



**BIM CENTER
AACHEN**



**Modular. Digital.
Integriert. Vorgefertigt.**

**Schlüsselfunktion von TGA-Verbundsystemen
beim Modularen Bauen**

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | Definition relevanter Begriffe | 4 |
| 2 | Executive Summary | 6 |
| 3 | Einleitung | 7 |
| 4 | Status Quo des modularen Bauens | 8 |
| 4.1 | Modulares vs. konventionelles Bauen | 9 |
| 4.2 | Markt und Wettbewerb | 9 |
| 4.3 | Zielgruppen und Interessen | 11 |
| 4.4 | Chancen und Hemmnisse für modulare TGA-Verbundsysteme | 11 |
| 4.5 | Trends | 12 |
| 5 | Identifikation von Anwendungsfällen für modulare TGA-Verbundsysteme | 14 |
| 5.1 | Als „Prinzip der Vereinfachung“ führt Modularität zur Komplexitätsreduktion bei der Bauprojektrealisierung | 14 |
| 5.2 | Typologie von drei komplementären Modularisierungsansätzen | 23 |
| 5.3 | Anwendungsfälle für die Vorfertigung von modularen TGA-Verbundsystemen | 16 |
| 5.4 | Einordnung von modularen TGA-Verbundsystemen nach Fertigungsprinzipien | 18 |
| 5.5 | Mehrwerte entlang der Wertschöpfungskette Bauen | 21 |
| 6 | Fallstudie Vorfertigung von modularen Medientrassen | 26 |
| 7 | Fallstudie modellbasierte Vorfabrikation von Rohrleitungen | 28 |
| 8 | Implikationen aus Vergaberecht und -praxis | 30 |
| 8.1 | Produktneutralität und Vergabe nach Fachlosen | 30 |
| 8.2 | Vergabepaxis müsste bei der Marktdurchdringung adressiert werden | 30 |
| 9 | Technologischer Ausblick auf modulare TGA-Verbundsysteme | 32 |
| 9.1 | Datenbasiertes Qualitätsmanagement mit As-built BIM-Modellen | 32 |
| 9.2 | Konfiguratoren von individuellen Bauteilen und Baugruppenkataloge | 32 |
| 9.3 | Entwurf von Komponenten und Systemen angepasst an die Vorfertigung und Montage | 33 |
| 9.4 | Optimierte Datenschnittstellen zwischen Planung und Präfabrikation | 33 |
| 9.5 | Entwicklung von Rapid-on-site Delivery Services und Baustellenlieferung ins Gebäude | 33 |
| 10 | Bibliography | 34 |

Vorwort & Danksagungen

Diese Arbeit baut auf vorausgehenden Analysen im Rahmen eines konsortialen Forschungsprojektes im BIM Center Aachen auf. Im Fokus dieser Veröffentlichung steht die Funktion von TGA-Verbundsystemen beim Modularen Bauen. Neben Markt- und Fallstudien, Experteninterviews, Nutzenanalysen, werden Produktionsprozesse, Implikationen aus Vergaberecht und -Praxis sowie technologischer Lösungsbedarf diskutiert. Die Ergebnisse heben die Schlüsselfunktion von technischen Gewerken bei der Umsetzung von seriellen Bauweisen hervor und zeigen auf, wie vorgefertigte TGA-Verbundsysteme einen Beitrag zum Modularen Bauen leisten können.

An dem Forschungsvorhaben waren am BIM Center Aachen beteiligt Lev Kirnats, Prokurist und Projektleiter, Prof. Christoph van Treeck, Geschäftsführer und Leiter des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen (E3D) an der RWTH, Prof. Jörg Blankenbach, Geschäftsführer und Leiter des Geodätischen Instituts und Lehrstuhls für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (GIA), Prof. Dirk Müller, Leiter des Lehrstuhls für Gebäude- und Raumklimatechnik (EBC) am EON ERC und Prof. Jakob Beetz, Leiter des Lehr- und Forschungsgebiet Computergestütztes Entwerfen (CAAD). Das Projektteam bestand aus den wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern an den beteiligten vier Instituten, Maximilian Schild, David Jansen, Raymond Wollenberg, Noemi Kremer, Mara von Heydebrand, Jan-Niklas Joost, Peter Gölzhäuser und Christopher Meckel. Implikationen aus Vergaberecht wurden seitens der Kanzlei Kappelmann und Partner von Dominik Groß und Dr. Robert Elixmann erarbeitet. Wir danken allen Beteiligten für die gute Zusammenarbeit.

Für ihre Beiträge und aufschlussreichen Diskussionen im Rahmen der Arbeitstreffen geht ein großer Dank an die Mitglieder des BIM Centers Aachen aus der Industrie, Frau Heike Kling, Herrn Dr. Nils Krönert und Herrn Daniel Gmeiner des Unternehmens Hilti; Herrn Ulrich Zeppenfeld, Herrn Jens Röcher, Herrn Maximilian Zbocna und Dr. Daniel Rüschen des Unternehmens Viega; Herrn Thorsten Weinert des Unternehmens Viessmann; Herrn Daniel Leitner, Herrn Klaus Pochert und Herrn Jochen Saxe des Unternehmens Trox; sowie Herrn Ersin Ibram, Herrn Roland Kreuzmann und Herrn Michael Scheller des Unternehmens Oventrop.

Viele Kolleginnen und Kollegen aus Industrie und Forschung lieferten hilfreiche Beiträge und Ratschläge. Besonderer Dank geht daher an Herrn Markus Thissen von ROM-Technik, Herrn Jaroslaw Siwiecki und Herrn Nikolas Pauen der E3D-Ingenieurgesellschaft Aachen, Herrn Marc Thiel von ProMaterials, Herrn Klaus Ege der TMM-Group und, last but not least, Herrn Dr. Sven Herbert der Unternehmensgruppe Herbert Anlagenbau.

Autoren:

Lev Kirnats, Dominik Groß, Christoph van Treeck, Jörg Blankenbach, Jakob Beetz, Dirk Müller

2 Definition relevanter Begriffe

Die **konventionelle Vor-Ort Bauweise** ist am stärksten verbreitet und zeichnet sich durch einen hohen Grad der Individualität und einen geringen Grad der Standardisierung aus. Die Prozesse sind stark handwerklich geprägt. Bauherren haben viele Freiheitsgrade bei der Gestaltung, beispielsweise bei der Wahl des Grundrisses oder der Materialien. Eine erhöhte Individualität geht einher mit einem steigenden Planungsaufwand, bedingt durch die mangelnde Möglichkeit, auf bestehende Planungselemente zurückzugreifen. Ein architektonisch anspruchsvolles Gebäude ist in der Regel kostenintensiv¹.

Vorfertigung im Bauwesen wird definiert als ein Produktionsprozess, bei dem Bauteile an einem anderen Ort als dem endgültigen Einbauort hergestellt werden. Im Anschluss an die Herstellung werden die Baugruppen auf die Baustelle geliefert und an die endgültige Position montiert.² Für den Begriff Vorfertigung wird synonym beispielweise Systembau, Modulares Bauen, Serielles Bauen oder Off-site Construction verwendet.³ Inhaltlich betrachtet haben alle Begriffe das Konzept der Verlagerung der Baustellenprozesse in die stationäre Fertigung gemein.

Industrielles Bauen bezeichnet eine zentralisierte Herstellung von Bauprodukten sowie die Rationalisierung von Arbeitsprozessen mit Hilfe von industriellen Methoden und Mitteln, die dem derzeitigen oder zukünftigen technologischen Entwicklungsstand entsprechen.⁴ Im Mittelpunkt steht hierbei die Erreichung von Kosteneffizienz und gesteigerter Produktivität sowie Qualität durch die Ersetzung manueller Arbeit mit automatisierten Prozessen. Mit industriellem Bauen wird in der Baubranche also die industrielle Vorfertigung von Bauteilen assoziiert.⁵

Serielles Bauen steht im engen Zusammenhang mit industrieller Vorfertigung. Damit wird eine Bauweise bezeichnet, die auf Grund von Standardisierungen einen Wiederholungsfaktor und somit Lerneffekte sowie Kosten- und Wettbewerbsvorteile impliziert.⁶ Innerhalb der Vorfertigung können sowohl Planungsprozesse als auch Bauteile und Prozesse standardisiert und infolgedessen nach dem Prinzip der Wiederholbarkeit optimiert werden.⁷ Bauteilkataloge bieten die Möglichkeit standardisierte, vorgefertigte Komponenten zu individuellen Gebäuden zu konfigurieren.⁸ Das gesamte Gebäude bildet damit eine individuelle, dennoch planbare

Zusammensetzung aus Subsystemen eines Baukastens. Der Standardisierungsgrad ist für den signifikantesten Kosteneinfluss verantwortlich. Der Leitgedanke des seriellen Bauens ist somit eine hohe Standardisierung nach innen bei einer gleichzeitigen Individualisierung nach außen. Um die Investitionen in Personal, Anlagen und Maschinen, die mit der seriellen Fertigung verbundenen sind, rechtfertigen zu können, sind hohe Stückzahlen notwendig.⁹ Voraussetzung für eine Serienfertigung von Bauteilen ist eine ungesättigte Nachfrage und ein möglichst stabiler Absatzmarkt.¹⁰

Elementbauweise reicht von linearen, skelettbauartigen Elementen über einzelne Wandmodule bis hin zu vollständigen Fassadenteilen. Bei der Vorfertigung linearer Elemente ist eine Dimension wesentlich größer als die anderen beiden (1D), während bei zweidimensionaler Vorfertigung zwei Dimensionen größer sind als die dritte (2D).¹¹ Neben der Primärstruktur und der Gebäudehülle können ebenfalls Elemente der Sekundär- und Tertiärstruktur eines Gebäudes vorgefertigt werden, das heißt Elemente des Innenausbaus und der technischen Gebäudeausrüstung (TGA).¹²

Modulbauweise bezeichnet die Vorfertigung von volumetrischen Bauteilen. Diese dreidimensionale Art der Vorfertigung ermöglicht einen maximal hohen Grad der Vormontage.

Der Leitgedanke des seriellen Bauens ist somit eine hohe Standardisierung nach innen bei einer gleichzeitigen Individualisierung nach außen.

Zu unterscheiden ist zwischen **Modularisierung** und **modularer Bauweise**. Allgemein handelt es sich bei Modularisierung um ein Prinzip, welches auf eine Produktarchitektur angewendet werden kann. Die modulare Bauweise hingegen ist die Anwendung dieses Prinzips auf eine Konstruktion, deren Umsetzung in der Regel mit der Vorfertigung einhergeht. Grenzt man den Terminus weiter ein, wird in der Praxis sehr häufig mit einer modularen Bauweise lediglich die Vorfertigung eines volumetrischen Gebäudeteils assoziiert.¹³

¹ Grundke and Wildemann, Modularisierung im Hausbau.

² Mao et al., "Cost analysis for sustainable off-site construction based on a multiple-case study in China".

³ Azman, Ahamad, and Wan Hussin, "Comparative Study on Prefabrication Construction Process".

⁴ Schwerdtner, Kumlehn, and Schütte, Kostengünstiger Wohnungsbau.

⁵ Girmscheid, Industrielles Bauen.

⁶ Winter, Lechner, and Köhler, "Bauen mit WEITBLICK".

⁷ Analyse & Konzepte, "Marktstudie 2017".

⁸ Viana, Tommelein, and Formoso, "Using Modularity to Reduce Complexity of Industrialized Building Systems for Mass Customization".

⁹ Thanoon et al., "THE ESSENTIAL CHARACTERISTICS OF INDUSTRIALISED BUILDING SYSTEM".

¹⁰ Neitzel et al., "Bericht der Baukostensenkungskommission".

¹¹ Borosnyai, "Vorfertigung in 2D und 3D".

¹² Albus, Dömer, and Drexler, "Vergleichende Untersuchungen vorgefertigter Konstruktionssysteme".

¹³ Mohamad, "Managing the Potential of Modularization and Standardization of MEP Systems in Buildings - Guidelines for improvement based on lean principles".

2 Executive Summary

1. Technologiekonvergenz bei technischen Lösungen

In der Regel ist modulares und serielles Bauen heute noch etwa 10-20 % teurer als mit konventionellen Methoden. Das Problem liegt weniger bei den Gewerken des Hochbaus, die gegenwärtig im Fokus der Branche stehen, sondern bei Einzelgewerken der technischen Gebäudeausrüstung und deren vergleichsweise hohen **Kostensteigerungen**. Standardisierung wird zur technologischen Konvergenz von TGA-Verbundsystemen beitragen und den überproportional hohen Kostensteigerungen entgegenwirken.

3. Neue Kooperationsmodelle notwendig

Geltende Rahmenwerke (Bauverträge, Baupraktiken, Vergabeverfahren) streben eine klare Zuordnung von Haftungsrisiken an, die eine gewerkeübergreifende und systemische Denkweise hemmen und die Zergliederung von Verantwortlichkeiten, Kompetenzen und Disziplinen fördern. Aus der **Fragmentierung** der Einzelprozesse und Zuständigkeiten wird eine Komplexität reproduziert, die insbesondere die koordinierende Gesamtplanung im Bauablauf überfordert.

5. Ende des Nischen-Daseins naht

Auch wenn vereinzelte Hersteller und Zulieferer bereits erste Lösungen adressieren, befindet sich der Markt bei sogenannten modularen TGA-Verbundsystemen noch in der **Findungsphase**. Im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) scheuen viele Anbietern noch die Komplexität und folglich auch eine gewerkeübergreifende Systembauweise, weswegen modulare TGA-Verbundsysteme zwar ein aufstrebendes – gegenwärtig jedoch noch ein Nischen-Dasein hegen.

7. Digitale Planung in Zukunft modular

Die Modularisierung digitaler Modelle erfolgt entweder „Ex-ante“, d.h. ein modularer Aufbau wird per sé in der Planung berücksichtigt, oder „Ex-post“, indem ein bestehendes digitales Modell in entsprechende Teilmodule zerlegt wird, etwa in einem Baukonzern nach Auftragseingang. Die Herausforderungen liegen hierbei in der effizienten Fertigung von Individualbaugruppen, **gewerkeübergreifenden Schnittstellen**, sowie Planungs- und Errichtungsprozessen.

2. Mehrwerte für alle Stakeholder

Die Integration von technischen Gewerken in die Vorfertigung hat eine Schlüsselfunktion beim Modularen Bauen. Mit ca. 40 – 120 Tsd. Bauteilen gehört die TGA zum komplexesten Gewerk im Bauablauf. Modulare TGA-Verbundsysteme könnten durch Vorfertigung multiple **Mehrwerte** entlang der kompletten Wertschöpfungskette für alle involvierten Stakeholder auslösen, die Koordinationskosten auf der Baustelle deutlich senken, zur Verkürzung der Bauzeit und Erhöhung des Arbeitsschutzes beitragen.

4. Pilotprojekte im öffentlichen Bau

Um gewerkeübergreifende Planung und Ausführung von TGA-Verbundsystemen mithilfe der Methodik Building Information Modeling (BIM) in der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) realisieren zu können, ist im Bereich der öffentlichen Vergabe weniger das Vergaberecht als vielmehr die **Vergabepaxis** zu adressieren. Hier müssen gezielt Impulse gesetzt werden, um ein solches TGA-Verbundsystem marktgängig zu machen.

6. Mit Partnerschaften zur besseren Lösung

Die Automatisierung und Verlagerung von Produktionsabläufen in vorgelagerte Fertigungsprozesse erfordert a priori erhebliche **Vorabinvestitionen**. Innovationspartnerschaften zwischen Anbietern könnten die Anlaufkosten für die Integration von TGA-Verbundsystemen deutlich senken. Dies könnte zu Kostenvorteilen führen und ersehnte Skaleneffekte auslösen. Aktuell führt die geringe Nachfrage zu einem „Henne- und Ei-Problem“ – ohne Aufträge, keine Skaleneffekte und ohne Skaleneffekte keine geringeren Kosten.

8. Mit Modularisierung zur Komplexitätsreduktion

Modularisierung folgt dem **Prinzip der Vereinfachung** durch Reduktion der Komplexität, indem die Anzahl der Systemelemente, sowie Anzahl und Ausprägung der Beziehungen zwischen diesen Elementen reduziert wird. Diese Modularität ermöglicht es Unternehmen Komplexitätskosten zu verringern und Produktvariationen am Markt anzubieten.

3 Einleitung

In der Regel ist modulares und serielles Bauen heute noch etwa **10-20 % teurer** als mit konventionellen Methoden. Das Problem liegt weniger bei den Gewerken des Hochbaus, sondern bei Einzelgewerken der technischen Gebäudeausrüstung.

Vor dem Hintergrund des aktuellen Arbeitskräfte- und Wohnungsmangels, sowie eines Investitionsrückstands bei Kommunen¹⁴, rückt die modulare und serielle Bauproduktion stärker in den Fokus der Baubranche. Im Gegensatz zum konventionellen Bauen „Vor-Ort“, werden bei der modularen Bauweise Bauteile und Baugruppen in Fabriken vorgefertigt. Durch eine hohe Standardisierung auf Bauteil- und Prozessebene soll das hohe Niveau von Baukosten gesenkt werden. Während einzelne Modellvorhaben für spezielle Gebäudetypen Kostensenkungen unter „Laborbedingungen“ demonstrieren, ist in der Regel modulares und serielles Bauen heute noch etwa 10-20 % teurer als mit konventionellen Methoden.¹⁵ Das Problem liegt weniger bei den Gewerken des Hochbaus, die gegenwärtig im Fokus der Branche stehen, sondern bei Einzelgewerken der technischen Gebäudeausrüstung und deren vergleichsweise hohen Kostensteigerungen.¹⁶ Der technische Ausbau macht je nach Projekttyp zwischen 20-50 % der Herstellkosten aus und ist durch stetig steigende technische Anforderungen mit einer hohen Komplexität verbunden.¹⁷ Hemmnisse durch inhomogene gesetzliche Vorgaben aus unterschiedlichen Landesbauordnungen und etablierte Praktiken, wie Einzellösungsvergaben durch detaillierte Leistungsverzeichnisse, hindern die Anwendung von Modularisierungsansätzen und führen letztlich zu einer Zergliederung des

technischen Gesamtsystems bis hin zur Einzelkomponente. Je nach Projekttyp führt dieser Umstand bei der Realisierung von Bauprojekten zu einem hohen Koordinationsaufwand der Einzelgewerke, woraus im Bauablauf Zeit- und Kostenüberschreitungen resultieren. Im Umdenken und Übertragung von modularen Produktentstehungsansätzen auf das TGA-Gesamtsystem besteht eine große Chance die Komplexität im Bauablauf zu reduzieren und durch vereinheitlichte Plattformen und Architekturen die Herstellungskosten zu senken. Auch wenn vereinzelte Hersteller und Zulieferer bereits erste Lösungen adressieren, befindet sich der Markt bei sogenannten modularen TGA-Verbundsystemen noch in der Findungsphase. Im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) scheuen viele Anbietern noch die Komplexität und folglich auch eine gewerkeübergreifende Systembauweise, weswegen modulare TGA-Verbundsysteme zwar ein aufstrebendes – gegenwärtig jedoch noch ein Nischen-Dasein hegen. Die im Rahmen dieser Veröffentlichung vorgestellten Ergebnisse unterstreichen die Schlüsselfunktion von technischen Gewerken bei der Umsetzung von seriellen Bauweisen und zeigen auf, wie vorgefertigte TGA-Verbundsysteme einen Beitrag zum modularen Bauen leisten können.

¹⁴ Elisabeth Krone, Dr. Henrik Scheller, Deutsches Institut für Urbanistik, „KfW-Kommunalpanel 2018“.

¹⁵ Fallstudienbasierte Schätzungen, BIM Center Aachen

¹⁶ Streit, „Immobilien: Die Krux vom modularen Bauen gegen die Wohnungsnot“.

¹⁷ Experteninterviews, BIM Center Aachen

4 Status Quo des Modularen Bauens

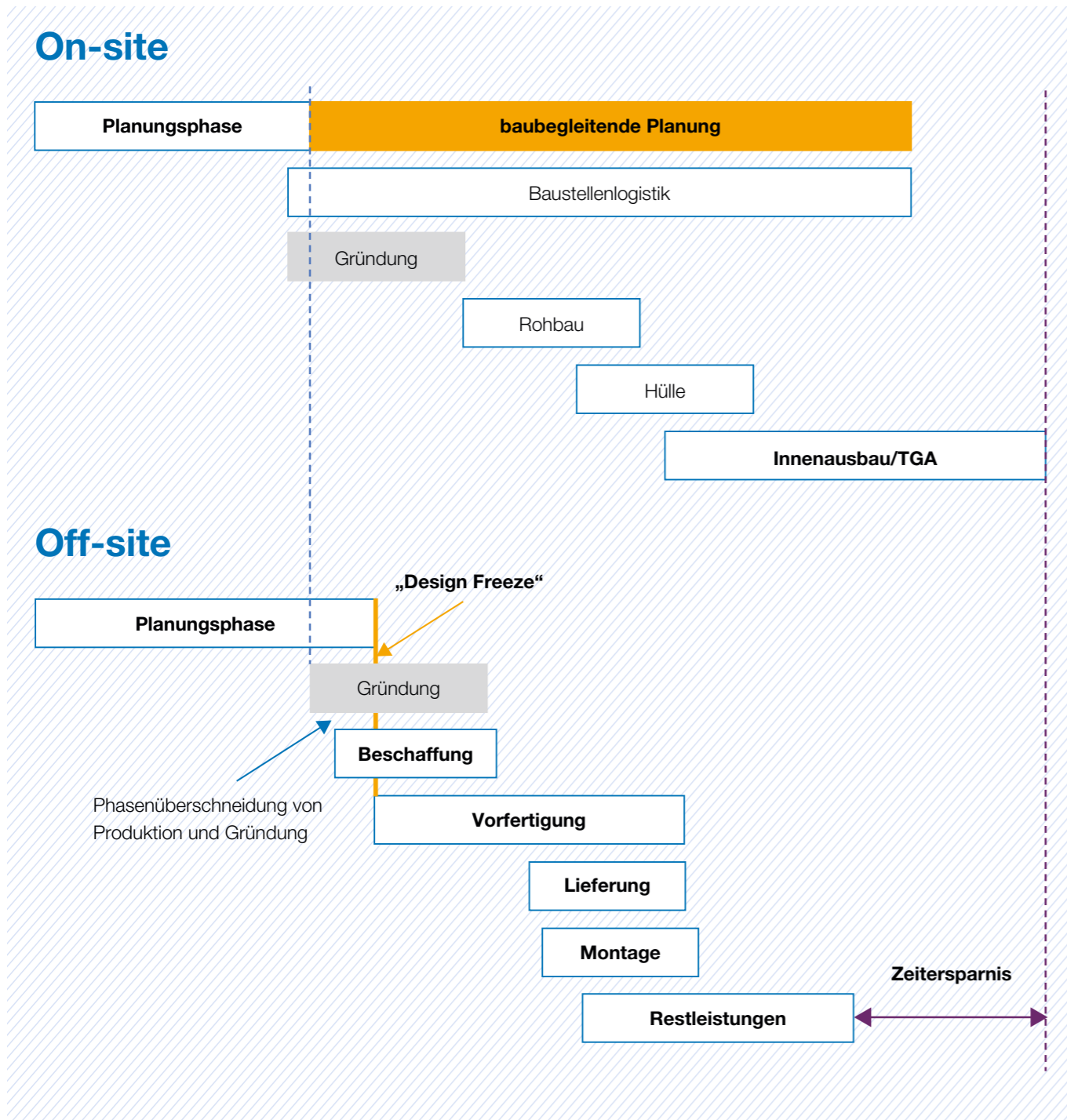


Abbildung 1: Vergleich der Vor-Ort- und Vorfertigung (Eigene Darstellung, angelehnt an Hartmann (2020), Nigel Fraser et. al. (2015)^{18, 19)}

¹⁸ Dip. -Ing. Andreas Hartmann, Philipp Galandi, "Die Aussagekraft des Vorfertigungsgrads".

¹⁹ Nigel Fraser et al., "An Offsite Guide for the Building and Engineering Services Sector".

4.1 Modulares vs. konventionelles Bauen

Modulare Bauverfahren unterscheiden sich grundlegend von Konventionellen hinsichtlich Lieferketten, Technologien und Bauprozessen. Grundsätzlich lassen sich Errichtungsmethoden nach der Montagereihenfolge vor Ort in drei Kategorien einteilen: modulare (Off-site), konventionelle (On-site) und hybride Bauverfahren (siehe Abbildung 1).

Bei der modularen Vorfertigung wird ein „Inside-Out“-Ansatz zum Bau von Baugruppen verwendet. Modulare Rahmen werden als Ebenen konstruiert, als Boxen montiert und dann von innen nach außen fertiggestellt. Zum Beispiel kann eine Sanitäreinheit einer Abfolge von Rahmen, Innenfläche, Elektrik, Sanitär, Mechanik, Isolierung, Außenverkleidung und Beschichtung folgen. Entscheidend hierbei ist, dass ein Planungsstand nach der Übergabe an die Vorfertigung hinsichtlich des technischen Entwurfs nicht mehr abgeändert wird („Design-Freeze“). Die Moduleinheiten werden unter optimierten Produktionsbedingungen in einer präzisen, ressourceneffizienten Fließfertigung computergestützt, teilautomatisiert hergestellt, was Einschränkungen durch Witterung und Verzögerungen durch vorangestellte Gewerke vermeidet. Durch die Phasenüberschreitung der Vorfertigung mit der Gründung kann der Realisierungsprozess beschleunigt werden. Traditionelle Bauverfahren arbeiten hingegen nach einem „Outside-In“-Ansatz. Im Zuge eines Bauzyklus arbeiten die Gewerke übereinander bzw. aufeinander aufbauend. Oftmals werden hybride Bauweisen angewandt, bei denen Abschnitte in traditionellen Bauverfahren vor Ort errichtet werden, die aufgrund von programmatischen Anforderungen, wie bspw. großen Öffnungen und Spannweiten nur schwer in der Fabrik vormontiert werden können.²⁰

Insbesondere der steigende Grad der Haustechnik führt bei einer konventionellen Realisierung, mit stark zergliederten Montage- und Installationsprozessen, zu einer Überforderung der koordinierenden Gesamtplanung. Infolgedessen entstehen nicht selten Zeit- und Kostenüberschreitungen. Im Vergleich zu einer konventionellen Montage werden potenzielle Konstruktionsprobleme auf der Baustelle in die Entwicklung vorverlagert und damit vom eigentlichen „Ort des Problems“ entkoppelt. Durch eine Zusammenfassung der technischen Gewerke in sogenannte modulare TGA-Verbundsysteme (bspw. Heizzentrale, Lüftungszentrale, Technikschaft, Medientrassen) können wesentlich kürzere Realisierungszeitspannen erreicht werden. Durch vorgedachte Lösungen verschlankt sich der Entscheidungsfindungsprozess auf die bestehenden Optionen bzw. daraus ableitende Anpassungen. Daraus

ergeben sich Vorteile hinsichtlich Produktivität, Arbeitssicherheit, Qualität, Reduktion der Bauabfälle und Nachhaltigkeit.^{21, 22}

4.2 Markt und Wettbewerb²³

Gemessen am Gesamtumsatz des Baugewerbes von 135,19 Mrd. Euro im Jahr 2019 spielt das Thema Modulares Bauen gegenwärtig mit 2,75 Mrd. Euro und 2 % Marktanteil eine untergeordnete Rolle. Der Anteil von modularem bzw. seriellem Bauen wird nur für die Errichtung von Gebäuden, also dem Hochbau erfasst, weswegen der Fertigteilbau im Tiefbau in diesen Zahlenwerten unberücksichtigt bleibt. Gemessen am Gesamtumsatz im Hochbau beträgt der Marktanteil des Modulbaus bei ca. 5,68 % und ist damit noch ein Nischenmarkt.²⁴

Dennoch spielt das Thema Modulares Bauen eine zunehmend wichtige Rolle, was sich etwa am Wachstum des Umsatzes nachvollziehen lässt. Während der Gesamtumsatz des Baugewerbes im Vergleich zum Referenzjahr 2008 insgesamt um ca. 44 % gewachsen ist, stieg der Umsatz im Modulbau um 112 % an. Die steigende Relevanz des seriellen bzw. modularen Bauens spiegelt sich auch in der Anzahl von Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden wider, die mit Fertigteilen errichtet worden sind. Während im Jahr 2012 ca. 14 Tsd. Wohngebäude unter Einsatz von Fertigteilen errichtet worden sind, waren es 2019 bereits 19.000. Dies ist ein Anstieg von ca. 40 % und entspricht etwa einem Viertel aller fertiggestellten Wohngebäude. Bei Nichtwohngebäuden werden sogar 40 % aller Gebäude unter dem Einsatz von Fertigbauelementen errichtet.

²⁰ Ryan E. Smith, "Off-Site and Modular Construction Explained | WBDG - Whole Building Design Guide".

²¹ Viana, Tommelein, and Formoso, "Using Modularity to Reduce Complexity of Industrialized Building Systems for Mass Customization".

²² Konsortiale Arbeitskreistreffen, Experteninterviews Industrie, BIM Center Aachen

²³ Bisher werden Marktdaten zu modularen TGA-Verbundsystemen nicht erhoben, weswegen auf Daten des Statistischen Bundesamtes für modulares Bauen zurückgegriffen wird.

²⁴ Eigene Berechnungen, Statistisches Bundesamt, BIM Center Aachen

In der Regel ist Modulares Bauen heute dennoch 10 %-20 % teurer als mit konventionellen Bauverfahren.^{25, 26} Problem sind nicht die Kosten für die Gebäudehülle und den Innenausbau, an denen Modulares Bauen häufig ansetzt, sondern der steigende Grad der Haustechnik²⁷, sowie deren handwerkliche und kostenintensive Montage auf der Baustelle. Verglichen mit den durchschnittlichen Baukosten, sind die Kosten bei gebäudetechnischen Anlagen nahezu doppelt so stark gestiegen und weisen gegenwärtig nur einen geringen Vorfertigungsgrad auf (siehe Abbildung 2). So sehen 91 % aller befragten Planer einer Studie zum kostengünstigen Wohnungsbau den größtmöglichen wirtschaftlichen Nutzen in der Einbeziehung von gebäudetechnischen Anlagen in die Vorfertigung.²⁸

Auch wenn vereinzelte Hersteller und Zulieferer bereits erste Lösungen adressieren, befindet sich der Markt bei sogenannten modularen TGA-Verbundsystemen noch in der Findungsphase.

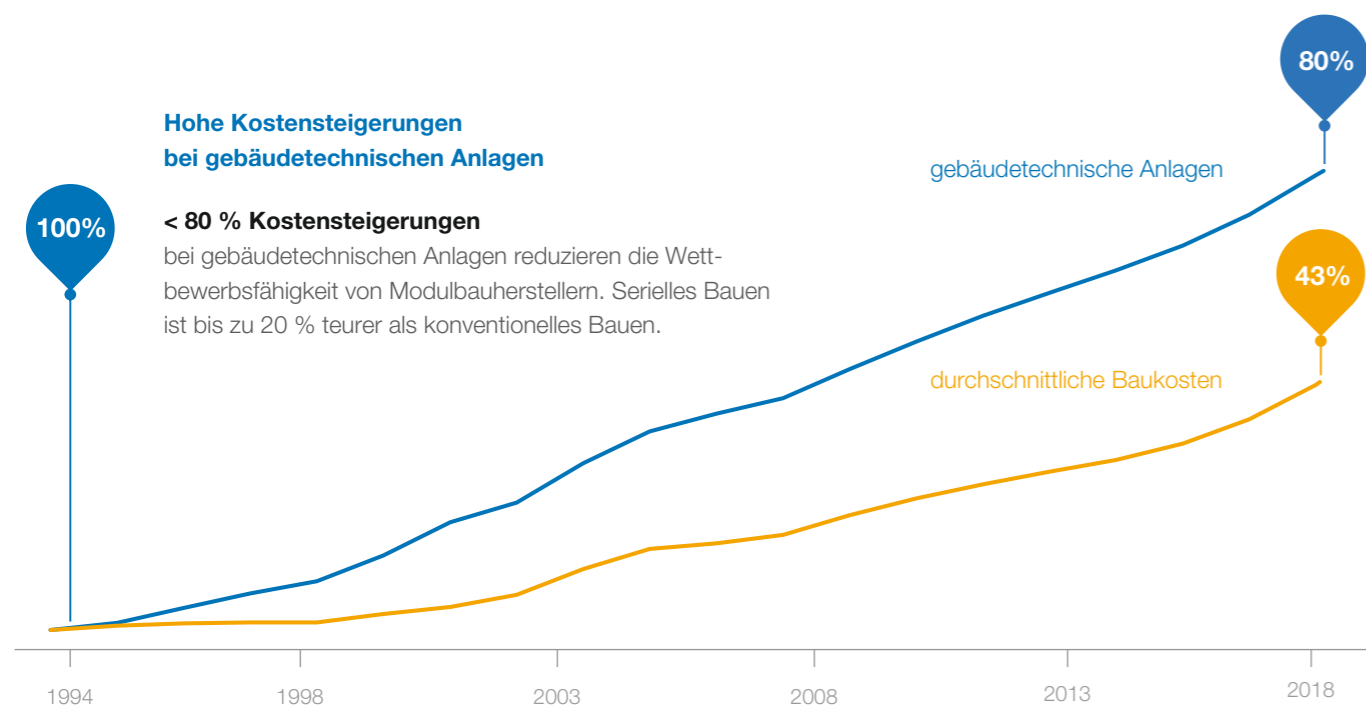


Abbildung 2: Baupreissteigerung getrennt für Gesamtkosten und technische Gewerke, eigene Berechnungen, BIM Center Aachen²⁹

²⁵ Streit, "Immobilien: Die Krux vom modularen Bauen gegen die Wohnungsnot".

²⁶ Fallstudienbasierte Schätzungen, Experteninterviews, BIM Center Aachen

²⁷ Dietmar Walberg, ARGE-SH Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen GmbH

²⁸ Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb, "Kostengünstiger Wohnungsbau: Identifikation bestehender Hemmnisse für den Einsatz von Raummodulen im Wohnungsbau".

²⁹ Eigene Berechnungen, Statistisches Bundesamt, Baupreisindex, BIM Center Aachen

4.3 Zielgruppen und Interessen

Vereinfachend lässt sich die Gemengelage der Interessen in eine Nachfrage- und Angebotsseite unterteilen. Entscheidend sind letztlich die Projektabwicklungsform und daraus resultierende Ausschreibungs- und Vergabestrukturen. Die Nachfrageseite strebt in der Regel nach Kosten- und Zeitvorteilen, während die Angebotsseite primär neue Märkte erschließen und sich rechtzeitig bei relevanten Markttrends positionieren möchte. Die Nachfrageseite lässt sich grob in öffentliche und private Auftraggeber unterteilen, wobei öffentliche Auftraggeber durch das Vergaberecht eine Sonderstellung einnehmen (siehe Kapitel 6). Per Definition optimieren Bauherren zunächst das „magische Dreieck“ aus Kosten, Qualität und Zeit, ohne dabei explizit auf Modularisierung zu achten. Vereinzelt wurden unter Laborbedingungen in Demonstrationsprojekten und für spezifische Gebäudetypen wie bspw. Wohngebäude bereits Kostenneutralität bzw. marginale Kostenvorteile demonstriert, in der Regel setzen Bauherren aber bisher primär auf Modulares Bauen um Zeitvorteile bei der Errichtung zu realisieren.

4.4 Chancen und Hemmnisse für modulare TGA-Verbundsysteme

Chancen:

- Mit je nach Projekttyp ca. 40 – 120 Tsd. Bauteilen gehört die TGA zum komplexesten Gewerk im Bauablauf. Modulare TGA-Verbundsysteme könnten durch Vorfertigung die Koordinationskosten auf der Baustelle deutlich senken, zur Verkürzung der Bauzeit und Erhöhung des Arbeitsschutzes beitragen.³⁰
- Nachhaltigkeitsfonds im Immobilienbereich werden die klassische Bewertung nach dem magischen Dreieck um Nachhaltigkeitskriterien erweitern. Bei einer transparenten Darlegung von positiven Umweltauswirkungen bspw. über Kriterienkataloge von Nachhaltigkeitszertifikaten, werden Anreize für TGA-Verbundsysteme und allgemein für Modulares Bauen steigen.

Die Angebotsseite besteht gegenwärtig vor allem aus Unternehmen des Container- und Modulbaus, die sich auf die volumetrische Vorfertigung von Gebäuden spezialisiert haben.

Der Planer, als Bindeglied zwischen Nachfrage und Angebot, sieht durch Modularisierung seinen Anspruch und Stellenwert im Projekt bedroht. Produkthersteller sehen Potential im After-Sales-Service, scheuen jedoch die Komplexitätskosten und folglich die gewerkeübergreifende Systemdenkweise. Auch Fragen zur Gewährleistung und Haftung sind dabei offen. Anlagenbauer neigen durch Outsourcing des Handwerks zunehmend zu Modularisierung. Hersteller von modularen TGA-Verbundsystemen können für Generalunternehmen und Großhändler fertigen, aber auch direkt mit dem Bauherrn über eine Einzellos-Vergabe Verträge abschließen und somit selbst als Generalunternehmer auftreten.

■ Oftmals wird unter dem Begriff Modularisierung eine volumetrische, Container-basierte Umsetzung („Schachtelbauweise“) verstanden. Modulare TGA-Verbundsysteme treffen hingegen auf eine hohe Akzeptanz und stehen nicht in Bezug mit dem modularen Hochbau verbundenen Imageproblemen („Platte 4.0“).

■ Innovationspartnerschaften zwischen Anbietern aus dem Hochbau und technischen Anlagen könnten die Anlaufkosten für die Integration von TGA-Verbundsystemen deutlich senken. Dies könnte zu Kostenvorteilen führen und ersehnte Skaleneffekte auslösen. Aktuell führt die geringe Nachfrage zu einem „Henne- und Ei-Problem“ – ohne Aufträge, keine Skaleneffekte und ohne Skaleneffekte keine geringeren Kosten.

³⁰ Eigene Mengenermittlungen, BIM Center Aachen

Hemmnisse:

- Modulare TGA-Verbundsysteme setzen eine vereinheitlichte Planungsgrundlage voraus. In Deutschland haben 16 Bundesländer jeweils unterschiedliche Bauordnungen mit eigenen Auflagen bspw. in Hinblick auf den Brandschutz und die Abnahme technischer Anlagen. Zuletzt wurden Typengenehmigungen in die Musterbauordnung aufgenommen, die allerdings noch nicht in alle Landesbauordnungen übertragen worden sind.
- Der Einsatz von vorgefertigten TGA-Verbundsystemen kann nicht ohne weiteres im Nachhinein erfolgen, sondern muss bereits in den Ausschreibungsunterlagen berücksichtigt werden. Gegenwärtig fehlen Vorlagen und Prozeduren für Ausschreibungsunterlagen, Festlegung auf Systeme seitens der Hersteller und damit auch Vergleichbarkeit und Kostentransparenz im Markt. Auf der anderen Seite wird ein Baukonzern nach der Auftragserteilung die Vorfertigung modularer Komponenten anstreben, um die eigene Wertschöpfung durch verbesserte interne Prozesse zu erhöhen.
- Die Umstellung vom Komponentenhersteller zum Systemanbieter erfordert fortschrittliche Produktionsabläufe, die jedoch mit hohen Kosten verbunden sind. Diese Anlaufkosten scheuen Produkthersteller gegenwärtig aufgrund der – trotz Pandemie – guten Konjunkturlage und somit geringem Innovationsdruck.
- Geltende Rahmenwerke (Bauverträge, Baupraktiken, Vergabeverfahren) streben eine klare Zuordnung von Haftungsrisiken an, die eine gewerkeübergreifende und systemische Denkweise hemmen und die Zergliederung von Verantwortlichkeiten, Kompetenzen und Disziplinen fördern. Aus der Fragmentierung der Einzelprozesse und Zuständigkeiten wird eine Komplexität reproduziert, die insbesondere die koordinierende Gesamtplanung überfordert.

4.5 Trends

- Im Klimaschutzbericht der Bundesregierung wird der Gebäudebereich als „essenziell“ betrachtet, um Deutschland bis 2050 klimaneutral zu machen. Bauen gilt als besonders ressourcenintensiv und ist verantwortlich für ca. 30 % des globalen CO₂-Ausstoßes. Modulares Bauen findet stationär statt, was auf vielen Ebenen die Optimierung der ökologischen Qualität von Gebäuden zulässt. Zum Beispiel können durch Prozessoptimierung und -harmonisierung in der Vorfertigung von Modulen alle Ressourcen – Material, Personal und Energie – optimal ausgeschöpft werden. Dies reduziert den Ressourceneinsatz um ein Drittel und den Abfall um bis zu 70 % gegenüber dem konventionellen Bauen.^{31, 32}
- Die durchgängige Digitalisierung aller planungs- und realisierungsrelevanten Bauwerksinformationen als virtuelles Bauwerksmodell mittels Building Information Modeling (BIM) verändert bereits heute die Industrie. Gegenwärtig fokussieren sich die Entwicklungen auf die Dokumentation des Bauprozesses durch die Anreicherung und Standardisierung von architektonischen und technischen Gebäudemodellen. Der Vorfertigungsprozess ist in der Bauindustrie nicht tief verankert und die gängigen Datenschnittstellen sind auf diese Entwicklung noch nicht ausreichend eingestellt. In der Zukunft wird der modell- und datenbasierte Austausch von Informationen zwischen Planungssoftware und Vorfertigungssoftware-Systemen (CAD, MES, PPS, ERP) verlustfrei verknüpft werden und neue Möglichkeiten zur Vorfertigung für die Industrie schaffen.

- Nachdem Produkthersteller sich im Markt positionieren und mit der Produktion von TGA-Verbundsystemen beginnen, werden die Unternehmen im ersten Schritt optimale Produktionsabläufe festlegen. Langfristig und bei einer positiven Entwicklung des Marktes, werden diese jedoch Möglichkeiten der Automation in Erwägung ziehen, um ihre kompetitiven Vorteile gegenüber dem Wettbewerb zu stärken. Dadurch werden erhebliche Vorabinvestitionen erforderlich, die übliche Prinzipien der Serienfertigung auf die Bauindustrie übertragen

und zu erheblichen Produktivitätssteigerung führen werden. Dabei werden die Unternehmen vom technologischen Fortschritt aus der Automobilbranche profitieren und Möglichkeiten zur Verbesserung der Produktivität durch Anwendung von Lean Production, Lagerhaltung, Techniken für die Rezyklierbarkeit und moderne Transportsysteme nutzen. Durch die Schaffung von herstellerspezifischen Bauteilbibliotheken und Konfiguratoren werden Produkthersteller TGA-Verbundsysteme für alle am Baubeteiligte zugänglich machen.

³¹ Building and Construction Authority, "Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)".

³² Ryan E. Smith, "Off-Site and Modular Construction Explained | WBDG - Whole Building Design Guide".

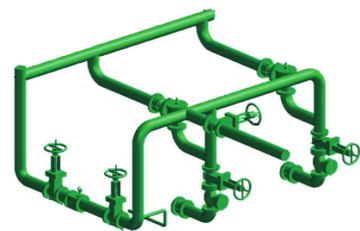
5 Identifikation von Anwendungsfällen für modulare TGA-Verbundsysteme

Modulare Produktentstehungsansätze

Konstruktion mit Modulen

Baukastensysteme Bau mit Modulen

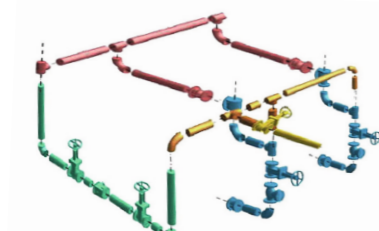
Entwurf eines Bauwerks mit existierenden Modulen nach einem Baukastenprinzip



Modularisierung der Bauwerksplanung

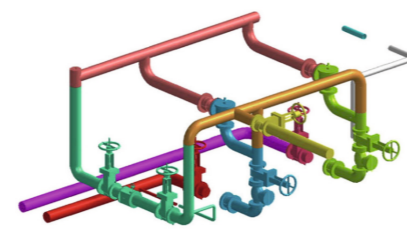
Ex ante Entwurf von Modulen

Entwurf von funktionalen Einheiten und Definition von gewerkeübergreifenden Schnittstellen



Ex post Identifizierung von Modulen

Gruppierung von existierenden Elementen zu funktionalen Baugruppen



Wiederholeffekte

Individualisierung

Abbildung 3: Typologie von drei komplementären Modularisierungsansätzen. Eigene Darstellung, Einordnung nach Liang and Huang (2002)³³

5.1 Als „Prinzip der Vereinfachung“ führt Modularität zur Komplexitätsreduktion bei der Bauprojektrealisierung

Angesichts immer komplexerer Projekte ist die Beherrschung der TGA-Gewerke im Bauablauf ein zunehmend kritischer Erfolgsfaktor. Im Allgemeinen lässt sich die Komplexität eines Systems verringern, indem die Anzahl der Systemelemente sowie Anzahl und Ausprägung der Abhängigkeiten zwischen diesen Elementen reduziert werden. Dieses als Modularität bezeichnete Konzept ermöglicht Unternehmen sogenannte Komplexitätskosten zu verringern und gleichzeitig gewünschte Produktvariationen am Markt anzubieten. Im Grunde genommen handelt es sich bei Modularität um das „Prinzip der Vereinfachung“, bestehend aus drei sich rekursiv wiederholenden Schritten:

- Zerlegung eines Systems in diskrete funktionale Einheiten
- Sicherstellen, dass Module untereinander austauschbar sind (Reduktion externer Schnittstellen)
- Zur Verfügung stellen von gut definierten Schnittstellen innerhalb eines Moduls (Definition interner Schnittstellen)

Im Ergebnis entstehen auf diese Weise sogenannte Module, die voneinander relativ unabhängige Einheiten darstellen und zugleich ausgeprägte Beziehungen zwischen den Subelementen enthalten. Marktanforderungen definieren dabei die „optimalen“ Eigenschaften des „Produktes“.³⁴

³³ Liang and Huang, „The agent-based collaboration information system of product development“.

³⁴ Amanda Eager et al., „Modular Design Playbook“.

5.2 Typologie von drei komplementären Modularisierungsansätzen

Ansätze zu modularen Produktentstehung können in drei verschiedene und potenziell komplementäre Aktivitäten unterteilt werden: Konstruktion mit Modulen, Entwurf von Modulen und Identifizierung von Modulen (siehe Abbildung 3).³⁵

Baukastensysteme: Konstruktion mit Modulen

Die Konstruktion mit Modulen umfasst die Errichtung eines Bauwerks mit bestehenden und vordefinierten Modulen und Fertigteilen, die intern oder von Lieferanten bezogen werden können. Der Entwurf des Bauwerks erfolgt also mit bereits existierenden Modulen, die in einem Baukastensystem zusammengefasst sind. Ein typisches Beispiel dafür ist der industrialisierte Wohnungsbau, bei dem durch Standardisierung und Fertigteile kostengünstiger und schneller Wohnraum errichtet wird. Ein weiteres Beispiel bilden vorgefertigte Technik- und Heizungszentralen, die als Container mit bereits vorinstallierter Technik ins Bauwerk eingebracht werden können.

Ex-ante Modularisierung: Entwurf von Modulen

Beim Ansatz der Ex-ante Modularisierung werden zu Beginn der Planung Anforderungen und Zielsetzungen definiert, um in der initialen Phase des Bauwerksentwurfs die Architektur in funktionale Abschnitte einzuteilen und in einzelne Module zu zerlegen. Entscheidend ist dabei, dass Modularisierung nicht zum Selbstzweck eingesetzt wird, sondern strategischen Zielsetzungen unterliegt und zweckdienlich zum Einsatz kommt. Solche Zielsetzungen werden

³⁵ Liang and Huang, „The agent-based collaboration information system of product development“.

Modularisierungstreiber genannt und können finanzielle, marktspezifische, prozess- und produktspezifische Dimensionen einnehmen. Mögliche Treiber sind bspw. die Reduzierung der Durchlauf- oder Entwicklungszeit, Standardisierung der Montage, Vereinfachung des Änderungsmanagements, Flexibilisierung der Einbringung, Steigerung der Nachhaltigkeit oder Reduzierung der Logistikkosten. Unter der Verwendung einer Modulindikationsmatrix (MIM) können funktionale Einheiten und Modularisierungstreiber gegenübergestellt und zur Unterstützung eines modularen Entwurfs genutzt werden (siehe Abschnitt 5.3). Ein typisches Beispiel für den Entwurf von Modulen in der Planungsphase ist die abschnittsweise Zusammenfassung und Modularisierung der vertikalen und horizontalen Medienverteilung im Gebäude. Da Fachmodelle in der Regel ohne eine entsprechende Funktionalität (Festpunkt, Dehnungsausgleich, Halterungen) modelliert werden, ist ein planungsbegleitender Modularisierungsansatz notwendig, um eine industrielle Vormontage zu ermöglichen.

Ex-post Modularisierung: Identifizierung von Modulen

Mit dem Ex-post Modularisierungsansatz sollen in der bereits fortgeschrittenen Planung Module über computergestützte Verfahren identifiziert und zusammengefasst werden. Aus einem Bauwerksinformationsmodell wird mithilfe von vordefinierten Zielfunktionen und Kriterienkatalogen eine optimale Aufteilung zwischen Modulen und Funktionsträgern berechnet. Bauwerksinformationsmodelle haben eine inhärente Netzwerktopologie, aus der sich implizite Eigenschaften ableiten lassen. So können Funktionsträger mit ähnlichen Eigenschaften

Gegenwärtig fehlen auf der Anbieterseite eine technologische Konvergenz bei Lösungen von modularen TGA-Verbundsystemen und auf der Nachfrageseite Konsens und Akzeptanz hinsichtlich der Vorteile und Potenziale der Modularisierung.

ten gruppiert und Schnittstellen zwischen diesen reduziert werden. Allgemein können Abhängigkeiten und Ähnlichkeiten als zwei generische Eigenschaften angesehen werden, nach denen Module gruppiert bzw. getrennt werden können. Je nach verfolgter Zielstellung im Modularisierungsprozess, können diese generischen Eigenschaften in spezifischere Indikatoren übersetzt bzw. instanziiert werden. Diese Indikatoren werden Modularitätsmetriken genannt und können weiter in Ähnlichkeits- und Abhängigkeitsmetriken unterteilt werden. Eine Abhängigkeitsmetrik kann bspw. der Aufwand zur Zerlegung zweier zusammenhängender Teile oder deren Positionierung sein. Eine Ähnlichkeitsmetrik wiederum kann ein in der Montageprozesskette verwendetes Handhabungswerkzeug oder die erwartete technische und wertmäßige Lebensdauer von Bauteilen sein.

5.3 Anwendungsfälle für die Vorfertigung von modularen TGA-Verbundsystemen

Durch eine Funktionsintegration und Vorverlagerung von Montage- und Installationsprozessen können modulare TGA-Verbundsysteme die Endmontage beschleunigen und die Bauzeit verkürzen (siehe Abbildung 4). Gegenwärtig fehlt jedoch eine technologische Konvergenz zwischen technischen Lösungen und marktseitigen

Systemspezifikationen. Diese Diskrepanz spiegelt sich auch in einer fehlenden Konfigurierbarkeit und Vergleichbarkeit von Systemen wider. In diesem Zusammenhang werden in der Tabelle 1 funktionale TGA-Zonen Modularisierungstreibern auf Produkt- und Prozessebene gegenübergestellt und hinsichtlich deren Ausprägung qualitativ eingeordnet. Auf diese Weise kann vereinfachend ein Modularisierungspotential für die jeweilige funktionale TGA-Zonen angezeigt werden.

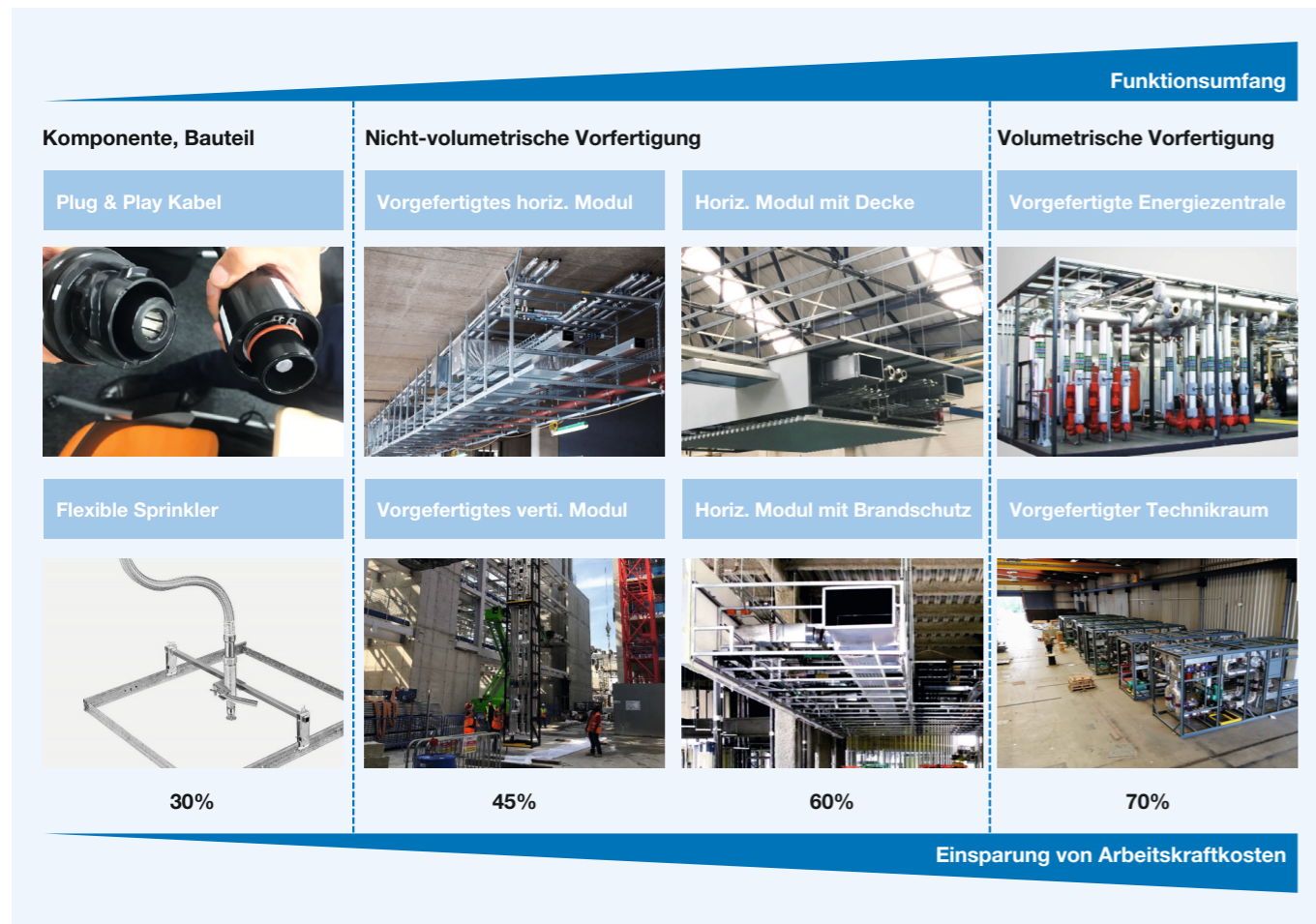


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Funktionsintegration und Einsparungen von On-site-Arbeitskosten
Eigene Darstellung, in Anlehnung an Building and Construction Authority³⁶

³⁶ Construction Authority, "Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)".

Direkter Einfluss

- Hoch
- Gering
- kein
- Potential zur Modularisierung

| Funktionale TGA-Zonen | Baugruppe | Modularisierungstreiber | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | Prozess | Produkt | | | | Modularisierungspotential | |
| | | Transportfähigkeit | Wiederholbarkeit | Schnittstellenreduktion | Individualisierungsgrad | Einbringungsflexibilität | Vorfertigungsgrad | Modularisierungspotential |
| Erschließung/ Versorgung | Gasanschluss | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Fernwärmeleitungen/-anschluss | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Wasserversorgung/-anschluss | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Abwasserleitungen/-anschluss | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Stromleitungen/-anschluss | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Wandlung | Energiezentrale | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Heizzentrale | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Lüftungszentrale | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Transport | Technikschacht | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Medientrassen | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Übergabe | Versorgungspanel | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Wärmeübergabesysteme | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Sanitärgegenstände | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Nasszellen (Sanitärräume) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Raumzellen (Büro, Schule) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Laboreinheiten | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | ICT-Infrastruktur (Data-Center) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Nachhaltige Energieerzeugung | Solarthermie | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Photovoltaik | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | Geothermie | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

Tabelle 1: Identifikation von modularen TGA-Verbundsystemen, Einordnung von TGA-Zonen nach Lechner et. al. (2018)³⁷, Modularisierungstreiber nach Viana, Tommelein and Formoso (2017)³⁸ und Bonvoisin et al. (2016)³⁹, Qualitative Einordnung Experteninterviews, Konsortium BIM Center Aachen

³⁷ Lechner and Winter, "Bauen mit WEITBLICK".

³⁸ Viana, Tommelein, and Formoso, "Using Modularity to Reduce Complexity of Industrialized Building Systems for Mass Customization".

³⁹ Bonvoisin et al., "A systematic literature review on modular product design".

Prozesstechnische Eigenschaften von Systemen, die dazu beitragen den Bauablauf zu beschleunigen sind Transportfähigkeit, Wiederholbarkeit und Toleranzflexibilität. Transportfähigkeit kann beim technischen Entwurf berücksichtigt werden, indem Lademaße und Gewichte eine vereinfachte Transportierbarkeit zur und auf der Baustelle ermöglichen. Die Parallelisierung von Montageprozessen entsteht durch Wiederholfaktoren, bspw. durch eine Rasterfestlegung. Eine im Entwurf berücksichtigte Einbringungsflexibilität ermöglicht bei der Montage flexibel auf Toleranzen am Rohbau zu reagieren, z.B. durch Verstellbarkeit von Aufhängungen bei einem Trassenmodul, um Unebenheiten der Decke zu kompensieren.

Produkttechnische Eigenschaften wie Schnittstellenreduktion, Individualisierungsgrad und Vorfertigungsgrad können ebenfalls zur Adaption von Lösungen beitragen. In der Reduktion von Schnittstellen liegt ein großes Einsparpotential sowohl in der Planung als auch im Bauablauf. Schnittstellen können durch gewerkeübergreifende Funktionsintegration bspw. durch bereits angelegte Kabelbäume oder integrierte Befestigungstechnik reduziert werden. Die Konfigurierbarkeit von Lösungen mit einer hohen Variantenvielfalt ermöglicht es systematisch einen hohen Individualisierungsgrad zu erreichen. Ein hoher Vorfertigungsgrad von Lösungen geht mit der Vorverlagerung von einzelnen Montage- und Installationsprozessen einher, die zur Koordinationsreduktion auf der Baustelle beitragen. Auf Grundlage der vorgestellten Indikatoren haben Baugruppen, die den funktionalen TGA-Zonen Technikraum, vertikale und horizontale Verteilungen und Verteilung innerhalb des Bauwerks, zugeordnet sind, ein hohes Potential zur Modularisierung.

5.4 Einordnung von modularen TGA-Verbundsystemen nach Fertigungsprinzipien

Beim modularen Bauen besteht ein Spannungsfeld zwischen individuellen, projektspezifischen Kundenanforderungen und der Integration dieser in den technischen Entwurf. Projektspezifische Anforderungen lassen sich durch den Hersteller nur teilweise in der modularen Produktarchitektur antizipieren oder durch Varianten abdecken. Spät an den Anbieter übermittelte Anforderungen, haben lange Liefer- und Durchlaufzeiten oder gar die Rückverlagerung von Produktionsschritten auf die Baustelle zur Folge (siehe Abbildung 5).

Allgemein lassen sich Fertigungsprozesse nach dem Zeitpunkt der Kundeneinbindung klassifizieren (Entkopplungspunkt) und vier verschiedenen Fertigungsprinzipien zuordnen. Vorfertigung von Baugruppen findet jeweils im Rahmen von Assemble-to-Order (A-t-O), Make-to-Order (M-t-O) und Engineer-to-Order (E-t-O) Prozessen statt.⁴⁰ Die Bandbreite des Modularen Bauens klammert die Massenfertigung von Einzelteilen, Unterbaugruppen und Komponenten aus. Tabelle 2 grenzt diese weiter nach Kundeneinbindung, Art der Produktion und Produktionstyp voneinander ab.



Abbildung 5: Vorgefertigte Rohrelemente

⁴⁰ Barg, "Kontextbezogene Auslegung von Produktbaukästen".

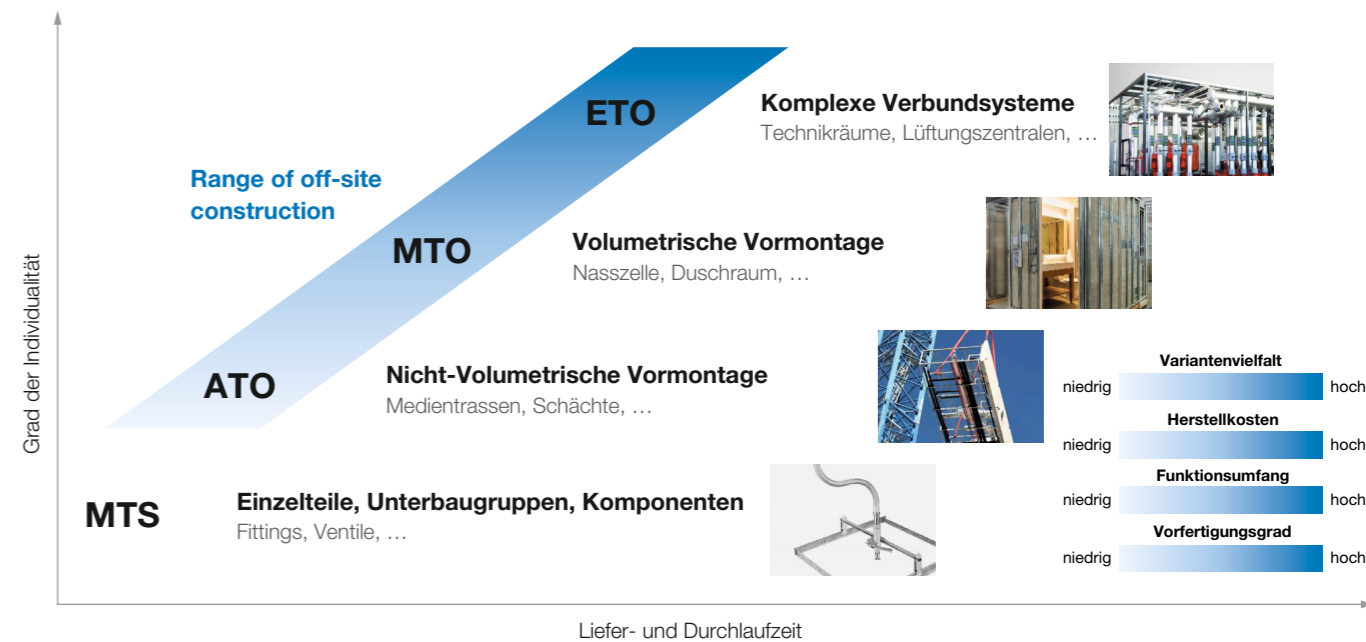


Abbildung 6: Fertigungsprinzipien des modularen Bauens, Eigene Darstellung
 Einordnung der TGA-Baugruppen, Eigene Einordnung, angelehnt an Peltokorpi et al. (2018)⁴¹
 Bandbreite der Vorfertigung nach Ryan E. Smith (2016)⁴²
 Klassifikation Wertschöpfungsprozesses nach Wortmann (1983)⁴³
 Eigene Einordnung Variantenvielfalt, Herstellkosten, Funktionsumfang Vorfertigungsgrad, BIM Center Aachen
 Legende: Make-to-Stock (M-t-S), Assemble-to-Order (A-t-O), Make-to-Order (M-t-O) und Engineer-to-Order (E-t-O)

⁴¹ Peltokorpi et al., "Categorizing modularization strategies to achieve various objectives of building investments".
⁴² Ryan E. Smith, "Off-Site and Modular Construction Explained | WBDG - Whole Building Design Guide".
⁴³ Wortmann, "A Classification Scheme for Master Production Scheduling" Wortmann, "A Classification Scheme for Master Production Scheduling".

| Fertigungsprinzip | Kundeneinbindung | Art der Produktion | Produktionstyp |
|--|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Engineer-to-Order (ETO) | Technischer Entwurf | Auftragsgetrieben | Einzelfertigung |
| Beispiele: Energiezentrale <ul style="list-style-type: none"> Stark individualisierte Produkte, die noch im Details entworfen und entwickelt werden müssen Das System wird als Unikat speziell für die Anforderungen des Kunden hergestellt Komplexes Endprodukt -> stetige Kommunikation mit dem Auftraggeber über alle Entwicklungs- und Herstellungsphasen hinweg, um Anforderungen und Spezifikationen abzusprechen | | | |
| Make-to-Order (MTO) | Vorfertigung | Auftragsgetrieben | Auftragsfertigung / Serienfertigung |
| Beispiel: Nasszelle <ul style="list-style-type: none"> Standardisiertes Produktdesign, dessen finale Herstellung spezifisch auf die Kundenwünsche angepasst wird Einige der benötigten Bestandteile sind auf Lager, während individuelle Komponenten separat hergestellt werden | | | |
| Assemble-to-Order (ATO) | Vormontage | Auftragsgetrieben | Variantenfertigung / Serienfertigung |
| Beispiele: Medientrasse <ul style="list-style-type: none"> Eine große Anzahl von Baugruppen kann durch standardisierte Komponenten hergestellt werden Schlüsselkomponenten werden geplant und je nach antizipierten Bestellungen vorproduziert und gelagert Bei eingehender Bestellung wird die Trasse nach Projektanforderungen hergestellt | | | |
| Make-to-Stock (MTS) | Lieferung | Vorhersagegetrieben | Massenfertigung |
| Beispiel: Gasanschluss <ul style="list-style-type: none"> Das Produkt wird auf Grundlage von Marktstudien und Nachfragevorhersagen entworfen, hergestellt und verkauft Hergestellt aus Warenbestand | | | |

Tabelle 2: Einordnung der Fertigungsprinzipien in Anlehnung an CODP-Modell von Wortmann (1983)⁴⁴

⁴⁴ Wortmann, "A Classification Scheme for Master Production S

Die Vorfertigung von Baugruppen ist im Gegensatz zur Massenfertigung auftrags- und nicht vorhersagegetrieben. Entscheidend ist hierbei, dass mit steigendem Bedarf nach Individualisierung, der Anbieter zur Fertigungsplanung entsprechend früh in den Planungsprozess eingebunden werden muss. Andernfalls können die projektspezifischen Anforderungen nur spät an die Fertigung übergeben werden, woraus längere Liefer- und Durchlaufzeiten resultieren. Im Resultat können Verzögerung auf der Baustelle ausgelöst werden und positive Effekte der Vorfertigung zunichtemachen.

5.5 Mehrwerte entlang der Wertschöpfungskette Bauen

Zu Vorteilen des Modularen Bauens wurden und werden viele Untersuchungen durchgeführt. Im Vergleich zu traditionellen Bauverfahren ergeben sich als Vorteile kürzere Bauzeitenpläne, größere Vorhersagbarkeit der Kosten, weniger Materialabfall, geringere Beeinträchtigung der Umgebung und eine höhere Sicherheit der Arbeiter. In der folgenden Darstellung werden Mehrwerte in die entsprechenden Phasen der Wertschöpfungskette eingeordnet und hinsichtlich ihres Einflusses auf Akteure (Bauherr, Planer, Bauunternehmen und Hersteller) und Ziele (Kosten, Qualität, Zeit und Umwelt) kategorisiert (Tabelle 3).

Die Abkürzungen folgen hierbei folgender Nomenklatur:

K – Kosten, Q – Qualität, Z – Zeit, EI – Umwelt/Environmental Impact, BH – Bauherr, PL – Planer inkl. Projektsteuerer, BU – Bauunternehmen, HS – Hersteller

Direkter Einfluss

■ Hoch

■ Gering

| Mehrwerte | Beschreibung | Bewertung | | | |
|------------------------------------|--|--------------|---|---|----|
| Planungsphase | | | | | |
| Wiederverwendbarkeit von Entwürfen | Die Bauindustrie ist zwar noch nicht darauf eingestellt, mit modularen Entwürfen zu arbeiten, langfristig wird jedoch die Wiederverwendung von modularen Baugruppen in verschiedenen Projekten zu Einsparungen bei der Planung führen. In der Zukunft werden Baugruppenkataloge bzw. Konfigurationslösungen dabei helfen. | Ziele | | | |
| | | K | Q | Z | EI |
| | | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | |
| BH PL BU HS | | | | | |
| | | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Beschaffung | | | | | |
| Vereinfachtes Zulieferermanagement | Aus anderen Industrien ist bekannt, dass eine verstärkte Modularisierung zur Intensivierung der Lieferantenbeziehungen führt. Höhere Volumina ermöglichen die Entwicklung strategischer Lieferantenbeziehungen, die zu Vereinfachungen, wie bspw. verlängerten Zahlungsfristen, höheren Handelskrediten und besseren Preisen niederschlagen, die letztlich Kostenvorteile ergeben, die im Wettbewerb an den Markt weitergegeben werden können. | Ziele | | | |
| | | K | Q | Z | EI |
| | | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | |
| BH PL BU HS | | | | | |
| | | ■ | ■ | ■ | ■ |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|----|---|---|----|--|--|--|--|------------------------------|--|--|--|----|----|----|----|--|--|--|--|
| <p>Intensivierung des Zulieferer-Hersteller-Verhältnisses</p> | <p>Die Entwicklung von modularen Einheiten setzt höhere Anforderungen an Zulieferer und Hersteller, die bei einer Vielzahl von Projekten/Produkten/Systemen zusammenarbeiten. Durch die engere Einbindung von Zulieferern, können neue, tiefere technische Fähigkeiten erlernt werden und Wettbewerbsvorteile entstehen.</p> | <p>Ziele</p> <table border="1"> <tr><td>K</td><td>Q</td><td>Z</td><td>EI</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td colspan="4">Baubeteiligte Akteure</td></tr> <tr><td>BH</td><td>PL</td><td>BU</td><td>HS</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> | K | Q | Z | EI | | | | | Baubeteiligte Akteure | | | | BH | PL | BU | HS | | | | |
| K | Q | Z | EI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BH | PL | BU | HS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Schnellere Markteinführung</p> | <p>Modulare Systeme verkürzen die Lieferzeit, die benötigt wird, um eine Baugruppe an die individuellen Anforderungen des Projektes anzupassen, da auf bereits entwickelte Elemente und Fertigungsabläufe zurückgegriffen werden kann.</p> | <p>Ziele</p> <table border="1"> <tr><td>K</td><td>Q</td><td>Z</td><td>EI</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td colspan="4">Baubeteiligte Akteure</td></tr> <tr><td>BH</td><td>PL</td><td>BU</td><td>HS</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> | K | Q | Z | EI | | | | | Baubeteiligte Akteure | | | | BH | PL | BU | HS | | | | |
| K | Q | Z | EI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BH | PL | BU | HS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Vorfertigung</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Geringere Kosten für Lagerhaltung</p> | <p>Höhere Standardisierung führt zu einer Verringerung der Anzahl von Einzelteilen, die für die Konstruktion benötigt werden und reduziert auch den Bestand an benötigten Ersatzteilen. Die Konsolidierung von eingekauften Komponenten führt auch zu einer einfacheren Lagerhaltung und Bestandsverwaltung, da es weniger Produktkategorien zu verwalten gibt.</p> | <p>Ziele</p> <table border="1"> <tr><td>K</td><td>Q</td><td>Z</td><td>EI</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td colspan="4">Baubeteiligte Akteure</td></tr> <tr><td>BH</td><td>PL</td><td>BU</td><td>HS</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> | K | Q | Z | EI | | | | | Baubeteiligte Akteure | | | | BH | PL | BU | HS | | | | |
| K | Q | Z | EI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BH | PL | BU | HS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Diversifikation des Produktportfolios</p> | <p>Obwohl die Anzahl der einzelnen Komponenten in einer Baugruppe durch die modulare Bauweise typischerweise abnimmt, erhöht sich die Anzahl der möglichen Produktvariationen, wodurch ein vielfältigeres Produktportfolio entstehen kann.</p> | <p>Ziele</p> <table border="1"> <tr><td>K</td><td>Q</td><td>Z</td><td>EI</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td colspan="4">Baubeteiligte Akteure</td></tr> <tr><td>BH</td><td>PL</td><td>BU</td><td>HS</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> | K | Q | Z | EI | | | | | Baubeteiligte Akteure | | | | BH | PL | BU | HS | | | | |
| K | Q | Z | EI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BH | PL | BU | HS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|----|---|---|----|--|--|--|--|------------------------------|--|--|--|----|----|----|----|--|--|--|--|
| <p>Reduktion von Komplexitäts- und Umrüstungskosten</p> | <p>Ein höheres Volumen von mehr standardisierten Modulen führt zu einer Reduzierung der Umrüstkosten und der Anzahl der für die Produktion benötigten Werkzeuge.</p> | <p>Ziele</p> <table border="1"> <tr><td>K</td><td>Q</td><td>Z</td><td>EI</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td colspan="4">Baubeteiligte Akteure</td></tr> <tr><td>BH</td><td>PL</td><td>BU</td><td>HS</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> | K | Q | Z | EI | | | | | Baubeteiligte Akteure | | | | BH | PL | BU | HS | | | | |
| K | Q | Z | EI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BH | PL | BU | HS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Errichtung</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Reduktion der Gemeinkosten der Baustelle</p> | <p>Die modulare Bauweise hat bereits bewiesen, dass sie die Projektlaufzeiten verkürzt, was wiederum die Baustellengemeinkosten (z. B. Sicherheit und Management witterungsbedingter Probleme) und das Baumanagement niedrig hält.</p> | <p>Ziele</p> <table border="1"> <tr><td>K</td><td>Q</td><td>Z</td><td>EI</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td colspan="4">Baubeteiligte Akteure</td></tr> <tr><td>BH</td><td>PL</td><td>BU</td><td>HS</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> | K | Q | Z | EI | | | | | Baubeteiligte Akteure | | | | BH | PL | BU | HS | | | | |
| K | Q | Z | EI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BH | PL | BU | HS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Reduktion der Bauzeit</p> | <p>Je nach Projekttyp ermöglicht die Installation von vorgefertigten TGA-Verbundsystemen auf der Baustelle erhebliche Personal- und Zeiteinsparungen von bis zu 60 %. Die traditionellen Bauabläufe werden durch einen modularen Ansatz vereinfacht und beschränken sich im Wesentlichen auf die Montage von Baugruppen und den Anschluss der Versorgungsleitungen an die Hauptanschlüsse.</p> | <p>Ziele</p> <table border="1"> <tr><td>K</td><td>Q</td><td>Z</td><td>EI</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td colspan="4">Baubeteiligte Akteure</td></tr> <tr><td>BH</td><td>PL</td><td>BU</td><td>HS</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> | K | Q | Z | EI | | | | | Baubeteiligte Akteure | | | | BH | PL | BU | HS | | | | |
| K | Q | Z | EI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BH | PL | BU | HS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Höhere Flexibilität und Agilität auf der Baustelle</p> | <p>Die Produktion der vorgefertigten TGA-Baugruppen/-Verbundsysteme erfolgt gleichzeitig mit anderen Aktivitäten auf der Baustelle, was zu zusätzlicher Reduktion der Bauzeit führt.</p> | <p>Ziele</p> <table border="1"> <tr><td>K</td><td>Q</td><td>Z</td><td>EI</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td colspan="4">Baubeteiligte Akteure</td></tr> <tr><td>BH</td><td>PL</td><td>BU</td><td>HS</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> | K | Q | Z | EI | | | | | Baubeteiligte Akteure | | | | BH | PL | BU | HS | | | | |
| K | Q | Z | EI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Baubeteiligte Akteure | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BH | PL | BU | HS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | |
|---------------------------------|--|---|
| Verringerung der Nachträge | Durch eine kontrollierte Fertigung in der Fabrikumgebung, lässt sich eine höhere Qualität der vormontierten Baugruppen erreichen, weswegen Nachträge tendenziell reduziert werden. Die Reduzierung oder Eliminierung von Nachträgen trägt zur Einhaltung und Verbesserung von Bauabläufen bei und führt zur Einhaltung der Bauzeitenpläne. | Ziele K Q Z EI ■ ■ ■ ■ Baubeteiligte Akteure BH PL BU HS ■ ■ ■ ■ |
| Betrieb | | |
| Inkrementelle Upgrades | Einzelne Bestandteile von TGA-Verbundsystemen können einfacher durch technisch fortschrittliche Komponenten mit höherer Funktionalität der gleichen Produktlinie ausgetauscht werden und somit zur höheren Qualität und Nachhaltigkeit von Bestandsgebäuden beitragen. | Ziele K Q Z EI ■ ■ ■ ■ Baubeteiligte Akteure BH PL BU HS ■ ■ ■ ■ |
| Erhöhte Zuverlässigkeit | Umfassende Entwicklungsprozesse von TGA-Verbundsystemen tragen dazu bei, dass spezifische Probleme im Betrieb identifiziert und beseitigt werden können, bevor diese ins Gebäude eingebaut werden. Durch die Verbesserung einzelner Module und Schnittstellen wird das gesamte System Gebäude robuster. | Ziele K Q Z EI ■ ■ ■ ■ Baubeteiligte Akteure BH PL BU HS ■ ■ ■ ■ |
| Effektive Wartung und Reparatur | Bei modularen Verbundsystemen können bereits in der Vorentwicklung Revisionsöffnungen bzw. Wartungsräume flächeneffizient eingeplant werden. Defekte beeinträchtigen in der Regel nicht die gesamte Funktion des Systems, können auf bestimmte fehlerhafte Module oder Schnittstellen zurückgeführt und durch Reparatur oder Austausch behoben werden. | Ziele K Q Z EI ■ ■ ■ ■ Baubeteiligte Akteure BH PL BU HS ■ ■ ■ ■ |

| | | | |
|--------------------------------------|---|---|--|
| Rückbau | | | |
| Wiederverwendbarkeit von Materialien | Einfachere Demontage erhöht die Rezyklierbarkeit von modularen TGA-Verbundsystemen. Damit wird der Environmental Impact verringert. | Ziele K Q Z EI ■ ■ ■ ■ Baubeteiligte Akteure BH PL BU HS ■ ■ ■ ■ | |

Tabelle 3: Mehrwerte des Modularen Bauens entlang der Wertschöpfungskette

6 Fallstudie Vorfertigung von modularen Medientrassen

Befestigungstechnik ist kein Planungsgewerk nach der HOAI, weswegen es im Planungsprozess eher „stiefmütterlich“ behandelt wird. In Fachmodellen werden in der Regel keine Festpunkte, Dehnungsausgleiche und Halterungen berücksichtigt. Ohne Halterungen ist eine detaillierte Planung erst in der Werk- und Montageplanung möglich. Dies löst verschiedene Ineffizienzen aus, denn ohne Planung der Befestigungstechnik sind Platzverhältnisse und Ausführbarkeit nicht prüfbar, keine Mengen- und Kostenprognose möglich, keine industrielle Vormontage planbar und Termin- und Kostenprobleme vorprogrammiert.

Das Unternehmen HILTI, dessen Umsetzungsstrategie im Rahmen dieser Fallstudie näher betrachtet werden soll, bietet eine Dienstleistung an, die bei der digitalen Planung der Befestigungstechnik unterstützt. Dank der detaillierteren Planung liegen Informationen vor, die für die Vorfertigung genutzt werden können und eine schnelle Montage auf der Baustelle ermöglichen. Der Auftraggeber verfolgte das Ziel, die Produktivität auf der Baustelle durch

Verkürzung der Einbauzeit zu verbessern. Dies sollte jedoch nicht zu Einbußen bei der Qualität führen und gleichzeitig die Baukosten niedrig halten. Die dadurch entstehende Herausforderung war, dass die hierfür notwendige Planung keinen festen Bestandteil der derzeitigen Planungspraxis darstellt. Daher mussten in der Planung zusätzliche Leistungen erbracht und beauftragt werden (z.B. Planung der Befestigung, ausreichende Detaillierung der Haustechnik). Das Unternehmen fungierte in diesem Projekt als alleiniger Ansprechpartner für das Thema Befestigungstechnik und begleitete den Auftraggeber durch die Phasen Planung, Vorfertigung und Lieferung. Zum Projektauftritt analysierte das HILTI das existierende Haustechnikmodell und erstellte in seiner Planungsabteilung ein Befestigungskonzept inkl. Aufwandsschätzung. Für den Kunden konnten damit Aufwände für die Fertigungs- und Montageplanung inklusive der anfallenden Materialkosten aufgeschlüsselt werden, die bei einer modularen Bauweise notwendig wären. Vergleichsweise wurden die Aufwände für eine konventionelle Montage abgeschätzt, bei dem das benötigte Material

direkt vor Ort bestellt wird. Nach der Konzepterstellung und der Beauftragung durch den Kunden, arbeitete das Unternehmen eng mit dem Planungsteam der Haustechnik zusammen, um eine optimale Auslegung der Befestigungslösung zu gewährleisten. Nach Abschluss der Planung wurden die benötigten Informationen übergeben und mit der Vorfertigung begonnen. Durch die Einbindung der Befestigungsplanung in die Haustechnikplanung, bekommt der Bauherr eine höhere Transparenz über den Aufwand und die Kosten des Bauprojekts.

Eine große Herausforderung ist die Vergleichbarkeit von Aufwänden und Kosten zwischen konventioneller und modularer Bauweise. Ein direkter Vergleich der zu erbringenden Leistungen ist ausgeschlossen, da im Vorfeld keine konventionelle Planung durchgeführt worden ist. Ein indirekter Vergleich aus bereits abgeschlossenen Projekten ist nur bedingt gültig, da die Randbedingungen (Architektur, Verfahren, etc.) sehr heterogen sind. Um Transparenz erzeugen und die Wirkung einer modularen Bauweise

demonstrieren zu können, müssen dennoch konkrete Mehrwerte genannt werden, z. B. Zeitersparnis, Kosteneinsparungen, Referenzen/ Folgeprojekte, etc. Zu diesem Zweck wurden Versuche angelegt, um konventionelle Praktiken mit modularen Verfahren hinsichtlich Zeit und Materialverbrauch zu evaluieren. Am Beispiel des Europäischen Patent Office in den Niederlanden konnte so etwa durch die Befestigungsplanung anstatt der konventionellen Planung eine Materialeinsparung von ca. 40 % erzielt werden. Durch die Verwendung der Vorfertigung (auf Basis der Planung) wurde die Einbaugeschwindigkeit verdoppelt. Erste Ansätze von vorgefertigten Moduleinheiten im Bereich von Datacentern ergab eine Verkürzung der Einbaudauer von ca. einer Woche auf einen Tag. Die Etablierung der Befestigungsplanung in Kombination mit der Vorfertigung ist auch in Zukunft geplant. Weiterhin soll das Angebot durch neue Servicekomponenten oder Geräte (z.B. automatisiertes Bohren) stetig ausgebaut werden. Ein Beispiel hierfür ist auch das modellbasierte Labeling/Tagging, was weitere digitale Prozesse zur Produktivitätssteigerung ermöglicht.

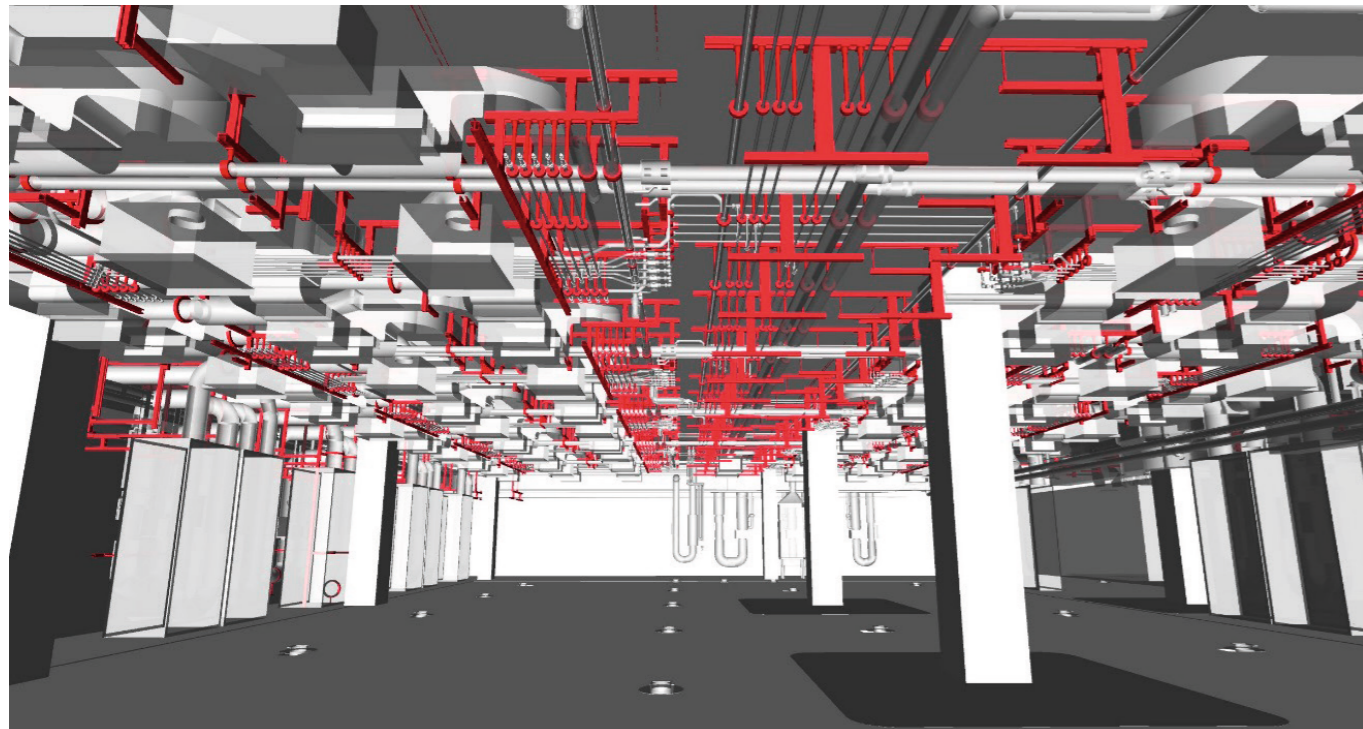


Abbildung 7: Digitale Planung der Befestigungstechnik



Abbildung 8: Montage der Befestigungstechnik auf der Baustelle

7 Fallstudie modellbasierte Vorfabrikation von Rohrleitungen



Abbildung 9: CNC-gesteuerte Maschine der Fertigungsstraße

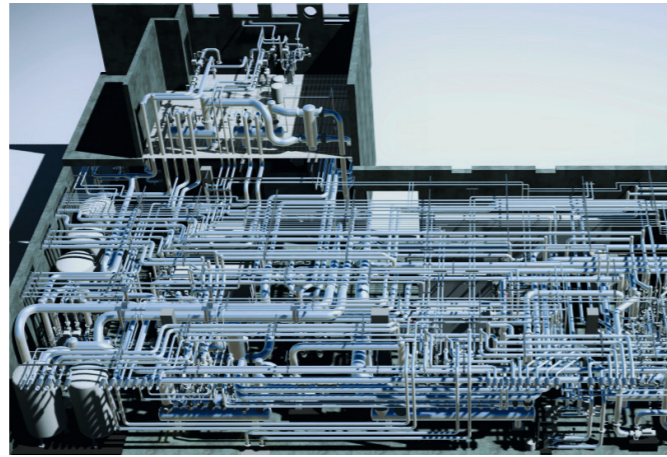


Abbildung 10: BIM-Modell Technikzentrale



Abbildung 11: Innenansicht Fertigung ROM-Technik

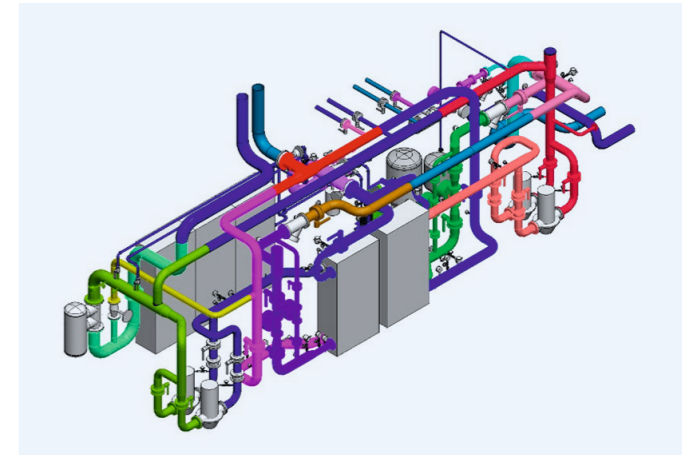


Abbildung 12: Partitionierung des BIM-Modells für die Vorfabrikation

Der Fertigstellungstermin ist für jeden Auftraggeber im Bauprojekt der wichtigste Meilenstein. Besonders viel Druck lastet auf dem Übergabetermin bei produzierenden Unternehmen, bei denen die Produktionsplanung von der Fertigstellung des Projekts abhängt. Gleichzeitig sind Bauprojekte stark risikobehaftete Vorhaben, die bei hohem Termindruck nur über geringe Pufferzeiten bei den Abläufen verfügen. Eintretende Risiken führen daher direkt zu einem beachtlichen Terminverzug, wobei ausführenden Unternehmen in der Regel die Werkzeuge und Mittel fehlen, um Verzögerungen entgegenzuwirken.

Im Rahmen der betrachteten Fallstudie, war das Projektziel des Auftraggebers beim vereinbarten Übergabetermin den Produktionsstart am entsprechenden Standort zu realisieren. Zum Projektauftrag von ROM-Technik bestand bereits eine beträchtliche Verzögerung, u. a. bei der Fertigstellung der Bodenplatte. Als ausführendes TGA-Unternehmen sollte ROM-Technik den Verzug ausgleichen, um den Endtermin halten zu können. In der Regel führt der Ansatz, mehr Ressourcen in einer späten Phase des Projektes hinzuzufügen, nicht zu einer Beschleunigung, da der Fachkräftemangel, Einarbeitung, Materialversorgung und besonders der erhöhte Koordinationsaufwand dem Ziel entgegenwirken.

Daher verfolgte das Unternehmen ROM-Technik einen anderen technologischen Lösungsansatz, der zum Zeitpunkt der Vergabe des Auftrags sich noch in der Entwicklung befand und nicht aktiv durch das Unternehmen beworben wurde. Als ausführendes Unternehmen ist ROM-Technik bewusst, dass sie selten einen Einfluss auf den technischen Entwurf haben. Anforderungen aus der Fertigung, wie bspw. die Modularisierung des technischen Entwurfs, bleiben daher unberücksichtigt. Eine Serienfertigung erfordert jedoch Wiederholeffekte, die ohne eine modulare Planung nicht ausgelöst werden. Hinzu kommt, dass TGA-Anlagen sich strömungsoptimiert im Strang verjüngen und dadurch eine hohe Individualität haben. ROM-Technik hat daher einen technologischen Workflow entwickelt, der die optimierte Fertigung von Individualbaugruppen ermöglicht. Hierfür wurden die Prozesse und CAD-Software dahingehend verändert, dass die benötigten Isometrien für die Vorfabrikation mit möglichst wenig Aufwand erzeugt und an Maschinen übergeben werden konnten. Der Fertigungsprozess wurde um CNC-gesteuerte Maschinen erweitert, wodurch die Effizienz in der Produktion weiter erhöht wurde. Mit diesem optimierten Produktionsablauf kann ROM-Technik notwendige Daten für die Produktion aus einem BIM-Modell automatisch an eine Plasmaschneidanalgen übertragen und dadurch zeiteffizient Rohre bis zum Durchmesser von DN600 zuschneiden. Zeitaufwendige Schweißungen können mit einer Dornbiegemaschine

bis zu einem Rohrdurchmesser von DN80 eingespart werden. Rundschweißautomaten helfen weiter die Zeiten zu reduzieren. Schon nach Vergabe des Projektes wurde die Vorfabrikation eingeplant und Modelle erzeugt, um daraus notwendige Isometrien für den Maschinenpark abzuleiten. Die Partitionierung der Modelle in einzelne Baugruppen erfolgte manuell, programmtechnisch unterstützt mit Angaben über Gewicht und Maße. Die aus einem BIM-Modell erzeugten Isometrien enthalten alle Informationen, um individuelle Baugruppe fertigen und die entsprechende Maschinensteuerung bedienen zu können. Da direkt nach der Fertigstellung der Montageplanung mit der Produktion begonnen wurde, waren zum vereinbarten Montagebeginn bereits über 40 % der Baugruppen gefertigt.

Durch bereits eingetretene Verzögerungen bei der Fertigstellung der Bodenplatte konnte jedoch nicht „klassisch“ vor Ort mit der Endmontage begonnen werden. Erst nach zwei Monaten Verzug, konnte eine Baufreiheit hergestellt und vor Ort mit der Montage gestartet werden. Hinzukam, dass anders als bei konventionellen Methoden sich der Baufortschritt in der Phase der Vorfabrikation nicht durch die Sichtung der Situation vor Ort bewerten ließ. Der hohe Termindruck und kein sichtbarer Fortschritt auf der Baustelle lösten beim Bauherrn Zweifel hinsichtlich des Fertigstellungstermins aus. Als der Bauherr anordnete den Bauablauf zu beschleunigen

und ROM-Technik dies zusagen konnte, führte der Umstand, dass auf der Baustelle nicht aktiv gearbeitet worden ist, zu weiteren Irritationen beim Bauherrn. Selbst nach einem Werksbesuch und weiteren Statusberichten, wurde weiterhin der Fertigstellungstermin angezweifelt. Nach Beginn der Montage konnte ungeachtet der eingetretenen Risiken und Verzögerungen der geplante Termin eingehalten werden. Bei der Montage entsteht ein „Pop-up-Effekt“, also die sehr schnelle Aufstellung der Anlage. Die Entkoppelung der baulichen Vorleistungen ist ein enormer Vorteil der Vorfabrikation und ein Hebel, der ROM-Technik ermöglichte die gewünschte Leistung zu erbringen. Ein weiterer Vorteil ist die erhöhte Qualität und die „Sauberkeit“ vor Ort. In einer initialen Geschäftssimulation in Kooperation mit der RWTH Aachen wurde im Vorfeld gezeigt, dass sich ein enormes Einsparpotential der Schweißfachkräfte von 39-50 % und der Vorrichter von 31-40 % ergibt. Diese Berechnungen wurden ohne den Einsatz einer CNC-Maschine durchgeführt. Mit jeder Biegung wird der Zuschnitt, ein Bogenformteil und 2 Schweißnähte, gespart. Beispiel: ein 6 m Rohr DN 80 und 3 Bögen werden mit 363 Minuten veranschlagt, gebogen hingegen wird die gesamte Einheit unter 15 Minuten hergestellt. Die Plasmaschneidanlage schneidet z.B. ein Rohr DN 500 in unter 10 Minuten auf die korrekte Länge inklusive der benötigten Fasen. Ohne diese Maschine benötigt das Unternehmen ROM-Technik über 60 Minuten für die gleiche Arbeit.

8 Implikationen aus Vergaberecht und -praxis

Grundsätzlich kann der öffentliche Auftraggeber frei entscheiden „Was“ für Leistungen er konkret beauftragen möchte. Bei der Ausschreibung und letztlich Vergabe von Leistungen ist er aber an das Vergaberecht gebunden, welches das „Wie“ der Beschaffung regelt. Beabsichtigt der öffentliche Auftraggeber vom Vergaberecht abzuweichen, entsteht für ihn ein zusätzlicher Begründungsaufwand. Im Fall von modularen TGA-Verbundsystemen müsste der öffentliche Auftraggeber gegenwärtig kaum vergleichbare Leistungen über die Grenzen eines Gewerks hinweg vergeben. Diese Ausschreibung würde zwei zentrale Prinzipien des Vergaberechts tangieren – zum einen das Gebot der produktneutralen Ausschreibung und zum anderen das Gebot der getrennten Ausschreibung bei Fachlosen.

8.1 Produktneutralität und Vergabe nach Fachlosen

Mit der Neuheit von TGA-Verbundsystemen geht folglich eine fehlende Vergleichbarkeit und letztlich Transparenz einher. Das Vergaberecht schreibt diesbezüglich vor, dass ein öffentlicher Auftraggeber in seiner Ausschreibung weder offen noch verdeckt ein bestimmtes Produkt vorgeben darf. Bei einer offenen Produktvorgabe handelt es sich um explizite Vorgaben hinsichtlich eines bestimmten Fabrikats, Verfahrens, Herstellers, Typs oder eines näher konkretisierten Ursprungs.⁴⁵ Eine sogenannte verdeckte Produktvorgabe liegt vor, wenn auf die konkrete Ausschreibung aufgrund der Vielzahl von Detailvorgaben nur das Produkt eines einzigen Herstellers passt oder das Produkt in dieser Art nicht am Markt existiert und nur von einem Systemintegrator, Hersteller oder Herstellerkonsortium bezogen werden kann. Es ist daher bei einer fabrikatsneutralen Ausschreibung entscheidend, dass der Wettbewerb die Ausschreibung ebenfalls bedienen kann. Andernfalls handelt es sich um eine verdeckte bzw. „produktscharfe“ Ausschreibung. Eine „produktscharfe“ Ausschreibung ist per sé nicht unzulässig, muss jedoch vom Auftragsgegenstand gerechtfertigt sein. In einem solchen Fall liegt eine ausreichende Rechtfertigung vor, wenn ausschließlich das ausgeschriebene Produkt oder Verfahren dem Bedarf des öffentlichen Auftraggebers in der

gearteten Form genügt. Die Rechtsprechung verlangt hierfür, dass die Begründung nachvollziehbar dokumentiert ist. Der Ablauf des Vergabeverfahrens wird im Vergabevermerk dokumentiert. Der öffentliche Auftraggeber muss dafür im Vergabevermerk ersichtlich niederlegen, dass das Produkt „willkürfrei“ bestimmt worden ist⁴⁶ und die Gründe für die „produktscharfe“ Ausschreibung benennen⁴⁷. Zu solchen Gründen können bspw. fehlende Kapazitäten in der Verwaltung oder Ressourcen der ausführenden Unternehmen zählen.

8.2 Vergabepaxis müsste bei der Marktdurchdringung adressiert werden

Im Gebot der Vergabe nach Fachlosen schreibt der Gesetzgeber dem öffentlichen Auftraggeber vor, seine Leistungen der Menge nach aufzuteilen (Teillose) und getrennt nach Art oder Fachgebiet (Fachlose) zu vergeben. Vergaberechtlich wird der öffentlichen Auftraggeber nicht vor unüberwindbare Hindernisse gestellt. Die Herausforderung besteht hierbei weniger im Vergaberecht, als in der üblichen Vergabepaxis. Zwar ist der öffentliche Auftraggeber gemäß § 97 Abs. 4 GWB vergaberechtlich dazu verpflichtet losweise auszuschreiben, dieser Regelung lässt sich aber bereits dadurch Rechnung tragen, dass eine Paketvergabe – also im hier konkret interessierenden Fall über Gewerkegrenzen hinweg – immer dann zulässig ist, wenn wirtschaftliche oder technische Gründe dies erfordern.

Hier ist es weniger das Vergaberecht als die Vergabepaxis, die der Etablierung von TGA-Verbundsystemen im Markt entgegenstehen könnte. Die bloße Zulässigkeit der Ausschreibung eines Produktes ist nämlich noch keine hinreichende Bedingung dafür, dass die öffentliche Hand ein solches gewerkeübergreifendes Produkt auch tatsächlich nachfragt.

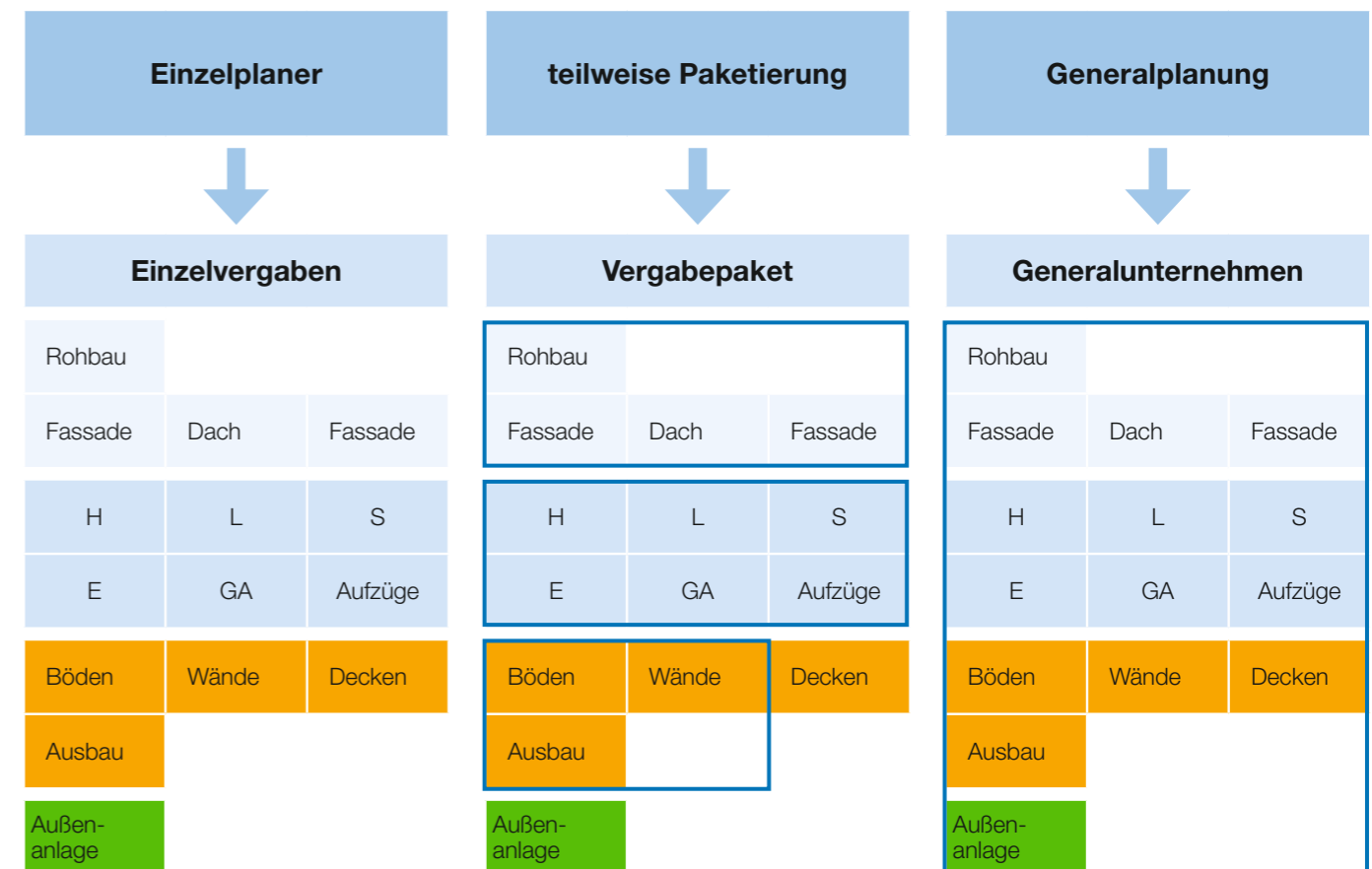


Abbildung 13: Typologie von drei komplementären Modularisierungsansätzen⁴⁸ in Anlehnung an Sommer (2016)

Die öffentliche Hand orientiert sich bei der Formulierung ihres Nachfragebedarfs beispielsweise an den Vorgaben des Standardleistungsbuchs Bau (STLB-Bau). Dort werden allerdings die Komponenten, die durch das entwickelte Produkt modularisiert werden sollen, einzeln beschrieben. In den Verwaltungsvorgaben der öffentlichen Hand finden sich also gewerkespezifisch getrennte Vorgaben, die in der Praxis zu einer Fachlosvergabe nach Gewerken führen. Es sollte also für eine weitere Verbreitung modularisierter, gewerkeübergreifender Lösungen die Vergabepaxis gezielt adressiert werden, um die bestehenden Strukturen aufzubrechen. Dies kann dadurch erreicht werden, dass sich die öffentliche Hand häufiger des Instruments der Innovationspartnerschaft bedient, um gemeinsam mit den jeweiligen Bietern an der Definition der nachgefragten Leistung zu arbeiten. Gegebenenfalls kann auch auf anderer Ebene angesetzt werden, indem Generalunternehmer-

vergaben stärker bei der öffentlichen Hand zur Anwendung kommen. Da der Generalunternehmer selbst nicht an das öffentliche Vergaberecht gebunden ist, denkt er auch nicht zwingend in den Bahnen der klassischen öffentlichen Vergabepaxis.

Der Austausch im Konsortium hat ergeben, dass dieser Ansatz vielversprechend sein kann, wenn sich der öffentliche Auftraggeber auf eine solche Vergabe als „Kumulativleistungsträger“ einlässt und Planung und Ausführung stärker miteinander verzahnt werden können (Partnering-Modelle).

⁴⁵ vgl. etwa § 7 EU Abs. 2 VOB/A oder § 31 Abs. 6 VgV

⁴⁶ OLG Düsseldorf v. 1. 8. 2012 – VII-Verg 10/12, NZBau 2012, 785, 789

⁴⁷ OLG Celle v. 31.3.2020 – 13 Verg 13/19, BeckRS 2020, 13714, Rz. 61

⁴⁸ Sommer, Projektmanagement im Hochbau.

9 Technologischer Ausblick auf modulare TGA-Verbundsysteme

Die Konstruktion eines Gewerks legt **ca. 80 % der Produktkosten** fest. Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) zielt darauf ab, den konstruktiven Entwurf von Baugruppen optimal an den Fertigungs- und Montageablauf anzupassen.

9.1 Datenbasiertes Qualitätsmanagement mit As-built BIM-Modellen

Gegenwärtig besteht ein hoher Lösungsbedarf nach Algorithmen und Werkzeugen, die einen automatisierten Abgleich zwischen in der Planung erstellten Bauwerksinformationsmodellen (As-planned) und am Baukörper aufgenommenen 3D-Punktwolken (As-built) ermöglichen. Ohne eine Anpassung der Modelle auf Abweichung des Ist-Zustandes wie bspw. Unebenheiten der Decke, können Ineffizienzen im Bauablauf entstehen, die Termin- und Kostenüberschreitung zur Folge haben. Model-fit-Algorithmen würden einen automatisierten Abgleich ermöglichen und eine belastbare Datengrundlage schaffen, wie bspw. Mindestabstände zu angrenzenden Bauteilen, Einbringungsmaße, Durchbrüche und Leitungsführungen. Traditionelle und personalintensive Praktiken, wie die Baufortschrittsverfolgung oder das Bautagebuch, basierend auf visuellen und täglichen Inspektionen, würden entfallen. Eine industrielle Vormontage und Ausführbarkeit von vorgefertigten TGA-Verbundsystemen würde begünstigt werden.

9.2 Konfiguratoren von individuellen Bauteilen und Baugruppenkataloge

Eine Grundvoraussetzung für die Modularisierung von technischen Gewerken ist die Konfigurierbarkeit der Produktarchitektur. Bei einzelnen Gewerken wie bspw. der Lüftungstechnik ist bereits eine hochvariable Fertigung mithilfe von Konfiguratoren Stand der Technik. Andere Gewerke wiederum, wie bspw. Medientrassen und Schächte werden gegenwärtig in aufwändigen Einzelprozessen geplant und gefertigt. BIM-basierte Konfiguratoren werden in Zukunft die Planung von individuellen Baugruppen durch assistierte Planungsprozesse beschleunigen. Bereits heute adressieren einzelne Softwareanbieter intelligente Workflows, die eine Luftkanal- und Strangleitungen antizipiert anbinden. Die Implementierung von weiteren Anforderungen hinsichtlich Montage- und Wartung, wie bspw. die Vorhaltung von Mindestabständen zwischen den Leitungsführungen für eine ordnungsgemäße Wartung werden die Modellqualität weiter verbessern und mittelfristig die Konfiguration von projektspezifischen Gewerken ermöglichen.

9.3 Entwurf von Komponenten und Systemen angepasst an die Vorfertigung und Montage

Die Konstruktion eines Gewerks legt ca. 80 % der Produktkosten fest.^{49, 50, 51} Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) zielt darauf ab, den konstruktiven Entwurf von Baugruppen optimal an den Fertigungs- und Montageablauf anzupassen. Die Bauindustrie hat bereits mit der Einführung von DFMA-spezifischen Gestaltungspraktiken begonnen, mit der Konsequenz, dass eine Reihe von Gewerken bereits heute außerhalb der Baustelle in einer kontrollierten Fertigungsumgebung vorgefertigt und dann vor Ort auf der Baustelle endmontiert werden. Durch die zunehmende Vorfertigung werden der Personal- und Zeitaufwand für den Bau von Gebäuden reduziert, die Baustellen sind sicherer und förderlicher, und es gibt weniger Auswirkungen auf die Umgebung.

9.4 Optimierte Datenschnittstellen zwischen Planung und Präfabrikation

Wie bereits zu Beginn erwähnt, ist der Vorfertigungsprozess in der Bauindustrie nicht tief verankert, weswegen gängige Datenschnittstellen noch nicht ausreichend in die Toolkette des Modulare Bauens integriert sind. In der Zukunft wird der modell- und datenbasierte Austausch von Informationen zwischen Planungssoftware und Vorfertigungssoftware-Systemen (CAD, MES, PPS, ERP) verlustfrei verknüpft werden und neue Möglichkeiten zur Vorfertigung für die Industrie geschaffen werden. Modellbasierte Schnittstellen werden eine bessere Kollisionserkennung, visuelle Interpretation, Analysemöglichkeiten und weitere technische Verbesserungen ermöglichen.

9.5 Entwicklung von Rapid-on-site Delivery Services und Baustellenlieferung ins Gebäude

Auf der Baustelle geht oft kostbare Zeit durch die Materialbeschaffung und auch die Lagerhaltung und Logistik vor Ort verloren. Die Übertragung von Lieferdienstleistungen mit sehr kurzen Lieferzeiträumen auf die Bauindustrie, wird zu einer Optimierung des Bauablaufs durch verringerte Wartezeiten führen. Montagegerechte Paketierung und Palettierung, Vorkonfektionierung, Vorkommissionierung und Transport direkt an den Montageplatz werden zu Kosten- und Zeitersparnissen auf der Baustelle führen. Rapid-on-site Delivery Services werden zu Reduktion von Lagerhaltungskosten, Kapitalbindung und Unterbrechungen des Bauablaufs führen. Diese müssen jedoch auch kompatibel in die Bauablaufplanung und Baustellenlogistik eingebunden werden.



Abbildung 14: Vorgefertigte Rohrelemente

⁴⁹ Keung, "Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for High-rise and High-density Cities".

⁵⁰ Staub-French et al., "Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction".

⁵¹ Lu et al., "Design for manufacture and assembly (DfMA) in construction: the old and the new".

10 Bibliography

Albus, Jutta, Klaus Dömer, and Hans Drexler. "Vergleichende Untersuchungen Vorgefertigter Konstruktionssysteme: Studie Im Auftrag Der IBA Thüringen." 2016.

Amanda Eager, Kate Elsam, Rishabh Gupta, and Mattias Velinder. "Modular Design Playbook: Guidelines for Assessing the Benefits and Risks of Modular Design."

Analyse & Konzepte. "Marktstudie 2017: Serielles Bauen." Beratungsgesellschaft für Wohnen, Immobilien, Stadtentwicklung mbH, 2017.

Azman, M.N.A., M.S.S. Ahamad, and W.M.A. Wan Hussin. "Comparative Study on Prefabrication Construction Process." *International Surveying Research Journal (ISrJ)*, no. 2 (2012): 45–58.

Barg, Sebastian. "Kontextbezogene Auslegung Von Produktbaukästen." Dissertation, RWTH Aachen, 2017.

Bonvoisin, Jérémy, Friedrich Halstenberg, Tom Buchert, and Rainer Stark. "A Systematic Literature Review on Modular Product Design." *Journal of Engineering Design* 27, no. 7 (2016): 488–514. doi:10.1080/09544828.2016.1166482.

Borosnyai, Anna. "Vorfertigung in 2D Und 3D: Entwicklungen Im Massivholzbau." 2018.

Building and Construction Authority. "Design for Manufacturing and Assembly (DFMA): Prefabricated Mechanical, Electrical and Plumbing (MEP) Systems." 2018.

Dip. -Ing. Andreas Hartmann, Philipp Galandi. "Die Aussagekraft Des Vorfertigungsgrads: Analyse Der Ermittlungsmethoden Am Beispiel Der Modulbauweise." In *Bauwirtschaft: Markt | Management | Recht*. Vol. 2. Edited by Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Sundermeier, Technische Universität Berlin, 53–64. Werner Baurecht, 2020.

Elisabeth Krone, Dr. Henrik Scheller, Deutsches Institut für Urbanistik. "KfW-Kommunalpanel 2018." Accessed May 10, 2020.

Girmscheid, Gerhard. *Industrielles Bauen: 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften*. 1. Auflage., 2007.

Grundke, Manfred, and Horst Wildemann. *Modularisierung im Hausbau: Studie*. 2. Auflage, revidierte Ausgabe. München: TCW, 2017.

Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb. "Kostengünstiger Wohnungsbau: Identifikation Bestehender Hemmnisse Für Den Einsatz Von Raummodulen Im Wohnungsbau." Accessed April 28, 2021.

Lechner, Markus, and Stefan Winter. *Bauen Mit WEITBLICK: Systembaukasten Für Den Industrialisierten Sozialen Wohnungsbau.*, 2018. Accessed January 26, 2021.

Liang, Wen-Yau, and Chun-Che Huang. "The Agent-Based Collaboration Information System of Product Development." *INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION MANAGEMENT* 22, no. 3 (2002): 211. doi:10.1016/S0268-4012(02)00006-3.

Mao, Chao, Fangyun Xie, Lei Hou, Peng Wu, Jun Wang, and Xiangyu Wang. "Cost Analysis for Sustainable Off-Site Construction Based on a Multiple-Case Study in China." *Habitat International* 57 (2016): 215–22. doi:10.1016/j.habitatint.2016.08.002.

Mohamad, Ahlam. "Managing the Potential of Modularization and Standardization of MEP Systems in Buildings - Guidelines for Improvement Based on Lean Principles." 2019.

Neitzel, Michael, Daniel Dangel, Wiebke Gottschalk, Heike Schröder, InWIS Forschung & Beratung GmbH, Norbert Raschper, and Brigitte Wiblishauser. "Bericht Der Baukostensenkungskommission: Im Rahmen Des Bündnisses Für Bezahlbares Wohnen Und Bauen." Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 2015.

Nigel Fraser, Gay Lawrence Race, Richard Kelly, Anna Winstanley, and Paul Hancock. *An Offsite Guide for the Building and Engineering Services Sector.*, 2015. Accessed June 14, 2021.

Peltokorpi, Antti, Hylton Olivieri, Arioaldo Denis Granja, and Olli Seppänen. "Categorizing Modularization Strategies to Achieve Various Objectives of Building Investments." *Construction Management and Economics* 36, no. 1 (2018): 32–48. doi:10.1080/01446193.2017.1353119.

Ryan E. Smith. "Off-Site and Modular Construction Explained | WBDG - Whole Building Design Guide." Updated April 27, 2021. Accessed April 27, 2021. <https://www.wbdg.org/resources/site-and-modular-construction-explained>.

Schwerdtner, Patrick, Frank Kumlehn, and Julian Schütte. *Kostengünstiger Wohnungsbau: Identifikation Bestehender Hemmnisse Für Den Einsatz Von Raummodulen Im Wohnungsbau*. Forschungsinitiative Zukunft Bau., 2018.

Sommer, Hans. *Projektmanagement Im Hochbau*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. doi:10.1007/978-3-662-48924-6.

Streit, Matthias. "Immobilien: Die Krux Vom Modularen Bauen Gegen Die Wohnungsnot." *Handelsblatt*, September 12, 2019. Accessed June 14, 2021. <https://www.handelsblatt.com/finanzen/immobilien/neubauten-die-krux-vom-modularen-bauen-gegen-die-wohnungsnot/25008460.html?ticket=ST-14151900-eoDWIB-QCjGGqb4U4BqjX-ap1>.

Thanoon, W., Lee Peng, Mohd Kadir, Mohd Jaafar, and Mohd Salit. "THE ESSENTIAL CHARACTERISTICS OF INDUSTRIALISED BUILDING SYSTEM." 2003.

Viana, Daniela, Iris Tommelein, and Carlos Formoso. "Using Modularity to Reduce Complexity of Industrialized Building Systems for Mass Customization." *Energies* 10, no. 10 (2017). doi:10.3390/en10101622.

Winter, Stefan, Markus Lechner, and Claudia Köhler. "Bauen Mit WEITBLICK: Systembaukasten Für Den Industrialisierten Sozialen Wohnungsbau." Technische Universität München, 2018.

Wortmann, J. C. "A Classification Scheme for Master Production Scheduling." In *Efficiency of Manufacturing Systems*. Edited by Wilson, B. and Berg, C. C. and French, D., 101–9. Boston, MA: Springer US, 1983.

Quellenangaben

Titel: Christoph Bauer, **S. 8:** BIM Center Aachen, **S. 10:** BIM Center Aachen, **S. 14:** BIM Center Aachen, **S. 16:** BIM Center Aachen, Construction Authority, "Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)", **S. 18:** ROM-Technik, **S. 19:** BIM Center Aachen, Construction Authority, "Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)", **S. 26:** Hilti, **S. 27:** Hilti, **S. 28:** ROM-Technik, **S. 29:** ROM-Technik, **S. 31:** BIM Center Aachen, **S. 33:** ROM-Technik

BIM Center Aachen GmbH

Noppiusstraße 12

52062 Aachen

Telefon +49 241 91-9990-64

E-Mail info@bim.rwth-campus.com

www.bim.rwth-campus.com