekte "Langfristige experimentelle Untersuchung und Demonstration von automatisiertem Mauern und 3D-Druck mit Seilrobotern" und "Auf dem Weg zur digitalen Bauausführung: Automatisierung des Rohbaus mit Seilroboter-Technik" gefördert.

7 Literatur

- [1] Bruckmann, T.; Boumann, R.: *Simulation and optimization of automated masonry construction using cable robots*, Advanced Engineering Informatics (2021) Volume 50, ISSN 1474-0346.
- [2] Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (Hrsg.): *Kalksandstein – Planungshandbuch*. Düsseldorf, Verlag Bau+Technik GmbH, 2018.
- [3] Brehm, Eric; Wurl, Christian: *Mauerwerksroboter für die Baustelle – internationaler Stand*. MAUERWERK KALENDER. (2021) 46, ISBN 978-3-43-361073-2, S. 241-248.
- [4] DIN EN 1991:2015-12 - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke.
- [5] DIN EN 1992:2015-03 - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken.
- [6] DIN EN 1995:2014-07 - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten.
- [7] DIN EN 1996:2013-02 - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten.
- [8] Hahlbrock, D., Braun, M., Heidel, R. *et al.* Cable Robotic 3D-printing: additive manufacturing on the construction site. *Constr Robot* 6, 305–318 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00082-3>
- [9] Heidel, R.; Lemmen, P.; Boumann, R.; Bruckmann, T.: *Auslegung und Inbetriebnahme eines Seilroboters zum automatisierten Mauern von Gebäudewänden*. In: VDI Mechatronik, Darmstadt, Germany, 23–24 March 2022; S. 126–132.
- [10] Hestermann, U.; Rongen, L.: *Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1, 36. Auflage*, Wiesbaden, Springer Fachmedien, S. 372 f.
- [11] Herrmann L, Boumann R, Lehmann M, Müller S, Bruckmann T. *Simulation-Based Comparison of Novel Automated Construction Systems*. ROBOTICS. 2022; 11(6):119. <https://doi.org/10.3390/robotics11060119>. Bildtitel: *A cable-driven robot used for the autonomous masonry of a building*. Lizenz: CC BY 4.0
- [12] Hu, R.; Linner, T.; Bock, T.: SMARTBEE: A Framework of Single/Multi-task On-site Adaptable Renovation Robot Technology for Building Engineering Enhancement. In: Proceedings of the CIB*IAARC W119 (2016) Workshop.
- [13] Informationszentrum Beton GmbH (Hrsg): *Beton-Bauteile für den Wohnungsbau*, 2019
- [14] Iturralde, K.; Feucht, M.; Illner, D.; Hu, R.; Pan, W.; Linner, T.; Bock, T.; Eskudero, I.; Rodriguez, M.; Gorrotxategi, J.; Izard, J.B.; Astudillo, J.; Cavalcanti Santos, J. Gouttefarde, M.; Fabritius, M.; Martin, C.; Henninge, T.; Nornes, S.M.; Jacobsen, Y.; Pracucci, A.; Cañada, J.; Jimenez-Vicaria, J.D.; Alonso, R.; Elia, L.: *Cable-driven parallel robot for curtain wall module installation*. AUTOMATION IN CONSTRUCTION. (2022) 138, ISSN 0926-5805.
- [15] Melenbrink, Nathan; Kassabian, Paul; Menges, Achim; Werfel, Justin: *Towards Force-aware Robot Collectives for On-site Construction*. In: ACADIA 2017 DISCIPLINES + DISRUPTION. S. 382-391.
- [16] Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2021
- [17] Pech, A. (Hrsg.): *Decken*, Fachbuchreihe Baukonstruktionen, Band 5, Wien, SpringerWienNewYork, 2015, S. 23-56.
- [18] Pech, A. (Hrsg.): *Decken*, Fachbuchreihe Baukonstruktionen, Band 5, Wien, SpringerWienNewYork, 2015, S. 86-88.
- [19] Pott, Andreas. *Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application*. Cham: Springer, 2018.
- [20] Roske, T.; Lipowsky, Justus; Palzer, Ulrich; Eden, Wolfgang; Schäfers, Martin; Lemmen, Patrik; Heidel, Robin; Boumann, Roland; Spengler, Arnim; Bruckmann, Tobias: *Automatisierter Bau von Kalksandstein-Mauerwerk mit Seilrobotern*. MAUERWERK. (2021) 25, ISSN 1437-1022, S. 82-89.
- [21] Wu, Yulong; Cheng, Hung Hon; Fingrut, Adam; Crolla, Kristof; Yam, Yeung; Lau, Darwin: *CUBrick cable-driven robot for automated construction of complex brick structures: From simulation to hardware realisation*. In: 2018 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAR). ISBN 978-1-5386-5974-8. S. 166-173.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub

universitäts
bibliothek

In: Neunte IFToMM D-A-CH Konferenz 2023

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/77398

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20230314-165911-9



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0) genutzt werden.