

# Energieeffiziente automatisierte Produktionstechnologie für energieeffiziente modulare, nachhaltige Leichtbaugebäude

E. Budras<sup>1</sup>, S. Krause<sup>1</sup>, F. Arnold<sup>2</sup>, L. Penter<sup>2</sup>, S. Kalmbach<sup>3</sup>, L. Blandini<sup>3</sup>, A. Kunke<sup>4</sup>, N. Weidensager<sup>4</sup>, F. Klimant<sup>4</sup>, M. Lahl<sup>5</sup>, C. Fleischer<sup>5</sup>, R. Haase<sup>6</sup>, M. Ziegler<sup>6</sup>, J. Jakubzyk<sup>7</sup>, H. Ott<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Institut für Strukturleichtbau und Energieeffizienz gGmbH

<sup>2</sup> Technische Universität Dresden

<sup>3</sup> Universität Stuttgart

<sup>4</sup> Technische Universität Chemnitz

<sup>5</sup> LF Elektro GmbH, <sup>6</sup> Drechsler Haustechnik GmbH

<sup>7</sup> Metallbau Ott GmbH

## Abstract

Der Beitrag präsentiert Ergebnisse aus einem aktuell laufenden kooperativen FuE-Verbundvorhaben - DigiConCyc. Gegenstand des Vorhabens ist die Entwicklungen innovativer Fertigungstechnologien für modulare, energieeffiziente Leichtbaugebäude auf Modulbasis, bei gleichzeitiger Reduzierung von Treibhausgasemissionen einschließlich einer hoch skalierbaren Produktion und flexiblen Nutzung der zu entwickelnden Leichtbaugebäude.

Ziel ist die Entwicklung einer technologischen Lösung für die industrielle Massenproduktion individueller Leichtbaugebäude auf Modulbasis, einschließlich der Entwicklung automatisierter Fertigungsprozesse für die Montage kompletter Raummodule unter Verwendung robotergestützter CAD-CAM-Technologien und der Berücksichtigung der automatisierten Verlegung und Verbindung elektrischer und elektronischer Anlagentechnik sowie von geeigneten HVAC-Lösungen für eine energieeffiziente Klimatisierung der Gebäude gemäß benutzerspezifischer Anforderungen.

## 1. Einleitung und Motivation

Der Bedarf an Wohnraum steigt kontinuierlich aufgrund wachsender Bevölkerungszahlen, zunehmender Urbanisierung und veränderter Lebensgewohnheiten. Besonders in Ballungsräumen führt dies zu einer Verknappung bezahlbarer Wohnungen, was soziale Spannungen und wirtschaftliche Herausforderungen nach sich zieht. Eine nachhaltige Wohnraumentwicklung ist daher entscheidend, um gesellschaftliche Bedürfnisse zu erfüllen und die Lebensqualität zu sichern.

Vorteile für Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Bauflexibilität bietet im Gebäudebau der Einsatz von Leichtbau-Lösungen. Durch die Reduzierung des Materialverbrauchs werden Ressourcen geschont und Baukosten gesenkt. Geringere Baulasten erlauben innovative Konstruktionen und eine schnellere Bauweise, was Zeit und Geld spart. In Zeiten steigender Umweltaforderungen und des Fokus auf nachhaltiges Bauen ist Leichtbau eine Schlüsseltechnologie zur Minimierung des ökologischen Fußabdrucks von Gebäuden.

Zur Erreichung der angestrebten Ziele eines klimaneutralen Gebäudebestands in Deutschland wird gemäß Positionspapier des größten Netzwerks zum Thema Leichtbau Deutschlands [1] die Leichtbautechnologie als eine Schlüssellösung zur Verbindung hoher wirtschaftlicher Potentiale mit Ressourcenschutz sowie Material- und Energieeffizienz angewendet.

Aktuell werden nach Angaben der NRW Bank [2] circa 85 % der Wohngebäude in Massivbauweise errichtet, wobei Mischformen aus Massiv- und Leichtbauweise immer häufiger werden. Durch die Anwendung von Leichtbau in Form des modularen Containerbaus können gegenüber dem konventionellen Massivbau nachstehende Vorteile realisiert werden (vgl. [3]):

- 20 bis 30 % niedrigere Gesamtkosten [4], [5]

- hoher Vorfertigungsgrad und damit einhergehende kurze Montagezeiten
- nachhaltig und ressourcenschonend durch Leichtbau und den Einsatz recycelter und recyclebarer Materialien
- Einsatz baubiologisch unbedenklicher Materialien
- anspruchsvolle architektonische Gestaltung
- Schadensunanfälligkeit für Baumängel (keine Baufeuchte/Trockenbau)
- Erfüllung der EnEV und DGNB-Richtlinien

Die bauphysikalischen Schwächen herkömmlicher Leichtbaugebäude, wie ein geringes Wärmespeichervermögen, unzureichende Wärmedämmung und schlechter Schallschutz, lassen sich durch den Einsatz innovativer Materialien wirksam beheben.

Der Marktbedarf für serielle modulare Gebäude ergibt sich aus den Berechnungen der Bauexperten der Unternehmensberatung McKinsey, wonach Wohnungsunternehmen künftig vermehrt auf die modulare Bauweise setzen werden [6]. Zudem zeigt eine Studie auf Basis quantitativer Befragungen, dass insbesondere Architekten in Zukunft modulares und serielles Bauen der traditionellen Bauweise vorziehen [7].



**Abbildung 1: architektonisch ansprechende Ausführungsformen von Einfamilienhäusern**

Die Möglichkeit architektonisch ansprechender Ausführungsformen von modularen Gebäuden für Einfamilienhäuser zeigt beispielhaft Abbildung 1. Mit diesem architektonischen Anspruch an verschiedene Gebäudetypologien wird nicht nur den aktuell geforderten Wohnstandards entsprochen, sondern darüber hinaus eine flexible Anpassung an verschiedene Lebenssituationen ermöglicht.

Der aktuelle Stand der automatisierten Fertigung modularer Gebäude wird in einem Forschungsprojekt der TU Dortmund, der DGJ Architektur GmbH und der Internationale Bauausstellung Thüringen GmbH dargestellt. Die Untersuchung, präsentiert auf der „Central Europe towards Sustainable Building Conference 2016“, analysierte verschiedene Hersteller hinsichtlich des Automatisierungsgrades in Bereichen wie Rohbau, technische Gebäudeausstattung, Innenausbau, Fassade und Dachkonstruktion. Die Ergebnisse zeigen, dass bei keinem der untersuchten Hersteller ein hoher Automatisierungsgrad erreicht wurde [8]. Viele Produktionsschritte werden weiterhin manuell ausgeführt, ohne maschinelle Unterstützung. Automatisierte oder halbautomatisierte Systeme beschränken sich überwiegend auf die Materialverarbeitung und den Transport der Module mittels Schienensystemen.

## 2. Zielstellung und Konzeptentwicklung

Das Ziel ist die Entwicklung einer technologischen Lösung zur industriellen Serienproduktion individualisierter Leichtbaugebäude auf Modulbasis. Dazu gehört die Schaffung automatisierter Fertigungsprozesse für die Montage vollständiger Raummodule mithilfe robotergestützter CAD-CAM-Technologien. Ein Schwerpunkt liegt auf der automatisierten Installation und Verbindung elektrischer und elektronischer Systeme sowie auf der Integration effizienter HVAC-Lösungen für eine energieoptimierte Klimatisierung gemäß benutzerspezifischen Anforderungen.

Die geforderten Lösungen müssen eine energieeffiziente, ganzjährige Klimatisierung (Heizung, Kühlung, Frischluftzufuhr) gewährleisten und den Passivhausstandard anstreben. Der

Energieverbrauch soll dabei durch den bevorzugten Einsatz integrierter regenerativer Energiesysteme (wie Photovoltaik, Solarthermie, PVT-Module, Geothermie oder Biomasse) sowie optional durch den Anschluss an energieeffiziente externe Wärmeversorgungen (z. B. Nah- oder Fernwärme) minimiert werden.

Darüber hinaus werden eine nutzerfreundliche, smarte Steuerung sowie eine flexible Medienführung für die individuelle Regelung der Klimatisierung innerhalb der Module gefordert, einschließlich variabler Innenwände. Die Lösung muss nicht nur robotergerecht in die Modulbaugruppen integriert, sondern vor allem auch mit geringen Montageaufwendungen vor Ort gekoppelt, d.h. leicht und prozesssicher verbunden werden können.

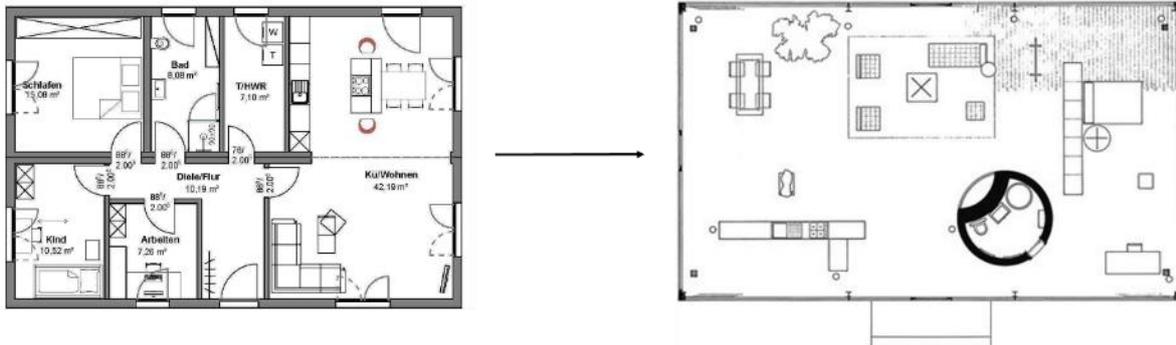
Aus diesen Zielen lassen sich für das Verbundvorhaben folgende Teilentwicklungen ableiten:

- Entwicklung massentauglicher CAD/CAM-gestützter Fertigungstechnologien auf der Grundlage innovativer Blechbearbeitungs- und Umformtechnologie sowie verfahrenstechnische Übertragung dieser Technologie auf Leichtbau-Raum-Module
- Entwicklung robotergestützter Technologien zur Automatisierung der Modulfertigung und -montage (Umformprozesse, Schweißprozesse, Montageprozesse, etc.) zur industriellen Vorfertigung modularer Gebäude
- Entwicklung automatisierbarer Verschaltungstechnologien für das Verlegen von Kabelsträngen zur Elektroversorgung und Elektronik der Raum-Module
- Fertigungs- und Montagetechnologie für das Einbringen universaler Schnittstellen für elektrische/elektronische Medien und Medienversorgung
- Entwicklung robotergestützter Montagetechnologien für Leichtbaugerechte Klimatisierungslösungen, die sich in den automatisierten Fertigungs- und Montageprozess der Raum-Module einbinden lassen
- Materialflussoptimierung (Einbeziehung von Recyclinglösungen sowie von Rezyklaten)
- Entwicklung architektonischer Konzepte für energieeffiziente modulare Gebäude in Abhängigkeit regionaler Bauweise und der Klimazone sowie unter Berücksichtigung von Quartierslösungen
- Erzielung einer Flexibilisierung der Fertigungs- und Montagetechnologien modularer Gebäude in Abhängigkeit der Nutzungsarten der Gebäude (z. B. Ausstattung)
- Etablierung eines Virtuellen Zwillings als zentrale Entwicklungs- und Demonstratorplattform

Nachstehend werden einige Entwicklungsschwerpunkte näher beschrieben.

## 2.1 Architektonisches Konzept:

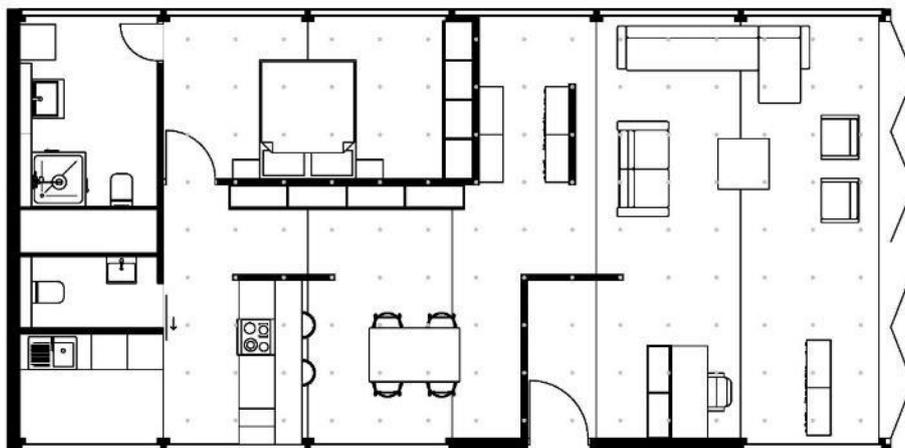
Die Entwicklungen in Digitalisierung, Globalisierung und individualisierten Lebensstilen haben den Übergang von der Moderne zur Hypermodernen geprägt, in der ständiger Wandel durch technologischen und ideologischen Fortschritt unvermeidlich ist. In diesem Kontext zielt das architektonische Konzept auf Flexibilität und Individualisierung ab. Nutzer sollen sowohl die Raumaufteilung frei gestalten als auch die Größe des Wohngebäudes durch modulare Erweiterungen oder Reduktionen flexibel anpassen können. In Abbildung 2 wird die Richtung hin zu einer offenen Raumgestaltung gezeigt, die es dem Nutzenden erlaubt, sich von den festen Raumeinteilungen zu lösen.



**Abbildung 2: Vision der Raumgestaltung; Auftrennung von festen Raumeinteilungen in einen frei zu gestaltenden Raum**

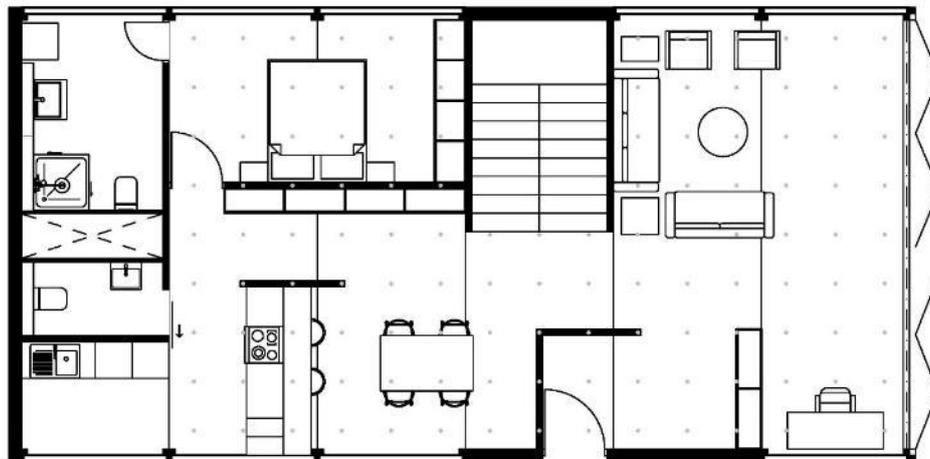
Neue Wohnkonzepte sind notwendig, um der Vereinsamung entgegenzuwirken. Eine mögliche Lösung bietet ein modulares Gebäudesystem, das eine flexible Erweiterung des Wohnraums erlaubt, wenn die Familie wächst – beispielsweise durch die Geburt von Kindern, die Pflege von Eltern oder den Wunsch nach mehr Platz. Die Erweiterung sollte dabei sowohl in der Fläche als auch in der Höhe realisierbar sein, um maximale Anpassungsfähigkeit zu gewährleisten.

Um unterschiedliche Bedürfnisse, Wohnszenarien und Umnutzungen zu adressieren, werden verschiedene modulare Wohneinheiten und Gebäudeszenarien konzipiert. Dabei reichen die Entwürfe von der Gebäudeklasse der Einfamilienhäuser über mehrstöckige Bürogebäude bis hin zu Wohnheimen. Das konsequent modular erarbeitete Konzept erlaubt es, unterschiedliche Module zu kombinieren, um den vielfältigen Anforderungen und Bedürfnissen der Bewohner gerecht zu werden. Die erste Wohneinheit besteht aus sechs Modulen, welche auf einer Ebene angeordnet sind und bietet eine Fläche von ca. 100 Quadratmetern, konzipiert für den Wohnbedarf von 2-3 Personen.

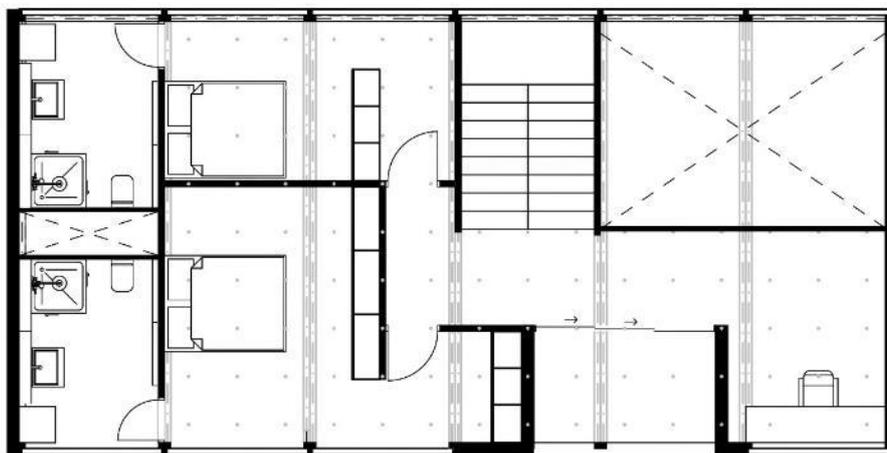


**Abbildung 3: Wohneinheit 100 m² - Einstöckig**

Die zweite Wohneinheit erstreckt sich über zwei Geschosse und umfasst eine Fläche von ca. 200 Quadratmetern und besteht aus 12 Modulen (siehe Abbildung 4,5), was sowohl für Wohngemeinschaften als auch für kleine Familien geeignet ist. Die dritte Wohneinheit erstreckt sich über zwei Stockwerke mit je ca. 100 Quadratmeter großen Wohnungen und ist so gestaltet, dass es als Mehrfamilienhaus genutzt werden kann.



**Abbildung 4: Wohneinheit 200 m<sup>2</sup> - Zweistöckig; Erdgeschoss**



**Abbildung 5: Wohneinheit 200 m<sup>2</sup> - Zweistöckig; Obergeschoss**

Die unterschiedlichen Gebäudetypologien wurden durch die Entwicklung und Anpassung eines Raum-Moduls erreicht, aus dem verschiedene Modultypen für spezifische Anforderungen abgeleitet werden. Dazu gehört das TGA-Modul, das neben der Haustechnik auch die gesamte Kücheneinrichtung, die sanitären Anlagen sowie die technische Gebäudeausrüstung (TGA) integriert. Ergänzend wurde ein Treppenmodul entwickelt, das eine flexible vertikale Erschließung der Wohnräume ermöglicht.

Zur Erfüllung der Anforderungen an Individualisierung, Skalierung und Energieeffizienz wurden zwei zusätzliche modulare Komponenten entwickelt. Erstens flexible Innenwandmodule, die dank Bolzenverbindungen in einem 80 x 80 cm-Raster frei positionierbar sind, was vielfältige Raumkonfigurationen ermöglicht. Die Module bieten eine hohe Anpassungsfähigkeit und erlauben Nutzern eine einfache Umgestaltung der Raumaufteilung. Zweitens eine klappbare modulare Fassade, die solare Gewinne nutzt, indem sie im geöffneten Zustand Sonnenlicht hereinlässt, während sie im geschlossenen Zustand die Wärmedämmung verbessert und vor nächtlicher Auskühlung schützt. Gleichzeitig dient sie als Witterungsschutzdach, dargestellt in Abbildung 6.



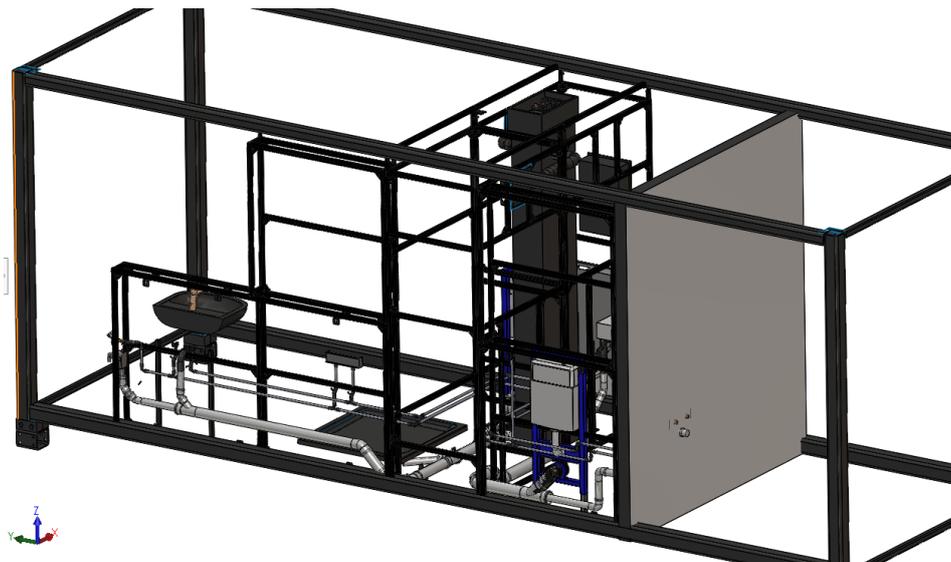
**Abbildung 6: Außenansicht des Einfamilienhauses mit innovativen klappbaren Fassadensystem**

## 2.2 Integration der Gebäudetechnik

Das Ziel ist es, den Nutzern maximale Flexibilität in der Nutzung ihrer Wohngebäude zu ermöglichen und gleichzeitig die Kosten sowie den Aufwand für sanitäre Anlagen und Medienführung niedrig zu halten. Gleichzeitig soll ein hoher Wohnkomfort gewährleistet werden, der Optionen wie eine separate Gästetoilette, eine Badewanne und eine großzügige, offene Küche umfasst. Das entwickelte TGA-Modul vereint Küche, sanitäre Einrichtungen und Gebäudetechnik in einer kompakten, effizienten Einheit, die sowohl nutzerfreundlich als auch technisch durchdacht ist.

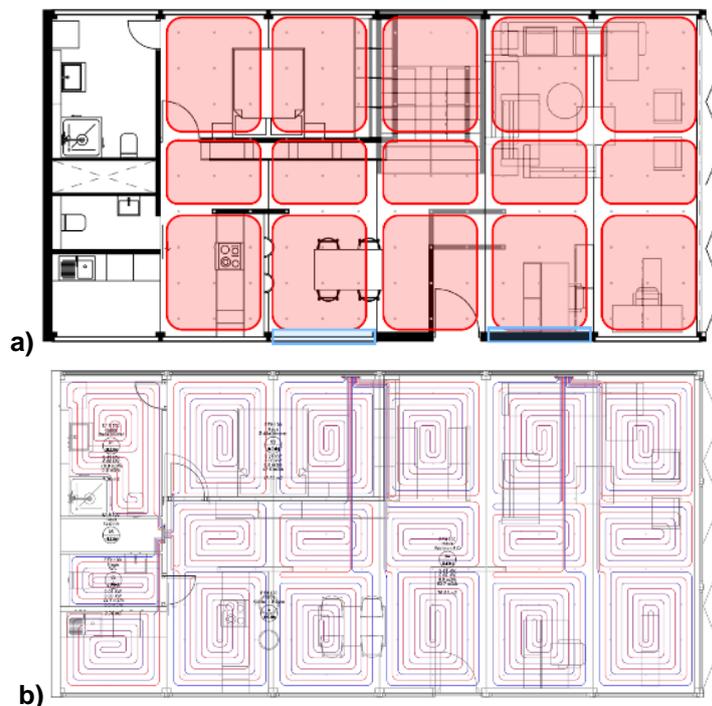
Die Steuerung des Systems erfüllt die Anforderungen an Skalierbarkeit, flexible Anpassbarkeit und die Möglichkeit zur Kombination mehrerer Module. Sie berücksichtigt wesentliche Faktoren wie Luftqualität, Temperatur, Feuchtigkeit, Strahlungsintensität und Verfügbarkeit von natürlichem Licht, um Komfort und Energieeffizienz zu optimieren. Sicherheit, insbesondere der Brandschutz, spielt dabei eine zentrale Rolle. Auch die effiziente Lenkung der Energieströme ist entscheidend und basiert auf solaren Strahlungsgewinnen sowie der Nutzung regenerativer Energien, beispielsweise durch Photovoltaikanlagen.

Die Entwicklung des Medienkonzeptes umfasst auch die konzeptionelle Spezifizierung der erforderlichen Sensorik. Das umfasst die Auswahl und Planung der Installationskomponenten (wie z.B. Steckdosen, Lichtschalter, Datenanschlüsse, Geräteanschlüsse) unter Berücksichtigung von festgelegten Ausstattungswerten nach RAL-RG 678. Die für die Steuerung des Energiemanagementsystems erforderliche Sensorik umfasst Sensoren für das Detektieren der folgenden MSR-Größen: Temperatur, Feuchte, Helligkeit, Anwesenheit, CO<sub>2</sub>, Luftqualität und Rauch (Brandschutz). Um eine optimale Ausleuchtung der verschiedenen Raum-Module bei flexibler Raumgestaltung zu gewährleisten, wurde für die Beleuchtung ein Konzept einer homogenen Verteilung von 4 Beleuchtungsausgängen pro Raum-Modul entwickelt. Die hierfür entwickelten Kabelstränge werden dezentral mittels einem Hauptkabelstrang und Nebenkabelsträngen in den Dach- und Bodenbaugruppen eines Raum-Moduls integriert. Die Übergabe-Möglichkeiten zwischen den Raum-Modulen müssen unter Berücksichtigung der robotergerechten Fertigungstechnik geplant werden.



**Abbildung 7: TGA-Modul bestehend aus Haupt- und Nebenregister**

Für das TGA-Modul umfasst die weitere Entwicklung die Haupt- und Nebenregister (siehe Abbildung 7) sowie die Kopplungssysteme für einen mehrstöckigen Gebäudeaufbau. Für die Raum-Module werden modulare Bauelemente mit integrierter Heiz- und Kühlfunktion entwickelt, die in der Dach- und Bodenbaugruppe robotergerecht verbaut werden können. Für die Integration dieser Elemente stehen sowohl wassergeführte wie auch elektrische Systeme zur Auswahl, die in Kombination mit dem Flächenaufbau aus Dämmmaterialien, statischen Ebenen, Außen- und Innenabschlüssen robotergerecht montiert werden sollen.



**Abbildung 8: Aufteilung der Flächenheizelemente für eine flexible Raumanordnung und Ansteuerung; a) Konzept für EFH 100 m<sup>2</sup>, b) Auslegung der Fußbodenheizung für die Heizlastberechnung mit Nebenverteilern**

Für die Dimensionierung und Detailplanung robotergestützt installierbarer Klimatisierungssysteme wurden quasi-dynamische Heizlastberechnungen für verschiedene solare Szenarien (z. B. mit „offenen“ oder „abgedeckten“ Fenstern) durchgeführt. Dabei konnten unter anderem die erforderlichen Energiemengen für die Beheizung (26–41 W/m<sup>2</sup>) sowie die notwendigen Betriebsparameter für den effizienten Betrieb der Leichtbaugebäude, wie etwa eine Vorlauftemperatur von 35 °C für die Flächenstrahlungsheizung, bestimmt werden.

Zur Beheizung der Raum-Module wurde eine energieeffiziente Flächenstrahlungsheizung entwickelt. Dieses robotergerecht vorgefertigte Trockenbausystem besteht aus einer isolierenden Basisplatte mit gefrästen Führungskanälen für wasserführende Leitungen, die von einem Wärmeleitblech abgedeckt werden. Die Kombination aus thermischer Isolierung und Heizfunktion bietet den Vorteil einer geringen Aufbauhöhe von etwa 10 cm, was zu einem großzügigen Raumgefühl beiträgt.

Die Steuerung der Heizkreisläufe erfolgt über speziell entwickelte Verteiler, die in einer Sockelleiste integriert sind, dargestellt in Abbildung 8b. Die Ausführungsplanung sieht drei Heizkreisläufe pro Raum-Modul mit variierender Flächenabdeckung vor, was eine flexible Gestaltung des Innenraums ermöglicht. Diese Lösung gewährleistet hohen Wohnkomfort (Behaglichkeit) und erlaubt gleichzeitig eine nutzerspezifische Klimatisierung, bei der die Temperatur individuell an die Anforderungen verschiedener Raumbereiche innerhalb eines Moduls angepasst werden kann.

### 2.3 Virtueller Zwilling

In der Baubranche wird der virtuelle Zwilling eingesetzt, um den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks – von der Planung über den Bau bis zur Instandhaltung – digital abzubilden und effizienter zu gestalten. Zu den wichtigsten Anwendungen zählen die Planung und das Design, bei denen ein digitales 3D-Modell des Gebäudes architektonische, strukturelle und technische Details simuliert. Zusätzlich ermöglicht die Simulation von Bauprozessen eine präzise Planung der Bauphasen, die Erkennung potenzieller Kollisionen oder Engpässe sowie die Optimierung der Abläufe, wodurch Zeit und Ressourcen eingespart werden. Während der Bauausführung unterstützt der virtuelle Zwilling durch Echtzeit-Baustellenüberwachung, bei der Sensoren den Baufortschritt und die Materialnutzung erfassen. Auch die Bauqualitätssicherung profitiert von der Technologie, indem Toleranzen und Abweichungen zwischen der geplanten und der realen Konstruktion überprüft werden.

Im Betrieb und bei der Wartung eines Gebäudes wird der virtuelle Zwilling genutzt, um den Energieverbrauch, die Klimatisierung und den Wartungszustand zu überwachen. Durch die Integration von Sensordaten wird prädiktive Wartung möglich, bei der Verschleiß und Defekte frühzeitig erkannt und behoben werden können. Auch für nachhaltige Bauprojekte leistet der virtuelle Zwilling einen wichtigen Beitrag: Energieeffizienzanalysen simulieren Energieflüsse, Tageslichtnutzung und Klimatisierung, um den Verbrauch zu optimieren, während Lebenszyklusanalysen den Ressourcenverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Bilanz während der Nutzungsphase berechnen. Insgesamt verbessert der virtuelle Zwilling die Zusammenarbeit, senkt Kosten und steigert die Nachhaltigkeit, indem datenbasierte Entscheidungen in allen Phasen des Bauprojekts unterstützt werden.

In diesem Projekt soll der virtuelle Zwilling begleitend zu der konzeptionellen Planung die unterschiedlichen Fertigungs- und Montageprozesse visualisieren, um einzelne Raum-Module und letztendlich ein gesamtes Gebäude darzustellen. Damit ist es möglich den Entwicklungs- und Planungsprozess für die angestrebte automatisierte Modulfertigung der Leichtbaugebäude zu unterstützen und z. B. mit Kollisionsprüfung die Zugänglichkeit und Fertigbarkeit zu prüfen. Für diesen Teil des virtuellen Zwillings als Entwicklungsplattform werden vor allem die Kerndaten benötigt, die unter anderem 3D-Modelle von Maschinen und Bauteilen, die Prozessfolgen, technische Zeichnungen und Simulationsergebnisdaten umfassen. Abschließend wird mit dieser Anwendung eine Planungsgrundlage geschaffen, die die Nestfertigung eines Raum-Moduls in allen Fertigungsschritten abbildet. Zusätzlich werden Demonstrator-Anwendungen festgelegt, in denen die Live-Daten der Roboter aus der Testzelle der TU Dresden, beziehungsweise von Umformmaschinen der TU Chemnitz mit Hilfe des virtuellen Zwillings visualisiert werden sollen (siehe Abbildung 8). Diese

Realdaten werden unabhängig von Prozessbeschreibungen aus den Kerndaten genutzt, um ausgewählte Prozessschritte vorab zu visualisieren. Die Einbindung dieser Daten ist ebenfalls entkoppelt von den Kerndaten mit Hilfe von OPC-UA als Kommunikationsschnittstelle möglich.



**Abbildung 9: Abbildung der Benutzeroberfläche des Virtuellen Zwillings am Beispiel einer Fertigungskette mit einer Walzanlage und einem Schweißprozess**

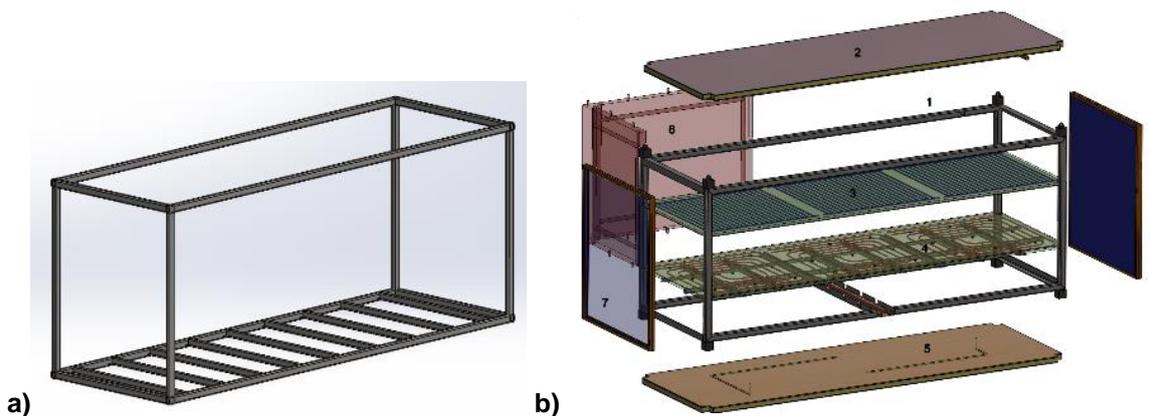
## 2.4 Stahlgerüst und Flächenelemente

Im Projekt DigiConCyc wird eine vollständig modulare Bauweise für Leichtbauegebäude angestrebt, die durch den Einsatz automatisierter Fertigungstechnologien realisiert werden soll. Dabei werden tragende Skelettrahmenstrukturen sowie Wand-, Boden- und Dachbaugruppen vorgefertigt, die flexibel an unterschiedliche Nutzer- und Umgebungsanforderungen angepasst oder frei kombiniert werden können. Die Leichtbauweise wird dabei durch den Einsatz hochdämmender Materialien, wie Vakuum-Isolationspaneele, energetisch optimiert, um Wärmedurchgangswerte gemäß Passivhausstandard zu erreichen.

Ein zentrales Ziel ist die Realisierung großer Glasfassadenanteile, ohne die thermische Effizienz zu beeinträchtigen. Hierfür werden technische Lösungen wie Fensterheizungen, automatisch gesteuerte Verdunklungssysteme sowie multifunktionale Fassadenelemente für partielle Verschattung und zusätzliche Dämmung untersucht. Die Energieeffizienz dieser Technologien soll sowohl für Innen- und Außenanwendungen als auch für die Integration in Doppel- und Dreifachverglasungen bewertet werden.

Darüber hinaus wird die Wärmespeicherkapazität der Module durch den Einsatz von Phase-Change-Materials (PCM) in verschiedenen Baugruppen verbessert. Der Einfluss dieser Materialien auf das Raumklima wird unter variierenden Umgebungsbedingungen und individuellen Nutzeranforderungen analysiert. Parallel dazu werden Systeme der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) erforscht, die überschüssige Wärme abführen, nutzen und zwischenlagern können, um eine effiziente Energienutzung sicherzustellen.

Auf Grundlage der gemeinsam definierten Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit, Dämmleistung, Funktionsintegration, Nutzung und Fertigungsprozesse wurde ein funktionaler Aufbau entwickelt, der die strukturellen Vorgaben für die Raummodule festlegt. Ziel ist es, das Design der Raummodule grundlegend zu verbessern, im Gegensatz zu klassischen Containerhäusern. Dabei wird bewusst auf die Wiederverwertung standardisierter oder gebrauchter Transportcontainer verzichtet, da diese zwar nachhaltig erscheinen, jedoch kaum Raum für Innovation und Automatisierung bieten. Die konzipierte Skelettrahmenstruktur orientiert sich in den Raumabmessungen an den gängigen Größen der 20-40 ft Container, um die Vorteile der Containerlogistik nutzen zu können.



**Abbildung 10: a) Stahlrahmenskelett; b) Funktioneller Aufbau des Raum-Moduls mit Stahlrahmen (1), Dachbaugruppe (2), Deckenkühlung (3), Fußbodenheizung (4), Bodenbaugruppe mit elektrischer Installationsebene (5), Innenwand (6), Fassade opak und gläsern (7)**

Die Entwicklung des funktionalen Aufbaus von Wand-, Dach- und Bodenbaugruppen basierend auf den vorher definierten Anforderungen. Hierfür werden die von den Bauelementen zu erfüllenden Funktionen – darunter Wärmedämmung, Schalldämmung, Medienführung durch Installationsebenen und Wärmespeichervermögen – analysiert und im nächsten Schritt geeignete Materialien zuzuordnen, um darauf aufbauend die funktionalen Schichtaufbauten der Bauelemente abzuleiten.

Aufbauend auf den Erfahrungen vorangegangener Projekte wird die Dämmung der Flächenelemente als Sandwichsystem unter der Verwendung von Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP's) aufgebaut, die sich aufgrund ihrer schlanken Bauweise und hervorragenden Dämmeigenschaften für den Leichtbau eignen.

### 3. Vorversuche und Demonstartorplanung

Um die Ziele der robotergerechten Fertigungstechnologie eines Raum-Moduls zu erreichen, werden in Vorbereitung auf die Versuche in der Roboterzelle an den Demonstratorbauteilen, Vorversuche durchgeführt. Dabei werden bei den Projektpartner vor Ort geeigneten Baugruppen auf konventionelle Weise gefertigt, montiert und Varianten zur Fertigung und Montage abgeleitet. Die Vorversuche sind unter folgenden Gesichtspunkten zu bewerten:

- Anbindemöglichkeiten/Schnittstellen bei Übergabe zwischen zwei Modulen
- Montageschritte auf Zugänglichkeiten für robotergerechte Verarbeitung prüfen
- Fertigungsalternativen
- Leichtbauweise
- Sortenreines Recycling
- Zugänglichkeit für Wartungsaufträge

Die zu untersuchenden Baugruppen wurden auch im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden Technologiemodule in der Roboterzelle an der TU DD ausgewählt. Die Technologiemodule bilden die Fähigkeiten Handling, mechanische Bearbeitung, lösbare Verbindungen und thermisches Fügen ab.

#### 3.1 Kabelstrangmontage

Die verschiedenen Varianten der Kabelstrangfertigung und -montage für das modulare Leichtbaugebäude beinhalten Lösungswege von der Ausführung und Ausstattung der Kabelstränge bis zu den Möglichkeiten der zentralen und dezentralen Verschaltung. Die Art der Untersuchungen lässt sich dabei in drei Arten von Versuchsgruppen unterteilen:

- Gestaltung und Aufhängung der Kabelbäume

- Gestaltung Steckverbindungen und Medienübergabe
- Steckboard (Verlegetechnik des Kabelbaums) zur Erprobung der Biegeradien.

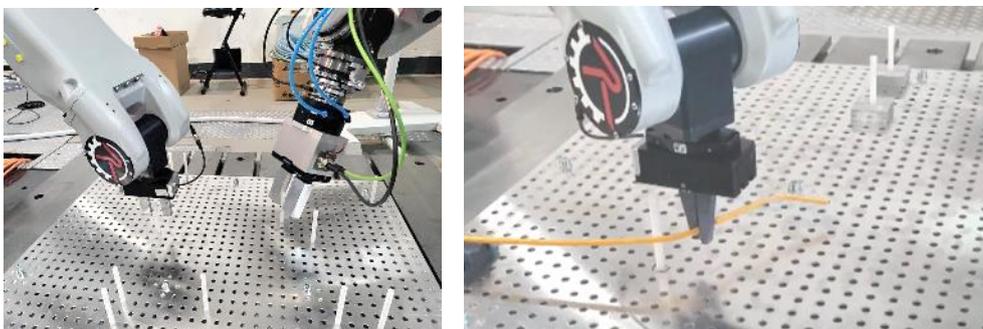
Für die Befestigung von Kabeln und Kabelbäumen bestehen zahlreiche Möglichkeiten durch Kabelbinder, Klemmen, Schellen, Kabelkanäle Klett- bzw. Klebverbindung oder strukturierter Matten. Prinzipiell ist bei der angestrebten modularen Bauweise der Boden-, Dach- und Wandbaugruppen die Montage der Kabel in einer günstigen Position vorzusehen. Zum Beispiel ist eine „Überkopf“-Montage durch Roboter nicht durchführbar, eher kann das Eigengewicht der Kabel bei der Fixierung genutzt werden.

Bei der Gestaltung der Kabelstränge wird zwischen gebündelter und loser Kabelverlegung unterschieden, in der gebündelten Variante werden alle Kabel in einer Ummantelung zusammengehalten und anschließend gemeinsam verlegt. Dafür wurden in einem Vorversuch alle relevanten Kabel einer Ausstattungsvariante gebündelt und lose in voller Länge für ein Raum-Modul ausgelegt, siehe Abbildung 11.



**Abbildung 11: Kabelstranggestaltung lose und gebündelt (v. l. n. r.)**

An der TU Dresden wurde daraufhin eine Art Steckboard aufgebaut, um zu überprüfen ob diese Biegeradien nachempfunden werden können. Das Steckboard dient als Hilfsmittel für die korrekte Positionierung der zu verlegenden Kabel. Für die ersten Versuche wurden dafür lose Kabel verwendet, siehe Abbildung 12. Die folgenden Versuche werden dann auch die Varianten mit gebündelten Kabelsträngen und mit verschiedenen Befestigungsmethoden erproben. Weiterhin soll der Einsatz von Noppenboards untersucht werden, die im Ganzen mit in den Boden- und Dachbaugruppen montiert werden können. Damit erspart man sich den Umweg einer Hilfskonstruktion für die Verlegung der Kabel und kann sie in einem Schritt positionieren und befestigen.



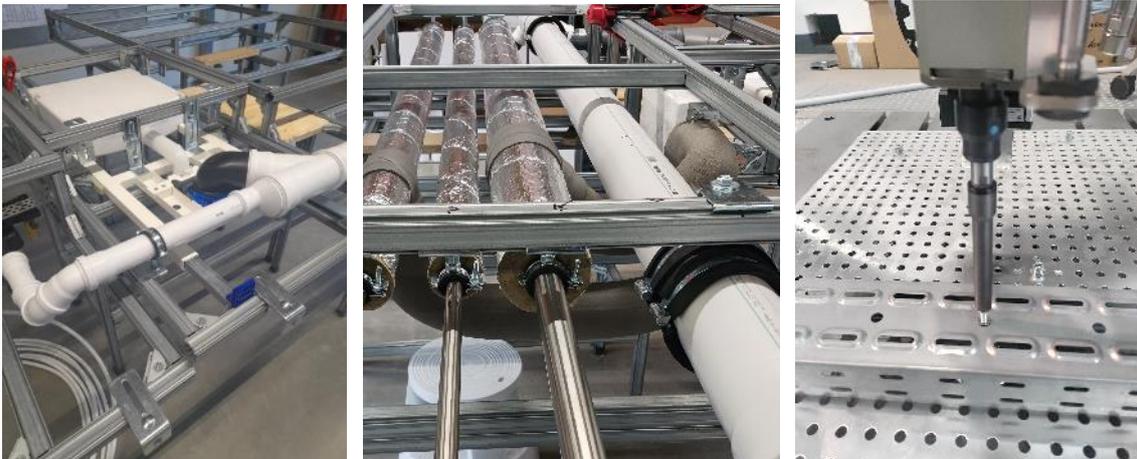
**Abbildung 12: Steckboard in der Roboterzelle, erste Versuche im Handling mit einzelnen Kabeln**

### 3.2 Technische Gebäudeausrüstung

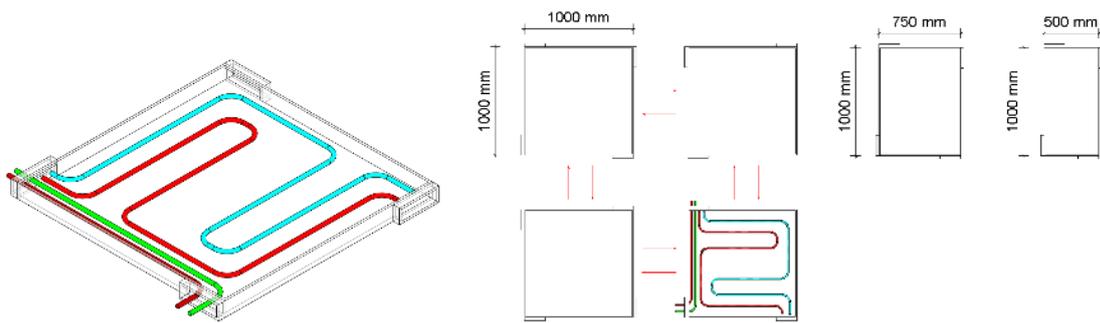
Die durchgeführten Voruntersuchungen umfassten bisher Versuche für eine robotergerechte Fertigung der Haupt- und Nebenregister des Projektpartners DHE. Hierfür wurden kritische Montageabläufe und mögliche Unzugänglichkeiten für eine robotergerechte Fügetechnologie erfasst und Lösungsansätze für eine robotergerechte technologische Umsetzung evaluiert. Im Ergebnis wurde für die Registerfertigung im Hinblick auf die an der TU Dresden zu erprobenden Technologiemodule (thermisches Fügen, lösbare Verbindung, Nachbearbeitung und Handling) die entsprechende Montageabfolge entwickelt (Abbildung 13).

Die Voruntersuchungen umfassten folgende Versuchsgruppen:

- 1. Versuchsgruppe: Haupt- und Nebenregister
  - o Evaluierung der Schraubverbindungen
  - o Evaluierung der Montageabfolge für ein verbessertes Handling
  - o Konzentration auf die Technologiemodule Handling und lösbare Verbindung
- 2. Versuchsgruppe: Übergabestellen
  - o Untersuchung unterschiedlicher Dichtungen
  - o Einhaltung des Brandschutzes für die Einzelkomponenten
  - o Erarbeitung von Montagehilfsmitteln/-Hilfestellungen
- 3. Versuchsgruppe: wassergeführte Heiz- und Kühlsysteme
  - o Führung der Heizungsrohre
  - o Evaluierung der unterschiedlichen Bauarten
  - o Anbindung an Verteiler



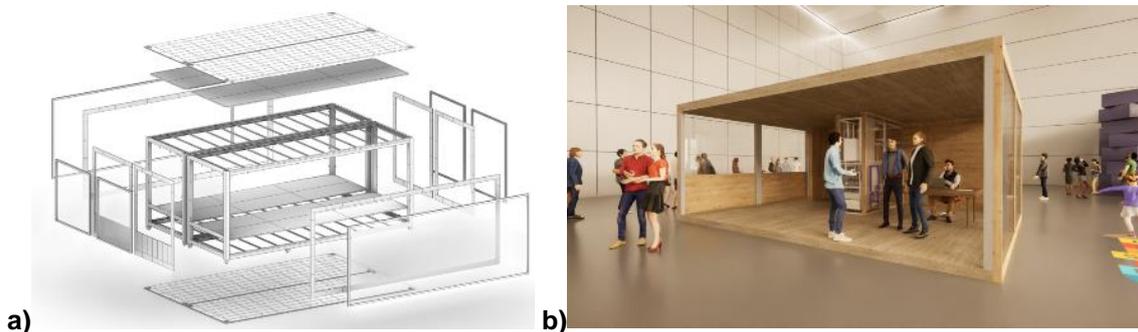
**Abbildung 13: Evaluierung der Fertigungsabläufe und Montage der Haupt- und Nebenregister; erste Versuche in der Roboterzelle zu den Technologiemodulen lösbare Verbindungen und Nachbearbeitung**



**Abbildung 14: Bauelemententwicklung für Heiz- und Kühlsysteme**

Im weiteren Verlauf der Vorversuche konnte auch eine eigene Variante eines Heizflächenbauelements entwickelt werden, welches den bisherigen Anforderungen entgegenkommt (siehe Abbildung 14). Dafür wurden Heiz- und Kühlkästen in drei Größen entworfen, die sowohl in der Dachbaugruppe als auch in der Bodenbaugruppe gleichermaßen eingebaut werden können. Die Kästen besitzen an allen Seiten Anschlussmöglichkeiten und können die Flächen variabel ausfüllen. Kombiniert man diese mit den angedachten Dämmelementen, können diese Bauelemente einfach vorgefertigt und robotergerecht montiert werden.

### 3.3 Demonstratorplanung



**Abbildung 15: a) Versuchsdemonstrator und b) Messedemonstrator**

In Abbildung 15 a) ist das geplante Demonstratorgebäude dargestellt, es besteht aus zwei Raum-Modulen, wobei eines das TGA-Modul abbilden wird mit einem weiteren einfachen Raum-Modul. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die entwickelten Lösungsstrategien funktional sowie fertigungstechnisch zu bewerten. Die Montage und Verlegung der Kabelbäume kann Modulübergreifend abgebildet werden, sowie wichtige Übergabestellen unter realen Bedingungen bewertet werden. Das begleitende Monitoring wird den Gebäudebetrieb der Klimatisierung, Belüftung, Verschattung und das daraus resultierende Energiemanagementsystem dokumentieren und analysieren. Nach der Beprobung wird das Demonstratorgebäude in ein Messedemonstrator umgebaut. Aufbauend auf den Entwürfen der Projektpartner ILEK wird ein entsprechender Messedemonstrator wie in Abbildung 15 b) dargestellt aussehen.

Der Aufbau des Demonstrators orientiert sich am Grundriss eines 100 m<sup>2</sup> großen Einfamilienhauses mit den Maßen 2 x 7,2 m x 2,4 m x 3,0 m. Zur Veranschaulichung der Verschaltung werden mindestens zwei Raum-Module verwendet. Die Hauptregister werden analog zum Konzept des Leichtbaugeschäftes umgesetzt, während die Nebenregister Rohrverlegung, Anschlüsse und die Anbindung an den Stahlrahmen gemäß der vorgesehenen Konstruktion demonstrieren. Die technische Gebäudeausrüstung (TGA) umfasst eine Fußbodenheizung, Haupt- und Nebenverteiler sowie ein Lüftungssystem. Zur flexiblen Raumeinteilung sind Trennwände vorgesehen, zur

Abgrenzung für ein „Bad“ mit Tür, jedoch ohne sanitäre Anlagen. In den Trennwänden wird Dämmmaterial ohne den Einsatz von Vakuumisulationspaneelen (VIP) verwendet. Die Boden- und Deckenbaugruppen enthalten VIP, während die übrigen Wände aus Gründen der Kostenersparnis und Materialoptimierung ohne VIP ausgeführt werden. Die Fertigung des Demonstrators erfolgt manuell.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Innovation der zu entwickelnden Technologien und Produkte gegenüber dem Stand der Technik zeigt sich vor allem in den signifikanten Verbesserungen, die in mehreren Bereichen zu erwarten sind. Eine automatisierte Fertigung der Raum-Module, einschließlich der Elektro- und TGA-Ausstattung, sorgt für eine hohe Fertigungseffizienz und damit für deutliche Zeit- und Kosteneinsparungen. Durch den Leichtbau und die Verwendung recyclefähiger Materialien wird der Ressourcenverbrauch pro Quadratmeter Wohnfläche erheblich reduziert. Zudem steigert der Einsatz innovativer Werkstoffe die Energieeffizienz der Gebäude. Die Automatisierung des Produktionsprozesses minimiert Fehler und Ausschuss, während die fertigungsgerechte Anpassung der Gebäudestrukturen und Bauelemente an die Anforderungen der robotergestützten Produktion die Grundlage für eine effiziente Herstellung bildet. Die Alleinstellungsmerkmale des Projekts DigiConCyc umfassen einen wesentlich höheren Automatisierungsgrad, der durch die Kombination von CAD/CAM-Technologien mit Robotertechnik erreicht wird, sowie die Entwicklung einer automatisierbaren Elektro- und TGA-Installation. Dies führt zu einer signifikanten Steigerung der Produktivität bei der Fertigung von Raum-Modulen, wodurch Fertigungszeit, Kosten und Ressourcenverbrauch gesenkt werden. Gleichzeitig werden architektonische Lösungen entwickelt, die den spezifischen Anforderungen gerecht werden. Ein weiteres zentrales Element ist der Einsatz eines virtuellen Zwillings, der die virtuelle Erprobung unterschiedlicher Fertigungstechnologien ermöglicht und frühzeitig Abhängigkeiten berücksichtigt. Die Lösungsansätze heben sich dadurch ab, dass die Fertigung modularer Gebäudeeinheiten bislang überwiegend handwerklich erfolgt, einschließlich der sukzessiven und ebenfalls manuellen Installation von Medien und TGA. Eine industrielle Produktion im großen Maßstab ist damit bisher nicht umsetzbar. Die im Projekt entwickelten Lösungen in Kooperation mit den Partnern ermöglichen die robotergestützte Fertigung vollständig vorinstallierter Raum-Module auf Basis innovativer Umformtechnologien. Diese Module werden zu energieeffizienten Leichtbaugebäuden zusammengesetzt, basierend auf neuen architektonischen Konzepten. Derartige Lösungen sind derzeit nicht auf dem Markt verfügbar und bieten durch erhebliche Kostenvorteile im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen einen bedeutenden Beitrag zur Schaffung günstiger, energieeffizienter und schnell errichtbarer Wohn- und Nutzflächen.

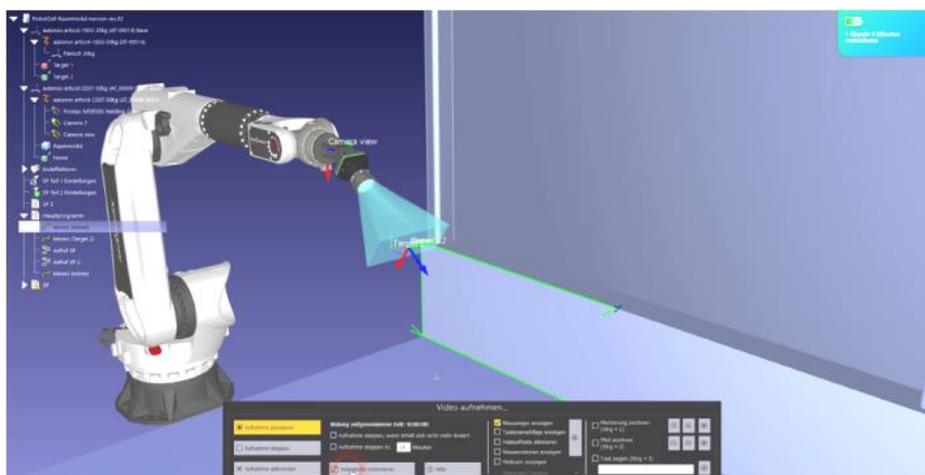


Abbildung 16: Schweißbahnkontrolle mit dem Virtuellen Zwilling

In den jetzt folgenden Arbeitsschwerpunkten des Projekts wird der digitale Zwilling eine zentrale Rolle übernehmen als Planungsgrundlage für das Gesamtgebäude. Jedoch werden auch für den Versuchsdemonstrator wichtige Informationen gebündelt durch die Zusammenfassung aller fertigungstechnischen Details, sowie Montagereihenfolgen und Stücklisten (siehe Abbildung 16). Weiterhin wird das Energiekonzept des Leichtbaugesäßes und den darin konzipierten Komponenten mit der passenden Software für die gesetzten Anforderungen simuliert und kann aufbauend auf den Daten des virtuellen Zwillings und des Monitorings am Versuchsdemonstrator optimiert werden.

## 5. Literaturangaben

- [1] Janta, R. *Positionen zum industriepolitischen Leichtbau-Dialog: Deutschland muss Leitanbieter werden*. [Positionspapier] Berlin : s.n., 2017.
- [2] NRW.BANK. Leicht- und Massivbauweise im Vergleich. [Online] [Zitat vom: 11. 04 2018.] [https://www.nrwbank.de/de/themen/umwelt-und-energie/0006\\_Umwelt-und-Energie\\_Serie\\_Teil\\_2\\_Bauweisenvergleich.html](https://www.nrwbank.de/de/themen/umwelt-und-energie/0006_Umwelt-und-Energie_Serie_Teil_2_Bauweisenvergleich.html).
- [3] LissyHaus Modulbausystem GmbH. Containerhaus. [Online] [Zitat vom: 11. 04 2018.] durchdachter Funktionsintegration, einer last- und werkstoffoptimierten Konstruktion sowie dem Einsatz leichter Materialien .
- [4] Tröster, C. Warum Container die Häuser der Zukunft sind. *Welt*. 2010.
- [5] Novoceram. Wohncontainer: eine preiswerte und rasche Lösung. [Online] [Zitat vom: 11. 04 2018.] <https://www.novoceram.de/blog/architektur/wohncontainer-eine-preiswerte-und-geschwinde-lsung>.
- [6] Studie: Modulbauweise auf dem Vormarsch. [Online] 14. 11 2019. [https://www.wi-geiger.de/Immonews\\_3105/Studie-Modulbauweise-auf-dem-Vormarsch.htm](https://www.wi-geiger.de/Immonews_3105/Studie-Modulbauweise-auf-dem-Vormarsch.htm).
- [7] RM Handelsmedien GmbH & Co. KG. *BaustoffMarkt-Studie: Seriell, Modular, Leicht - Zukunft Bau?* 2019.
- [8] Drexler, H. und Albus, J. *PREFAB HOUSING Untersuchung von Produktionsprozessen im Hinblick auf Effizienzsteigerung und Kostensenkung für bedarfsgerechten Wohnraum*. s.l. : TU Dortmund, 2016.