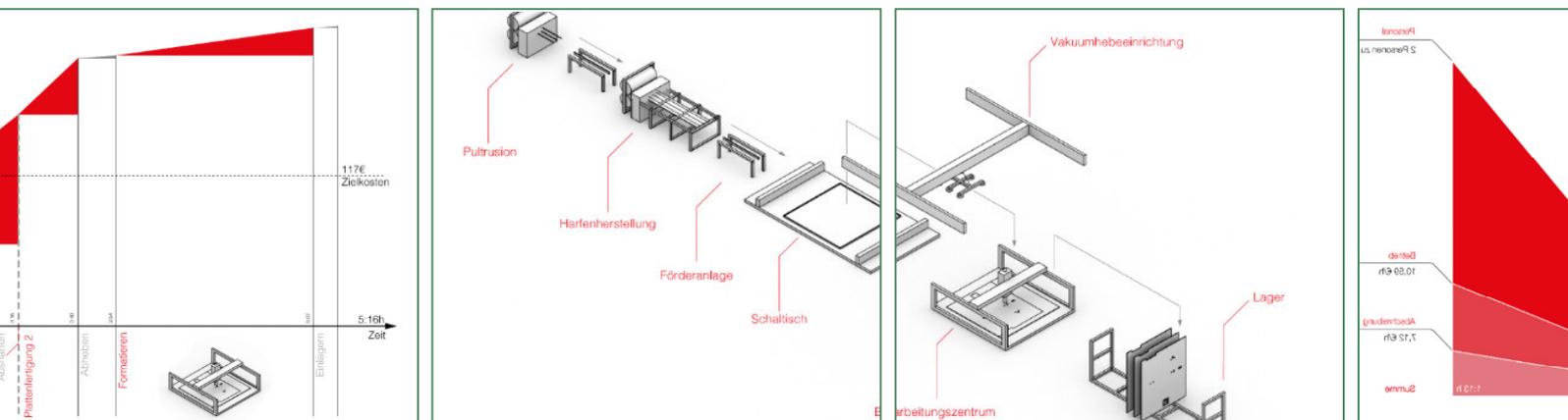


# MASTERARBEIT



## BAUWIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE INDUSTRIELLER FERTIGUNGSLINIEN IM BETONBAU

Rockenbauer-Kocher Markus

Vorgelegt am  
 Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft

Betreuer  
 Univ.-Prof. Mag.rer.soc.oec. DDipl.-Ing. Dr.techn. Gottfried Mauerhofer

Mitbetreuender Assistent  
 M.Sc. (TUM) Bakk.rer.nat. B.Sc. Bernhard Ortbauer

Graz am 12. März 2020



## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....  
.....  
(Unterschrift)

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, .....  
date .....  
(signature)

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Vorname Nachname, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Vorname Nachname und Herrn Univ.-Doz. Dr.techn. Dipl.-Ing. Vorname Nachname.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützte.

(Ort), am (Datum)

\_\_\_\_\_  
(Unterschrift des Studierenden)

## Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Anwendung industrieller Prinzipien auf eine Fertigungsproduktion in der Erzeugung von Betonbauteilen und deren Herstellkostenberechnung. Im Speziellen wird auf die Kalkulation einer Fertigungslinie zur Erzeugung und Verarbeitung von Elementen aus dem Verbundwerkstoff Carbonbeton, einer Kombination aus Beton und Kohlefasern als Bewehrung, eingegangen.

Um diese Fertigungslinie in den Kontext des industriellen Bauens zu bringen, wird als Ausgangspunkt der industrielle Bauprozess in seinen Grundzügen beschrieben. Dazu werden zuerst Prinzipien, denen der Ansatz folgt, näher erläutert. Die sich daraus, sowie aus den Merkmalen der industriellen Produktion ergebenden Anforderungen an das industrielle Bauen werden formuliert und gängige Produktionssysteme und -verfahren genannt. Anschließend werden mit diesen Systemen und Verfahren herstellbare Bauelemente beschrieben und es wird auf ausgewählte wirtschaftlich relevante Aspekte der Montage dieser Erzeugnisse eingegangen.

In weiterer Folge wird das industrielle Bauen in den Kontext des Bauablaufes gebracht. Dazu wird der durch vorgefertigte Elemente und Module geprägte Bauprozess mit dem klassischen verglichen und wesentliche Unterschiede verdeutlicht. Zusätzlich werden sich ergebende Chancen aus dem klassischen Bauprozess und Vorteile des industriellen Bauens beschrieben.

Um ein Konzept einer Fertigungslinie für Betonfertigteile darstellen zu können, wird auf Merkmale, Produktionsverfahren und herstellbaren Erzeugnisse speziell im Betonbau eingegangen. Da durch die Verarbeitung von Carbonbeton weitere Vorteile in der Betonverarbeitung im Werk nutzbar gemacht werden können, wird auf einige wirtschaftlich relevante Charakteristika des Werkstoffes eingegangen.

Abschließend wird eine Fertigungslinie zur industriellen Produktion vorgestellt, deren Prozesse die Erzeugung und Verarbeitung von kohlefaserverstärkten Betonfertigteilen vorsehen. Im Zuge dieser Fertigungslinie kann eine Trennung der Produktion in einen kundenunabhängigen und einen kundenabhängigen Teil vorgenommen werden, um die Verarbeitungsprozesse zwischen Beauftragung des Kunden und Auslieferung des Produktes weiter zu forcieren. Die durchgeführte Kalkulation eines beispielhaften Produktes, das die wichtigsten Prozesse der Fertigungslinie durchläuft, gibt Aufschluss über die Entwicklung der Herstellkosten beim Durchlauf der Fertigung. Weiters wird darauf eingegangen, durch welche Maßnahmen auf die Herstellkosten Einfluss genommen werden kann. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick zum Thema gegeben.

## Abstract

This master's thesis focuses on the application of industrial principles to a manufacturing process in the production of concrete based moduled parts and their calculations. In particular, the calculation of a production line of elements made of the composite material carbon-concrete, a combination of concrete and carbon fibres as reinforcements, is discussed.

To put this production line in the context of industrial construction, the industrial building process will be described in its basic features as a starting point. To this end, the principles, objectives and construction methods that the approach follows are first explained in more detail. The requirements for industrial construction resulting from this and from the characteristics of industrial production are formulated, and common production systems and processes are named. Subsequently, construction elements that can be produced from these systems and processes are described and some of the building industry's relevant aspects of the assembly of these products are discussed.

Afterwards, industrial construction is put into the context of the construction process. For this purpose, the industrial building process is compared with the classical one and essential differences are clarified. In addition, opportunities arising from the classical construction process and advantages of industrial construction are described.

In order to present a concept of a production line for precast concrete elements, it is necessary to cover characteristics, prefabrication methods and producible products especially in concrete construction. Since the processing of carbon concrete can provide further advantages in concrete processing in the factory, important construction-related characteristics are also discussed.

Subsequently, derived from these chapters, a production line is presented which shows significant advantages in the production and processing of carbon fibre reinforced concrete elements. It is shown, that this production line can offer a significant acceleration to the processing procedure between the customer's order and the delivery of the product. The calculation of the costs and the lead time of an exemplary product, which passes through the most important processes of the production line, provides information about the development of the manufacturing costs during the production run. The measures that can be taken to influence the manufacturing costs will also be described. Finally, the results are summarized and an outlook on the topic is given.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Aspekte des industriellen Bauens</b>	<b>5</b>
2.1	Prinzipien des industriellen Bauens.....	6
2.1.1	Dienstleistungen, Sachleistungen und Produkte .....	7
2.1.2	Vorfertigung.....	8
2.1.3	Halbzeugverarbeitung.....	9
2.1.4	Standardisierung .....	10
2.1.5	Bauweisen.....	13
2.1.6	Mass Customization .....	15
2.1.7	Rationalisierung.....	17
2.2	Charakteristika des industriellen Bauens.....	18
2.2.1	Anforderungen an das industrielle Bauen .....	19
2.2.2	Produktionssysteme und -typen des industriellen Bauens.....	25
2.2.3	Elemente und Module des industriellen Bauens.....	27
2.2.4	Ausgewählte Aspekte der Montage des industriellen Bauens .....	32
2.3	Auswirkungen des industriellen Bauens auf den Planungs- und Ausführungsablauf... 35	
2.4	Vor- und Nachteile des industriellen Bauprozesses.....	41
<b>3</b>	<b>Aspekte des industriellen Bauens im Beton-Fertigteilbau</b>	<b>48</b>
3.1	Produktionsverfahren.....	51
3.2	Arten von Betonfertigteilen.....	57
3.3	Einsatz von Informationstechnologien.....	62
3.4	Carbonbeton .....	64
<b>4</b>	<b>Konzept einer Fertigungslinie in der Betonfertigteilerzeugung</b>	<b>69</b>
4.1	Fertigungslinie.....	71
4.2	Prozesse der einzelnen Anlagen.....	74
4.3	Kalkulation der industriellen Fertigungslinie.....	81
4.4	Kostenentwicklung und Wertschöpfung.....	88
4.5	Einflussnahme auf die Kostenentwicklung aus der Kalkulation.....	95
<b>5</b>	<b>Conclusio</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>102</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>111</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zielgrößen und Zielkonflikte im Prozessmanagement.....	20
Abbildung 2: Differenzierung der Elemente anhand ihrer inhaltlichen Integration und dem räumlichen Verknüpfungsgrad .....	29
Abbildung 3: Systemdarstellung Achsraster.....	31
Abbildung 4: Einbau einer Fertigteilstütze mittels Justierdorn und Stützfußplatte.....	34
Abbildung 5: Planung und Fertigung von industriell produzierten Holzhäusern .....	37
Abbildung 6: Bauphasen eines konventionellen Holzbauprojektes .....	39
Abbildung 7: Bauphasen eines industriellen Holzbauprojektes .....	40
Abbildung 8: Kostentrichter .....	43
Abbildung 9: Schematischer Balkenplan der Produktion, Fertigung und Montage eines Skelettbaus aus Stahlbetonfertigteilen .....	50
Abbildung 10: Unterstützungsprozesse der Fertigung .....	52
Abbildung 11: Systematische Darstellung der Fertigung auf kurzen Bahnen.....	53
Abbildung 12: Systematische Darstellung der Fertigung auf langen Bahnen.....	55
Abbildung 13: Systematische Darstellung der Umlauffertigung.....	56
Abbildung 14: Holz-Beton-Verbunddecke .....	59
Abbildung 15: Spannbeton-Hohldecke.....	60
Abbildung 16: Fertigungsraumzelle.....	61
Abbildung 17: CFK Lamellen, CFK Matten, CFK Stäbe .....	65
Abbildung 18: Arbeitslinie von Carbonfasern des Herstellers S&P .....	66
Abbildung 19: Prozessübersicht.....	72
Abbildung 20: Fertigungslinie .....	74
Abbildung 21: Prozesse der Harfenherstellung und des Schaltisches .....	76
Abbildung 22: Pultrussionsverfahren.....	77
Abbildung 23: Herstellkostenentwicklung des Prozesses Formatierung .....	90
Abbildung 24: Herstellkostenentwicklung des Prozesses Schaltisch .....	92
Abbildung 25: Kostenentwicklung der Fertigungslinie .....	94
Abbildung 26: Auswirkung von Reduktionen der Sekundärtätigkeiten .....	96
Abbildung 27: Auswirkung von Verkürzungen der Verarbeitungszeiten .....	97
Abbildung 28: Auswirkung von verringerten Prozesskosten .....	98
Abbildung 29: Herstell- und Durchlaufzeitberechnung der Fertigungslinie.....	101

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Merkmale industrieller Produktion und Anforderungen an die Bauproduktion .....	21
Tabelle 2: Industrialisierungsparadigmen in der Bauproduktion.....	23
Tabelle 3: Vor- und Nachteile des industriellen Bauens. ....	46
Tabelle 4: Tätigkeiten, Beziehungen und Dauern des Prozesses Schaltisch .....	79
Tabelle 5: Berechnung der Dauern des Formatierungsprozesses .....	80
Tabelle 6: Dauern und Kosten der Tätigkeiten der Formatierung .....	85
Tabelle 7: Zuordnung der Personalzeiten zu den Maschinen .....	86
Tabelle 8: Materialberechnung der Pultrusion .....	87
Tabelle 9: Überblick der Kostenentwicklung auf Prozessebene .....	93



## Abkürzungsverzeichnis

<b>CIM</b>	Computer-Integrated Manufacturing
<b>NC</b>	Numerical Control: Numerische Codes zur direkten Steuerung von Maschinen
<b>s</b>	Schnittlänge in mm
<b>F</b>	Format eines zu erstellenden Bauteils in mm
<b>t</b>	Zeit in Minuten
<b>v</b>	Bewegungsgeschwindigkeit in mm/min
<b>Wzw</b>	Werkzeugwechselprozess einer vollautomatisierten Zerspanungsmaschine in min
<b>S&amp;S</b>	Schleifen und Schneiden als Teilprozess einer CAM gesteuerten Formatierungsmaschine
<b>CFK</b>	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
<b>CAM</b>	Computer-Aided Manufacturing
<b>CAD</b>	Computer-Aided Design
<b>CIM</b>	Computer-Integrated Manufacturing
<b>NC</b>	Numerical Control: Numerische Codes zur direkten Steuerung von Maschinen
<b>Masch</b>	Maschinenkosten
<b>Mat</b>	Materialkosten
<b>Mit</b>	Mitarbeiterkosten

## 1 Einleitung

Der Baubranche als Säule der heimischen Wirtschaft kommt große Bedeutung zu und dennoch sind, zumindest im Vergleich zu anderen Sparten, große Teile des Herstellungsprozesses auf der Baustelle durch arbeitsame und manuelle Tätigkeiten geprägt. Die steigenden Anforderungen des Marktes, beispielsweise nach günstigem, individuellem Bauen und das Aufkommen neuer und leicht zugänglicher Technologien, sind Auslöser für Forschungs- und Rüstinvestitionen in Richtung industrialisierter Bauprozesse. Diese Entwicklung soll einerseits bestehende Lücken zu Produktivitätskennzahlen anderer Branchen schließen, andererseits neue Meilensteine in den Bereichen Kosten, Kalkulationssicherheit, Bauzeit, Termintreue und Qualität sicherstellen. Gerade die Baubranche steht bei der Industrialisierung vor besonderen Herausforderungen, die andere Branchen bereits bewältigt haben.

Die durch Ford<sup>1</sup> und Taylor<sup>2</sup> entwickelten Ansätze in den Bereichen Management und Ressourcenplanung, die unter anderem in der systematischen Fließfertigung mit monofunktionalen Maschinen resultierten, sind Basis des Grundgedankens gegenwärtiger Produktionen für leistbare Produkte. Der Einfluss dieser Ansätze zeichnet sich in vielen Entwicklungen der Folgejahre und -jahrzehnte ab, wie das von Ōno<sup>3</sup> und seinem Team erarbeitete Produktionsmodell von Toyota verdeutlicht<sup>4</sup>. Dieses Produktionsmodell aus der Automobilindustrie ist Basis für eine gegenwärtig weit verbreitete Philosophie, dem Lean Management, das mittlerweile auch die Baubranche erreicht hat. Erste Versuche des Bauwesens, mit aufkommenden Mechanisierungs-, Standardisierungs- und Automatisierungswellen anderer Branchen Mitte des letzten Jahrhunderts mitzuhalten, verhalfen einzelnen Unternehmen höchstens zu Teilerfolgen, da die landesweite Bauwerksproduktion auf weitestgehend industriell strukturierter Basis vorerst ausblieb. Gründe dafür findet man im Bauwesen beispielsweise in der hohen Differenzierung der Nachfrage bei bedingt geeigneten Arbeits- und Fertigungsumgebungen.

Schon in der Vergangenheit konnten auf Bauteil- beziehungsweise Elementebene, beispielsweise im Holz- und Betonbau, große wirtschaftliche und bauzeitverkürzende Fortschritte durch die Fertigteilproduktion im

---

<sup>1</sup> Henry Ford (1863-1947, USA) war Gründer des Automobilherstellers Ford Motor Company. Seine Ansätze und Konzepte in den Bereichen Fahrzeug- und Fließbandfertigung haben nicht nur weitreichende Auswirkungen auf die gesamte industrielle Produktion, sie haben auch auf die weitere Entwicklung der Gesellschaft erheblichen Einfluss.

<sup>2</sup> Frederick Winslow Taylor (1856-1915, USA) ist neben seiner Entwicklung des Taylorismus auch als einer der Begründer der Arbeitswissenschaft bekannt. Aufsehen von Befürwortern und Kritikern seiner Arbeit erreichte er unter anderem durch seine Grundsätze in verschiedenen Managementbereichen wie der Ablaufplanung und -steuerung von Arbeiten.

<sup>3</sup> Taiichi Ōno (1912-1990, Japan) gilt als Erfinder des Toyota-Produktionsprinzips, dessen Ansätze, Methoden und Techniken bis heute als wegweisend gelten. Beispiele sind die Just-in-time Produktion, die Kanban Methode der Projektsteuerung und das Managementkonzept Kaizen (vereinfacht: dem Streben nach kontinuierlicher Verbesserung).

<sup>4</sup> Vgl. [HRSG.], BRAND U., R'AZA W.: Fit für den Postfordismus? – Theoretisch-politische Perspektiven des Regulationsansatzes. Münster. Westfälisches Dampfboot, 2003.

Werk erzielt werden. Mitunter deshalb verweisen Experten weiterhin auf den Trend zu Bauweisen aus vollautomatisch, vorgefertigten Bauelementen und Modellen in Fertigteilproduktionen abseits der Baustelle.<sup>5</sup> Der Schritt zum ganzheitlich industriell gestalteten Bauprozess scheint die breite Masse an Erzeugern, Dienstleistern und Bauherren allerdings noch nicht erreicht zu haben, denn Unternehmen stehen vor vielen technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Die Lösungen dieser, können mit der Entwicklung neuer Bauprodukte und -materialien, sowie durch den Einsatz angepasster Fertigungsverfahren und -anlagen gefunden werden.

Das Unternehmen +Ultra<sup>6</sup> entwickelt dazu einen Lösungsvorschlag für eine ganzheitlich industrielle Organisation, deren Kernstück eine Fertigungsproduktion zur Erzeugung und Verarbeitung von Betonbauteilen darstellt. Dabei liegt der Fokus auf Fertigteilen aus dem Verbundwerkstoff Carbonbeton, dessen großer Vorteil, neben der hohen Wirtschaftlichkeit, die Bearbeitbarkeit mittels CNC-Maschinen ist. Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich in diesen Entwicklungsprozess ein und verfolgt im Wesentlichen vier, in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen +Ultra definierte Ziele:

1. Die Veranschaulichung, wie sich die industrielle Fertigteilerzeugung und -verarbeitung in den industriellen Bauprozess eingliedert.
2. Die Beschreibung und Konkretisierung der Fertigungsprozesse in der vom Unternehmen entwickelten Fertigungslinie der Betonfertigteilerzeugung und -verarbeitung. Diese sollen sich an den Prinzipien und Charakteristika des industriellen Bauens orientieren.
3. Die Darstellung der Kostenentwicklung von Carbonbeton-Fertigteilen im Herstellungsverfahren der Umlaufproduktion. Dazu soll ein einheitliches Schema zur Berechnung der Herstellkosten und Durchlaufzeiten des Verbundwerkstoffes erarbeitet werden, das ermöglichen soll, die Kosten verschiedener Materialien, unterschiedlicher Prozesse und wechselnden Anlagen zu berechnen.
4. Die Ableitung und Beschreibung von Einflussmöglichkeiten auf die Herstellkostenentwicklung, die sich aus der Kalkulation der Fertigungslinie ergeben.

Abgeleitet von diesen Zielen, formuliert sich die Forschungsfrage wie folgt: Welche Auswirkungen haben die Prozesse einer Fertigungslinie zur Erzeugung und Verarbeitung eines kohlefaserbewehrten Betonbauteils auf die Herstellkosten und Durchlaufzeiten und welche Einflussmöglichkeiten auf diese ergeben sich aus der Kalkulation?

<sup>5</sup> SIHN-WEBER, A.; FISCHLER, F.: CSR und Klimawandel – Unternehmenspotenziale und Chancen einer nachhaltigen und klimaschonenden Wirtschaftstransformation, Management-Reihe Corporate Social Responsibility. Berlin. Springer Verlag GmbH, 2020, S. 445ff.

<sup>6</sup> DI Parmann, der das Unternehmen +Ultra leitet, bietet beratende Tätigkeiten im Bereich der Automatisierung von Organisationen und Produktionsprozessen im Bauwesens an.

Dazu gliedert sich diese Arbeit unter Verwendung nachstehender Forschungsmethoden wie folgt.

Die anfänglichen Kapitel, die sich mit den Grundlagen, Kennzeichen und Potentialen der industriellen Fertigung im Bauwesen, sowie der Beschreibung des industriellen Bauprozess beschäftigen, basieren auf sorgfältigem Studium relevanter Literatur. Weiters wurden aus der Literatur Differenzen zum klassischen Bauprozess und Vorteile des industriellen Bauprozesses erhoben.

Im zweiten Kapitel wird neben den grundlegenden Spezifika und Charakteristika auch auf Produktionsverfahren im industriellen Betonbau eingegangen, die für die Fertigungsproduktion von Carbonbeton-Fertigteilen besondere Wichtigkeit aufweisen. Auch dieses Kapitel bedient sich gezielter Literaturrecherchen.

Anschließend wird ein von +Ultra entworfenes Konzept einer industriellen Fertigungslinie für Betonfertigteile dargestellt, das in qualitativen und explorativen Interviews mit DI Parmann<sup>7</sup> und DI Schraml<sup>8</sup> beschrieben wurde. Diese unstrukturierten Interviews fanden im Zeitraum von August bis Dezember 2019 in Form von Besprechungen statt. Aufbauend auf die Vorarbeit von +Ultra, den Grundlagen des industriellen Bauens und den Aspekten der industriellen Betonfertigteilerzeugung, behandelt dieses Kapitel die Konkretisierung der Prozessschritte der beschriebenen Fertigungslinie und liefert ein einheitliches Schema zur Kalkulation der Herstellkosten von Elementen und Bauteilen aus Carbonbeton. Dazu wird auf die Entwicklung der Kosten und der Durchlaufzeiten eingegangen und die Notwendigkeit berücksichtigt, dass verschiedene Transportsysteme und Anlagentypen mit wechselnden Ressourcen differenzierte Prozesse abbilden können.

In weiterer Folge wird das Kalkulationsschema mit Werten befüllt, die einerseits über Hersteller recherchiert und andererseits von Experten abgeschätzt wurden. Die durchgeführte Kalkulation geschieht anhand eines Beispielproduktes, das eine Wand eines Fertigungsmoduls darstellt. Anhand der Kalkulation, der resultierenden Ergebnisse der Herstellkostenentwicklung und der Durchlaufzeitberechnung, werden Maßnahmen und Einflussmöglichkeiten auf die Entwicklung der Kosten und Zeiten abgeleitet.

Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und auf gewonnene Erkenntnisse eingegangen.

---

<sup>7</sup> DI Gernot Parmann ist heimischer Produktentwickler und Unternehmer, der sich durch seine Forschungsarbeit in der Privatwirtschaft und an der Technischen Universität Graz mit Rationalisierungsmaßnahmen in der Herstellung komplexer Beton- und Sichtbetonbauteile auseinandersetzt.

<sup>8</sup> DI Dominik Schraml ist Forschungsmitarbeiter des von DI Gernot Parmann geführten Unternehmens +Ultra.

## 2 Aspekte des industriellen Bauens

Den zentralen Aspekt des Geschäftsprozesses stellt der Kernprozess, also die Umsetzung der Kompetenz der Organisation dar. An diesem orientieren sich nicht nur Unterstützungs-, sondern auch Managementprozesse. Die Entscheidung den Kernprozess industriell zu gestalten hat also Auswirkungen auf nahezu alle Bereiche eines Unternehmens. Die nachstehenden Kapitel erläutern neben Merkmalen und Anforderungen auch Gründe und Potentiale industrieller Bauweisen. Zum einheitlichen Verständnis werden dazu industrielle Prinzipien genannt und wichtige Begrifflichkeiten definiert, wobei vorweg geklärt wird, worum es sich beim industriellen Bauen grundlegend handelt.

Das industrielle Bauen an sich beruht auf der Kombination technisch, wirtschaftlich und sozial rationalisierter Produktionsprozesse. Dabei werden Einsatzfaktoren, wie beispielsweise Betriebsmittel, Rohstoffe oder auch menschliche Arbeit, durch Faktorkombination in Sachgüter gewandelt. Sowohl maschinell geprägte Arbeitsabläufe als auch Ressourceneinsätze und zeitliche Ausmaße sind dabei sehr genau definiert und finden in örtlicher Nähe zueinander, häufig in Fabriken oder Werken, statt. Hinsichtlich der Erzeugung und Bearbeitung der Produkte fokussiert man automatisierte Prozesse, die einerseits reproduzierbare Ergebnisse und andererseits genaue Auskünfte, beziehungsweise Kennzahlen zu den hergestellten Erzeugnissen liefern können sollen.<sup>9</sup> Innerhalb der Industriebetriebslehre bildet die Einsatzfaktorkombination zur Gestaltung einer produktiven, effizienten und effektiven Produktionsplanung, unter Zuhilfenahme automatisierter Prozesse, sicherlich eine Schlüsselkomponente. Branchenabhängige Rahmenbedingungen können dabei komplexe Anforderungen, wie beispielsweise massenindividuelle Endprodukte<sup>10</sup>, an das Produktionssystem stellen. Um vom Prinzip des industriellen Bauens zur tatsächlichen Ausführung eines industriellen Bauprozesses zu gelangen, sind fachgebietsübergreifende Überlegungen notwendig. Über die Definition global formulierter Wertströme hinaus ist es nötig, genaue Detaillierungen aller Makro- und Mikro-Ablaufschritte<sup>11</sup> festzulegen, um den in diesem Kapitel beschriebenen Prinzipien der Methode gerecht zu werden. Dazu betonen Experten, einen Perspektivenwechsel vorzunehmen, der es vorsieht, Bauleistungen nunmehr nicht nur als Zusammenspiel von Dienstleistungen und (Roh-)Stoffen oder Materialien, sondern als Produkte zu sehen. „Wenn man diese Sichtweise konsequent fortführt, lässt sich ein Gebäude auf einer Plattform aus einem Grundentwurf und durch

<sup>9</sup> Vgl. KOTULLA, B.; URLAU\_CLEVER, B.-P.; KOTULLA, P.: Industrielles Bauen. Düsseldorf. Werner, 1992, S. 2.

<sup>10</sup> Siehe dazu Kapitel 2.1.6

<sup>11</sup> Makro- und Mikroablaufschritte sind bauwirtschaftliche Begriffe die einen Prozess in kleinere Einheiten unterteilen. Makro umfasst dabei den Gesamtablauf, Teilablauf, Ablaufstufen und Vorgänge. Mikro zerlegt den Vorgang weiter in Teilvorgänge Vorgangsstufen und Vorgangselemente.

Auswahl der verschiedensten Bauteile und Ausstattungselemente zusammenstellen. Analog der Automobilindustrie können verschiedene Typen oder Baureihen auf einer Plattform zusammengestellt und durch die Variation von Parametern individualisiert werden.<sup>12</sup> Im Zentrum der Entwicklung soll auf Basis dieser Überlegung nicht immer wieder die Erfindung eines neuen Bauwerks sondern die Entwicklung industriell geprägter Produkte stehen, die auf systematisierten und kombinierbaren Bauteilen basieren.

Der Montagebau als Bindeglied der Fertigung und fertigen Bauwerken, verarbeitet zu montierende Bauelemente in geeigneter und kraftschlüssiger Weise. Randbedingungen der Formgebung, der Bauphysik, der Konstruktion und Ausführungs- beziehungsweise Baustellenspezifika vereinen sich und erzeugen das fertige Bauwerk.

Dieses Umdenken kann der Baubranche viele, teilweise neue, Handlungsfelder ermöglichen, die sich zu positiven Veränderungen über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes erstrecken können. Beispiele dafür sind die klare Trennung von Planung und Ausführung, die Produktivitätssteigerung über den gesamten Herstellungsprozess und die Forcierung der häufig vernachlässigten Bereiche des Marketings und Vertriebs.

Um industrielle Methoden der Fertigung klar von anderen abgrenzen zu können und um Prinzipien, sowie Anforderungen an die industrielle Bauweise aus der Literatur ableiten zu können, werden in den folgenden Kapiteln einige, zum allgemeinen Verständnis essenzielle, Begriffe näher erläutert. Diese Begriffsdefinitionen und Prinzipien sollen letztlich dazu dienen, die in Kapitel 4 näher beschriebene Fertigungslinie an industrielle Randbedingungen anzupassen und in den Kontext des industriellen Bauens zu stellen.

## 2.1 Prinzipien des industriellen Bauens

Die Definitionen der folgenden Begriffe und Prinzipien beziehen sich auf Unternehmen im Sinne wirtschaftlich selbständiger Einheiten, die auf den Zweck der Produkt- und Dienstleistungserstellung im industriellen Sinn gerichtet sind und als gewinnorientierte Organisationseinheit agieren.<sup>13</sup> Die Grundlage der industriellen Wertschöpfung bildet dabei die Produktion als „effizientes Zusammenwirken von Gütern und Dienstleistungen in einem Prozess zur Erstellung einer bestimmten Menge an Gütern.“<sup>14</sup> Sie umfasst im weitesten Sinne die gesamte betriebliche Leistungserstellung

<sup>12</sup> GIRMSCHIED, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 20.

<sup>13</sup> Vgl. KUMMER, S.; GRÜN, O.; JAMMERNEGG, W.: Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. Hallbergmoos. Pearson, 2019, S. 28.

<sup>14</sup> Vgl. PILLER, F.T.: Mass Customization, Markt- und Unternehmensentwicklung Markets and Organisations. Wiesbaden. Springer Fachmedien, 2007, S. 8.

und somit alle Aspekte des Transformationsprozesses eines Produktes. Betrachtet man die Produktion im engeren Kontext der Leistungserstellung spricht man häufig nur mehr von der Herstellung und Verarbeitung von Gütern, der Gewinnung von Rohstoffen oder der Ausführung von Dienstleistungen.<sup>15</sup> Im engsten Sinn versteht man darunter die Fertigung von Wirtschaftsgütern, also all jene Herstellungsprozesse die materielle Veränderungen an eingesetzten Gütern bewirken und nicht in die Kategorie der Dienstleistung fallen.

Eine strikte Trennung zwischen Produkt und Leistung ist im jüngeren Sprachgebrauch und in der jüngeren Literatur immer seltener zu finden. Man bedient sich zunehmend der Idee den Produktionsbegriff zu erweitern, sodass weitestgehend sämtliche Produkte zur Erfüllung von Kundenbedürfnissen, obgleich auf materieller oder immaterieller Basis, als Produkt angesehen werden. Dazu findet im nachstehenden Kapitel eine Unterteilung des Begriffes statt.

### 2.1.1 Dienstleistungen, Sachleistungen und Produkte

Der Bezeichnung des Wirtschaftsguts liegen verschiedene Definitionen zugrunde, die in Abhängigkeit der betrachteten Disziplin sehr ungenau oder äußerst präzise definiert sein können. Für die nachstehenden Erläuterungen ist es ausreichend, das Wirtschaftsgut als Ergebnis eines Produktions- oder Leistungsprozesses zu sehen, für das es eine Vielzahl an Klassifikationsmöglichkeiten gibt, die Unterscheidungen beispielsweise nach Verwendungszwecken oder Nutzungsdauern vorsehen. Eine in der Wirtschaft zuweilen weit verbreitete, ist die Einteilung der Güter nach Verwendungszwecken. Diese sieht eine Unterteilung des Wirtschaftsgutes unter anderem in die Bereiche der Sachgüter und der Dienstleistungen vor, wobei Sachgüter materielle Gegenstände darstellen, deren Herstellungsprozess tendenziell unabhängiger vom Leistungsempfänger abgehandelt wird. Die Definition der Dienstleistung umfasst immaterielle Güter, deren Verbrauch zeitlich und örtlich zusammenfällt und von hoher Integration des Leistungsempfängers geprägt ist.<sup>16</sup> Die Einordnung der Bauleistung eines Bauunternehmens kann als Dienstleistung, unter Berücksichtigung des Ergebnisses als eine Sachleistung, stattfinden. Das industrielle Bauen im Sinne der Produktion und Montage von Bauteilen zu Bauwerken hingegen ist sicherlich der Definition eines Produktionsgutes und somit einer Subkategorie des Sachgutes zuzuordnen.

Grimscheid hat für das Bauwesen die Idee einer verbalen Vereinheitlichung der beiden Güterarten unter dem Begriff der Produktion aufgegrif-

<sup>15</sup> Vgl. *GIRMSCHIED, G.*: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 41.

<sup>16</sup> Vgl. *KLODT, H.*: Dienstleistungen – Definition: Was ist "Dienstleistungen"?, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/dienstleistungen-28662>. Berlin. Springer Fachmedien Wiesbaden [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

fen und eine Unterteilung vorgenommen. Dabei werden beide Wirtschaftsgüter der Kategorie Produkt, allerdings mit unterschiedlichen Typologien, zugeordnet. Es wird dabei zwischen Produkten aus Produktionsprogrammen und aus Leistungsprogrammen unterschieden, wobei letztere als das für die Bauwirtschaft Relevantere identifiziert wurde. Die Definitionen orientieren sich inhaltlich an den bereits oben angeführten. Es gilt auch hier, dass sich Bauunternehmen häufig an Dienstleistungen bedienen, deren Ergebnisse Produktionsgüter, wie Gebäude oder Bauteile, sind.<sup>17</sup> Der Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass sich Leistungen und Produktionen von Bauunternehmen, ob industriell oder nicht, zunehmend am Produktionscharakter, dessen Ergebnis jedenfalls ein Produkt ist, orientieren.

### 2.1.2 Vorfertigung

Große Bedeutung im industriellen Bau kommt der Vorfertigung zu. Sie umfasst das Herstellen von Bauteilen abseits des Ortes, an dem sie zum Endprodukt zusammengebaut und in weiterer Folge genutzt werden. Man unterscheidet bei der Vorfertigung zwischen der Werksfertigung, die eine Fertigungsproduktion abseits der Baustelle vorsieht und der Baustellenfertigung in kontrollierter, vor allem aber witterungsunabhängiger Umgebung innerhalb der Grenzen des Baufeldes.<sup>18</sup> So kann es zum Beispiel sinnvoll sein, beim Guss weniger Betonplatten mit gleichbleibender Geometrie, die Baustellenfertigung vorzuziehen. Die Wahl der richtigen Methode hängt unter anderem von materialbedingten, logistischen und monetären Faktoren ab, die entsprechende Einflüsse auf die Bauablaufplanung und den Ressourcenbedarf haben. Im Gegensatz zum gängigen Sprachgebrauch, in dem Vorfertigung häufig mit serieller, maschineller oder gänzlich industrieller Fertigungsproduktion gleichgesetzt wird, kann die Vorfertigung auch in Einzel- oder Kleinserien mit manuellen Herstellungsverfahren ablaufen.<sup>19</sup>

Beispiele in allen Epochen der menschlichen Geschichte geben Zeugnisse zu vorkonfektionierten Bauelementen und Bauteilen, wie der seit 1000 Jahren praktizierten Ziegelproduktion. In den letzten Jahrzehnten hat die Vorfertigung von Bauteilen weitere Bedeutung, allerdings auch weitere Komplexität, erlangt. Aus einfach strukturierten und häufig manuell vorgenommenen Vorkonfektionierungen vergangener Zeiten, entstand der zunehmend automatisiertere Charakter durch das Voranschreiten selbstständiger und maschineller Fertigungssysteme. Durch verbesserte technische Rahmenbedingungen in den Bereichen der Materialforschung,

---

<sup>17</sup> GIRMSCHIED, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 39.

<sup>18</sup> Vgl. <http://www.juramagazin.de/baustellenfertigung.html> [Datum des Zugriffs 20.01.2019]

<sup>19</sup> Vgl. MÖLLER, D.-A.; KALUSCHE, W.: Grundlagen der wirtschaftlichen Bauausführung. München. Oldenbourg, 2008, S. 25.

vernetzter Informationstechnologien, sowie durch verbesserte Methoden des Baumanagements, entwickelt sich die Vorfertigung stetig weiter und erhöht den Vorfertigungsgrad auf Baustellen.

Längst spricht man nicht nur im Kontext der Elementbauweise vom sogenannten Vorfertigungsgrad.<sup>20</sup> Als in der Bauwirtschaft gängiger Begriff stellt er mittlerweile eine wesentliche Stellgröße bei der Planung von Abläufen über den gesamten Zeitraum der Bauwerksherstellung dar und beschreibt den Schnittpunkt zwischen kundenunabhängiger und auftragsbezogener Fertigung. Während die eher anonymere Produktfertigung Rahmenbedingungen für wirtschaftliche und kostengünstige Erzeugnisse festlegt, liefert der Montagebau kundenindividuelle Endergebnisse. Im Zuge der industriellen Halbzeugfertigung und integrierter Verarbeitung verschwimmen diese Grenzen immer häufiger.<sup>21</sup> Abhängig vom Vorfertigungsgrad kann eine Kategorisierung herstellbarer Produkte in fünf Typen erfolgen:

- Materialien (Kanthölzer, Bewehrungseisen)
- Halb-Fertigteile (weiter verarbeitbare Bauteile, wie Filigrandecken)
- Fertigteile (Treppen, Rohbauelemente)
- Integriertes Bauteil (Fassadenelemente, Sandwich-Elemente)
- Raumzellen und Modulsysteme (Sanitarräume)

Die Wahl des Vorfertigungsgrades einzelner Bauteile bis hin zu ganzen Bauwerken hat maßgeblichen Einfluss auf alle Projektphasen. Dazu gibt es in Kapitel 2 nähere Erläuterungen. Eng verbunden mit der Vorfertigung ist das Thema der Standardisierung. Denn erst sie ermöglicht der industriellen Fertigung wirtschaftlich Produkte und Leistungen anbieten zu können. Dazu wird im nächsten Kapitel beschrieben, worum es sich bei Halbzeugen handelt, bevor auf verschiedene Arten der Standardisierung eingegangen wird.

### 2.1.3 Halbzeugverarbeitung

Halbzeug ist, wie der Namen schon schließen lässt, der Oberbegriff für halbfertige und zur Weiterverarbeitung hergestellte Rohmaterialien und Produkte. Üblicherweise finden Kategorisierungen nach Art des Herstellungsmaterials, zum Beispiel Metall, Holz, Beton, und nach Art, Form und Eigenschaften, zum Beispiel Rohre oder Platten, des halbfertigen Erzeugnisses statt. Da es sich beim Erzeuger und Verarbeiter von Halbzeugen

<sup>20</sup> Vgl. HAUSER, T.: Modulare Systeme, <https://modulart.ch/glossar/Vorfertigungsgrad>, 2015 [Datum des Zugriffs: 10.02.2020].

<sup>21</sup> Vgl. REICHWALD, R.; PILLER, F.: Interaktive Wertschöpfung – Open Innovation, Individualisierung und neue Formen der Arbeitsteilung. Wiesbaden. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006, S. 211.

um unterschiedliche Personen handeln kann, helfen Normen einen reibungsfreieren Übergang zu schaffen. Die geometrisch bestimmten, festen Körper durchlaufen während ihrer Manipulation diverse manuelle oder maschinelle Verfahren zum Herstellen der gewünschten Eigenschaften und zur Formgebung, wie beispielsweise Walzen, Pressen oder Spanen, bis die gewünschten Anforderungen des Endproduktes möglichst genau erfüllt sind. Man spricht dann auch von Fertigteilen oder, falls weitere Verarbeitungen stattfinden, wieder von Halbfertigteilen. Heute wird fast jedes Bauwerk zu einem gewissen Grad aus vorgefertigten Elementen und Halbfertigteilen erzeugt.<sup>22</sup>

Eng mit der Vorfertigung und der Verarbeitung von Halbzeugen verknüpft sind die in den nächsten Kapiteln erläuterten Begriffe Standardisierung und Modularisierung. Durch die Kombination der Methoden lassen sich im weiten Feld architektonischer Möglichkeiten Bauteile und -werke entwickeln, die komplexe Anforderungen wirtschaftlich und individuell bewältigen können.

#### 2.1.4 Standardisierung

Spricht man von Standardisierung im industriegewirtschaftlichen Sinn, ist im allgemeinen Sprachgebrauch häufig die Vereinheitlichung von Produkten und Bauteilen gemeint. Die Literatur definiert den Begriff wesentlich globaler und lässt etwaigen Interpretationen mehr Spielraum. Es handelt sich um eine Vereinheitlichung von Waren, Dienstleistungen und Verfahren, die nach definierten Vorlagen oder Mustern mit dem Ziel der Reduktion der Produktvariationen, hergestellt werden. Vorgehensweisen können dabei innerbetriebliche oder von externen Stakeholdern bestimmte Prozessbeschreibungen, Anforderungen und Normen, aber auch Typisierungen sein. Praktische Anwendung findet die Standardisierung beispielsweise in der individualisierten Massenfertigung. Dort bedient man sich dieser Methode zur Planung und Produktion vorgefertigter Teile, Zwischen- oder Endprodukte, mit dem Ziel kollektiver Wirkungsvorteile, wie der Reduzierung von Kosten und Komplexität.<sup>23</sup>

Die Auslegung des Begriffes aus industriegewirtschaftlicher Sicht umfasst unter anderem die folgenden Kategorien:<sup>24</sup>

- **Standardisierte Materialien und Bauverfahren** gehören zu den Grundlagen für wirtschaftliches Handeln im Bauwesen und bilden gleichzeitig den ersten Schritt zur rationalen Wertschöpfung. Nicht nur die Produkte aus Produktionsprogrammen, sondern auch jene

---

<sup>22</sup> Vgl. SCHNITTICH, C.: Vorfertigung – Hightech und Handarbeit, Iss. 6, S. 594f.

<sup>23</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 11f.

<sup>24</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 11f.

aus Leistungsprogrammen (Dienstleistungen) profitieren von der Vereinheitlichung durch vorbereitete Problemlösungen, bessere Arbeitsvorbereitungen, leichtere Kalkulierbarkeit und Qualitäts- und Produktivitätsverbesserungen, die unter anderem auf aufgrund des Einarbeitungseffekts<sup>25</sup> entstehen.<sup>26</sup>

- **Standardisierte Bauteile** sind der nächste Schritt im Bestreben, Vorteile der industriellen Produktion zu nutzen. Sie verfolgen das Ziel Erzeugnisse so herzustellen, dass sie unabhängig von den Spezifika eines einzelnen Arbeitsschrittes oder Projektes verwendet werden können. Fehlt die Standardisierung von Bauteilen und den entsprechenden Produktionsprozessen, handelt es sich um Fertigteile, die die Vorteile der industriellen Produktion nur bedingt ausnutzen können.<sup>27</sup> Durch die Vereinheitlichung sinnvoller Materialien, Bauteile und Verfahren, können Produkte wirtschaftlich hergestellt und zu Bauteilen und -elementen, wie Wänden, Fenstern oder Fassaden, verarbeitet werden. Positive Auswirkungen entstehen in Bereichen der Baulogistik, der Ausführungsqualität sowie der Bauzeit und -kosten. Während der Montage von Fertigungsprodukten, aber auch bei nicht industriell geprägten Arbeiten, verhelfen standardisierte Verfahren zu diesen Vorteilen, wenn auch nicht immer im gleichen Ausmaß. Beispiele dafür sind gleich formatierte Gussbauteile, um die Wiederverwendbarkeit von Schalungen zu begünstigen, sowie der Einsatz gleicher Materialien, Geräte und Verfahren zur Reduktion von Such- und Wechseltätigkeiten, sowie der Vermeidung von Verwechslungen.
- **Standardisierte Montage:** Als Resultat industriellen Bauens kann die Montage als Brücke zwischen der Fertigungsproduktion und der Bauwerkserzeugung gesehen werden. Die Planung des grundlegenden Bauprozesses und die Einarbeitung der Montageabfolgen hat nach wie vor große Bedeutung in der Ausführungsplanung. Die erleichterte Plan- und Kalkulierbarkeit der Montagearbeiten gegenüber Bauleistungen soll durch einheitliche, oftmals vom Hersteller vorgeschriebene, Montageverfahren gewährleistet werden. Unterstützt durch standardisierte Materialien, Bauteile, Produkte und Werkzeuge können auch hier weitere logistische und komplexitätsreduzierende Vorteile genutzt werden, die in verkürzter Bauzeit und gesenkten Baukosten resultieren.
- Die **standardisierte Kollaboration und Datenerfassung/-erzeugung** ist ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Herstellung von

<sup>25</sup> Der Einarbeitungseffekt bewirkt eine Produktivitätssteigerung und Qualitätsverbesserung durch wiederholte Arbeiten zu gleichbleibenden Bedingungen. Bedingungen sind dabei unter anderem gleichbleibende Bauelemente und Kolonnenzusammensetzungen, sowie die gleiche Organisation der Arbeitsabläufe.

<sup>26</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.; MARIUS, R.; KUMMER, M.: Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. Wiesbaden. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, 334 f.

<sup>27</sup> Vgl. KOPPELHUBER, J.: Holzbau in der Bauwirtschaft – ein Paradigmenwechsel hin zum Industriellen Bauen, [http://www.forum-holzbau.com/pdf/17\\_EBH2017\\_Koppelhuber.pdf](http://www.forum-holzbau.com/pdf/17_EBH2017_Koppelhuber.pdf). Graz, 2017, S. 8.

Bauwerken. Um eine effiziente und effektive Zusammenarbeit aller Baubeteiligten bei der heutigen Vielzahl an Kollaborations-, Kommunikations- und Interaktionsmitteln zu gewährleisten, werden Regeln, Normen, Methoden und Systeme genutzt, die mit Hilfe von Informationstechnologien folgende Vorteile bieten sollen:

- Einheitliche Datenerfassung und Verarbeitung mit definierten Inhalten, zum Beispiel für BIM basierte Planungen oder Produktionsplanungen für standardisierte Bauteile
- Einfacher und schneller Datenaustausch unter Vermeidung von Mehrfacherfassungen, doppelter Arbeit oder Daten- und Zeitverlusten über die verschiedenen Projektphasen hinweg
- Einfache Zugänglichkeit und Aktualisierbarkeit relevanter Daten für berechnete Beteiligte
- Verbesserte Nutzung der erfassten/erzeugten Daten für Planungen in allen Projektphasen, sowie der Kalkulation, Soll- ist Vergleichen, etc.<sup>28</sup>

Es gibt zahlreiche weitere Bereiche, die das Themenfeld der industriewirtschaftlichen Standardisierung ebenfalls betrifft. An dieser Stelle wird deshalb auf einschlägige Literatur verwiesen.

Weiters stellt die Standardisierung die Abstimmung der Planung auf die Randbedingungen der Produktion dar. Kritiker betonen allerdings die Gefahr, dass konstruktive und gestalterische Freiheiten in der Planung eines Bauwerks genommen werden. Experten entgegnen dieser Schlussfolgerung, zumindest für den Wohnungsbau, folgendermaßen: *„Bei einer Analyse der Gestaltung wird man allerdings feststellen, dass sich diese Freiheit im Wohnungsbau, ausser auf die grundsätzliche Raumeinteilung und die Art des Gebäudes, primär auf die Variation von Bauteilen, Formen und Abmessungen sowie auf die Auswahl aus einer grossen Zahl von Materialien erstreckt. Die technischen Details für Wand- oder Deckenaufbau sowie für die technischen Installationen bei vorbestimmten Abmessungen oder die Anforderungen an Schall- und Wärmeschutz bieten breiten Raum für eine Standardisierung von Bauteilen [...]“*<sup>29</sup> Abhängig vom angestrebten Vorfertigungsgrad, sowie von der gewählten Bauweise gibt es Basiselemente die beispielsweise im Aufbau, in Materialien oder statischen Anforderungen gleich bleiben. Sie können seriell vorkonfektioniert und durch Verfahren der Verarbeitung, wie dem Formatieren in der Halbzeugverarbeitung, gelagert und nach Beauftragung geliefert werden. Diese technisch, wirtschaftlichen Rationalisierungen haben positive Auswirkungen auf die Komplexität eines Bauwerks, die Qualität der Bauteile, sowie auf Bauzeit

---

<sup>28</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 11.

<sup>29</sup> GIRMSCHEID, G.: Strategisches Bauunternehmensmanagement – Prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft. In: v.0, VDI-Buch. Berlin. Springer Verlag, 2010, S. 543.

und -kosten. Um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Standardisierung und Rationalisierung (darunter fallen auch Vorfertigung und Automatisierung) zu erreichen, müssen Bauteile identifiziert, die richtigen Prozesse definiert und zielführende Technologien und Anlagen eingesetzt werden. Kundenindividuelle Anpassungsmöglichkeiten vorgefertigter und standardisierter Bauteile oder Module lassen die Grenzen zwischen kundenunabhängiger Produktion und individualisierten Bauwerken auf Standardbauteilbasis verschwimmen. Welche Bauweisen es gibt und wie standardisierte Produkte in diesen behandelt werden, wird im nächsten Kapitel näher erläutert.

### 2.1.5 Bauweisen

Eine Kategorisierung der Bauweisen, also der Art wie ein Bauwerk errichtet wird, kann sehr verschieden geschehen. Man kann beispielsweise nach Baustoffen, wie Holzbauweisen, Betonbauweisen, etc., aber auch nach Konstruktionsarten, wie Leichtbauweise oder Massivbauweise unterscheiden. Auch Einteilungen, die sich am Tragwerk orientieren, wie der Skelettbauweise, sind gängig. Dieses Kapitel beschäftigt sich speziell mit der Beschreibung und Einteilung industrieller Bauweisen, also jenen, die vorgefertigte, standardisierte Montageelemente voraussetzen.

Vorgefertigte Bauteile bilden den Grundstein für verschiedene industriell geprägte Bauweisen. Je nach gewähltem Vorfertigungs-, sowie Elementierungsgrad, können Bauweisen unterschiedliche Fertigungstiefen, von manuell geprägter Baustellenfertigung bis hin zur gänzlich werksseitigen Vorfertigung von Modulen, reichen. Eine Kategorisierung industrieller Bauteile nach ihrer Dimensionalität, hilft bei der Beschreibung verschiedener Bauweisen:<sup>30</sup>

- eindimensional: Bauweisen mit linienförmigen Bauelementen und -teilen, wie beispielsweise Säulen, Stützen im Ständer- und Fachwerkbau
- zweidimensional: Bauweisen mit flächenförmigen Bauelementen und -teilen, wie Decken, Wände beispielsweise in der Tafelbauweise
- dreidimensional: Bauweisen mit raumgebenden Bauelementen, wie bei Raumzellen im Modulbau

Daraus können die gängigen Arten und Konstruktionen von Bauweisen abgeleitet werden. Nachstehend werden einige wichtige näher erläutert.

In der **Elementbauweise** wird die Baustelle mit transportablen, vorgefertigten, einzelnen Materialien, Bauteilen, und -elementen beliefert, die

<sup>30</sup> Vgl. STAIB, D. R.: Elemente und Systeme, modulares Bauen, Entwurf Konstruktion neue Technologie S.41.

durch Verbindungen montiert werden. Besondere Wirtschaftlichkeit erlangt sie, wenn große Serien gleicher Elemente hergestellt werden. Gängige Vertreter sind die Tafelbauweise, bei der unter anderem tafelförmige Bauelemente wie Wände und Decken zu tragfähigen Räumen zusammengesetzt werden und die Skelettbauweise.<sup>31</sup> Werden diese Elemente im Werk zu einer Raumzelle seriell und gleichbleibend vorgefertigt und bestenfalls mit den entsprechenden Teilen der Gebäudetechnik ausgestattet, spricht man vom **Modulbau**, im speziellen vom Raumzellenbau.<sup>32</sup> Allerdings findet sowohl im Sprachgebrauch als auch in der Literatur häufig keine genaue Trennung zwischen dem Modulbau im Sinne von Bauen im Baukastensystem und modularem Bauen im Sinne des Elementbaus statt. Ist vom modularen Bauen die Rede, so spricht man vom Einsatz standardisierter Bauteile oder Prozesse, die projektübergreifende Anwendung finden. Erst die Definition des Vorfertigungsgrades ermöglicht eine konkrete Aussage darüber, ob die Rede von einzelnen, seriell gefertigten Bauelementen oder von Modulen im Sinne von Raumzellen ist. Der Einsatz modularer Systeme kann, sofern nicht schon in den frühen Phasen der Projektierung miteinbezogen, in zusätzlichen planerischen Aufwänden resultieren, da Bauteilmaße an die Randbedingungen der Fertigung abgestimmt werden müssen. Modulares Bauen erstreckt sich also von der Erzeugung konstruktiver Bauelemente, über die Fertigung einzelner Räume, bis zu Gebäudesystemen, die gesamtheitlich aus Modulen bestehen.<sup>33</sup>

Basis der Modulbauweise im Sinne von Raumsystemen ist die Planung und Ausführung eines Bauwerks aus vorgefertigten Bauteilen, die im Zuge der Elementierung erhoben und schon im Werk zu fertigen Zellen verarbeitet werden. Auch unter dem Begriff Systembau bekannt, bilden einzelne Objekte in ihrer Gesamtheit das Endergebnis (Modul) und seine konstruktiven, bauphysikalischen und architektonischen Eigenschaften ab.<sup>34</sup> Der Begriff System (-bauweise) als Synonym findet durch seine naturwissenschaftliche Definition Einzug in den Sprachgebrauch. Systeme beschreiben Gebilde oder bestimmte Ganze, die aus verschiedenen, miteinander interagierenden Komponenten bestehen und klare räumliche und zeitliche Grenzen aufweisen.<sup>35</sup> In der Regel handelt es sich bei den Raumzellen des Modulbaus um Quader mit sechs Begrenzungsflächen, die auf der Baustelle neben-, oder aufeinander positioniert werden können. Durch diese Aneinanderreihung entstehen, konträr zum Elementbau, doppelte Bauelemente, wie Wände und Decken. Hersteller und Planer behelfen sich durch das Weglassen oder Ersetzen einzelner Elemente. So

<sup>31</sup> Vgl. *FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J.D.; BERGMEISTER, K.*: 2009 Beton-Kalender – Konstruktiver Hochbau Aktuelle Massivbaunormen. In: 2009, Beton-Kalender. Berlin. Ernst & Sohn, 2009, S. 339.

<sup>32</sup> Vgl. *GIRMSCHIED, G.*: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 65f [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

<sup>33</sup> Vgl. *KOPPELHUBER, J.*: Holzbau in der Bauwirtschaft – ein Paradigmenwechsel hin zum Industriellen Bauen, [http://www.forum-holzbau.com/pdf/17\\_EBH2017\\_Koppelhuber.pdf](http://www.forum-holzbau.com/pdf/17_EBH2017_Koppelhuber.pdf). Graz, 2017, S. 8.

<sup>34</sup> Vgl. *PETERSSON, P.; KICKENWEITZ, P.; LINORTNER, C., KREJS, B.*: Intensified Density – Densification strategies for the peri-urban zone using modular construction principles, 2018, S. 151f.

<sup>35</sup> Vgl. F.A. BROCKHAUS: Brockhaus Enzyklopädie – in 24 Bänden. 19. Auflage. Mannheim. F.A. Brockhaus GmbH, 1993, S. 549.

können beispielsweise nach oben offene Module hergestellt werden, bei denen Decken untere Module, Böden obere darstellen. Zu berücksichtigen sind gegebenenfalls zusätzliche Aussteifungsmaßnahmen für den Transport und die Verladung. Entfernt man diese Elemente nicht, können auch bauphysikalische Vorteile im Schall-, und Brandschutz genutzt werden.

In den Teilen der Bauwirtschaft, die sich mit dem industriellen Bauen auseinandersetzen, versucht man diesen Systemgedanken durch den verstärkten Fokus auf die ganzheitliche, also systematische, Betrachtung der Planung und Ausführung auf alle Aspekte des Bauens umzulegen.

Zieht man den Systemgedanken nicht durch die gesamte Bauwerkserzeugung, kommen sogenannte **Mischbauweisen** zum Einsatz. Dabei wird sowohl die Ortbetonbauweise als auch eine Bauweise mit Fertigteilen verwendet. Vor allem im Deckenbereich kommen solche Systeme zum Einsatz.

Fertigteilplatten (ca. 5 cm bewehrte Betonplatten mit Gitterträgern aus Bewehrungsseisen) fungieren hier als „verlorene Schalung“. Dieses System kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn der zu schalende Bauteil für den Ein- und Ausschalvorgang schwer zugänglich ist, niedrige Deckenhöhen (beispielsweise in sogenannten „Kriechkellern“) vorhanden sind oder besonders große Unterstellungshöhen überbrückt werden müssen. Ebenso werden Mischlösungen bei den sogenannten Fertigteilkellern eingesetzt. Der Hohlraum zwischen zwei Fertigteilwandelementen wird mit Ortbeton ausgefüllt.<sup>36</sup>

Wie standardisierte und vorgefertigte Bauelemente und -teile an die individuellen Anforderungen jedes Bauprojekts angepasst werden können, ist Teil des Inhalts des nächsten Kapitels.

## 2.1.6 Mass Customization

*„Mass Customization bezeichnet die Produktion von Gütern und Leistungen für einen (relativ) großen Absatzmarkt, welche die unterschiedlichen Bedürfnisse jedes einzelnen Nachfragers dieser Produkte treffen“<sup>37</sup>*

Die kundenindividuelle Fertigung in der Massenproduktion scheint die Forderung des Marktes nach Einflussmöglichkeiten in gestalterischen, konstruktiven und bauphysikalischen Aspekten bis zu einem gewissen Grad zu erfüllen. Dieser Zustand, so erwarten Experten, wird durch den zunehmenden Digitalisierungsgrad, die verbesserten Technologien im Bereich Automatisierung und neue Informationstechnologien, stetig verbessert.

<sup>36</sup> HOFSTADLER, C.: Schularbeiten – Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation, VDI-Buch. Berlin. Springer Verlag, 2008, S. 10.

<sup>37</sup> PILLER, F.T.: Mass Customization, Markt- und Unternehmensentwicklung Markets and Organisations. Wiesbaden. Springer Fachmedien, 2007, S. 160.

Der im ersten Moment widersprüchlich wirkende Begriff Mass Customization, zu Deutsch der kundenindividuellen Massenproduktion, ermöglicht Konsumenten oder ihren Vertretern, in definierten Zeiträumen zwischen vorweg festgelegten Einflussmöglichkeiten oder Variationen eines grundsätzlich standardisierten Produktes zu wählen. Der Produktionsprozess an sich, umfasst allerdings weiterhin Produktionstechniken und -methoden, die auf eine wirtschaftliche Massenproduktion ausgelegt sind.<sup>38 39</sup> Auch der Preis der so hergestellten Produkte bleibt in ähnlicher Höhe um sicherzustellen, dass die Individualisierung die gleiche Kaufbereitschaft beim Kunden und keinen Wechsel des Marktsegments in spezialisierte Segmente und Nischen impliziert.<sup>40</sup> Zur Umsetzung der Mass Customization können unterschiedliche Ansätze, nämlich die Soft- und Hard Customization, verfolgt werden, die vom Zeitraum der Individualisierung abhängen. Die sogenannte Soft Customization ermöglicht dem Konsumenten Individualisierungsmaßnahmen nach der Fertigung eines Produktes. Ein Beispiel dafür ist die Halbzeugverarbeitung, bei der standardisierte Halbzeuge vorgefertigt und nach erfolgter Beauftragung durch Formatierungen und weitere Manipulationen bearbeitet werden. Ein zweiter Ansatz ist die Hard Customization, bei der schon innerhalb des Fertigungsprozesses Individualisierungen vorgenommen werden können. Branchenübergreifend sieht man in beiden Fertigungsstrategien vor allem folgende Vorteile:<sup>41</sup>

- Geringe Stückkosten vermeintlich personalisierter Produkte, die einen zusätzlichen Wert aus Kundensicht generieren sollen
- Produktdifferenzierungen im Wettbewerb
- Produkt- und Markenbindung

Mass Customization ist nicht mit Variantenfertigung zu verwechseln, deren Ziel es ist, hohe Stückzahlen unterschiedlicher Versionen eines Produktes auf Basis von Marktprognosen herzustellen. Beispiele für die Variantenfertigung findet man in der Autoindustrie: Produktangebote eines Fahrzeugs umfassen hunderte Varianten mit tausenden Sonderausstattungs-möglichkeiten. Als wesentlicher Nachteil der Variantenfertigung wird nicht nur die steigende Komplexität mit jeder Variante, sondern auch die

---

<sup>38</sup> Vgl. *TERNES, A.; TOWERS, I.; JERUSEL, M.*: Konsumentenverhalten im Zeitalter der Mass Customization – Trends; Individualisierung und Nachhaltigkeit, Essentials. Wiesbaden. Springer Gabler, 2015, 3f.

<sup>39</sup> Vgl. *PILLER, F.T.*: Mass Customization, Markt- und Unternehmensentwicklung Markets and Organisations. Wiesbaden. Springer Fachmedien, 2007, S 4f.

<sup>40</sup> Vgl. *THOMAS, P.*: Mass Customization als Wettbewerbsstrategie in der Finanzdienstleistungsbranche. Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2008, Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008, S. 53ff.

<sup>41</sup> *THOMAS, P.*: Mass Customization als Wettbewerbsstrategie in der Finanzdienstleistungsbranche. Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2008, Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008, S. 75f.

Notwendigkeit hoher Lagerbestände angesehen, die sich im Falle der Mass Customization lediglich auf Rohmaterialien beschränken.<sup>42</sup>

In der Baubranche verläuft der Trend, mit wenigen Ausnahmen, wie beispielsweise in verschiedenen Ausbaugewerken, in Richtung Mass Customization. Standardisierte und somit komplexitätsreduzierende Produkte, Maschinen, Verfahren und Technologien sollen Einsatz-, Kombinations- und Verarbeitungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Bauzeit, -kosten und Qualität erhöhen. Verschiedene Methoden und Techniken der Rationalisierung, zu denen neben der Automatisierung und der Vorfertigung auch Standardisierungsmaßnahmen zählen, wirken dabei teilweise unterstützend oder gar federführend. Welchen Grundgedanken die Rationalisierung verfolgt und welche Arten es gibt, wird im nächsten Kapitel erläutert.

### 2.1.7 Rationalisierung

Der Begriff Rationalisierung im bauwirtschaftlichen Sinn beschäftigt sich primär mit den Fragen wie Output bei gleichbleibendem Input gesteigert, oder Input bei gleichbleibendem Output gesenkt werden kann. Output wird dabei häufig als Menge, durch Umsätze oder Gewinne ausgedrückt, Input als Ressourceneinsatz der Produktionsfaktoren.<sup>43</sup> Ziele sind bei allen Rationalisierungsprogrammen Verbesserungen der Produktivität-, Effizienz und Rentabilität, sowie die Senkung von Kosten.<sup>44</sup> Maßnahmen können der nachstehenden Liste zugeordnet werden, in der eine grobe Einteilung mit Beispielen vorgenommen wird.<sup>45</sup>

- Technische Rationalisierung
  - Allgemeiner technischer Fortschritt, zum Beispiel durch bessere Arbeitsmittel
  - Mechanisierung und Automatisierung, zum Beispiel durch den Einsatz von Maschinen und Geräten statt manueller Arbeit
  - Geänderte und verbesserte Herstellungs-, beziehungsweise Produktionsverfahren durch neue Techniken, Methoden und Materialien, beispielsweise durch Ersetzen einer Baustellenfertigung mit einer Werkstattfertigung oder Fertigungsproduktion (Vorfertigung)

<sup>42</sup> Vgl. THOMAS, P.: Mass Customization als Wettbewerbsstrategie in der Finanzdienstleistungsbranche. Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2008, Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008, S. 127f.

<sup>43</sup> Produktionsfaktoren werden in zwei Kategorien unterteilt: Elementarfaktoren wie Werkstoffe, Betriebsmittel oder menschliche Arbeit, sowie dispositive Faktoren wie Leitung, Planung, Organisation und Kontrolle.

<sup>44</sup> Vgl. BRONNER, A.: Handbuch der Rationalisierung. In: 331, Kontakt & Studium. Renningen. expert-Verl., 2003, S. 2.

<sup>45</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Produktivität im Baubetrieb – Bauablaufstörungen und Produktivitätsverluste. Berlin. Springer Vieweg, 2014, S. 31ff.

- Einsatz zweckmäßiger Baustoffe, beispielsweise durch das Verwenden von Fasern statt Bewehrungsstahl
- Organisatorische Rationalisierung
  - Anpassung der Aufbau- und Ablauforganisation zur Verschlankung der Verwaltung und Produktion, sowie der Vermeidung von Doppel- und Parallelarbeit
  - Planung der Bau- und Produktionsabläufe die zu kürzeren Bauzeiten, oder geringerem Materialeinsatz führen
  - Standardisierung von Produkten zur Senkung der Variantenvielfalt
  - Outsourcing zur günstigeren Herstellung
- Soziale Rationalisierung
  - durch den Einsatz von MitarbeiterInnen mit Qualifikationen entsprechend den Aufgaben der Position
  - Schulungen, Ausbildungen
  - Förderungs- und Motivationssysteme

Besondere Bedeutung für die Industrialisierung des Bauprozesses hat die Automatisierung. Experten betonen, dass der Weg der Industrialisierung fast untrennbar mit der kontinuierlichen Standardisierung der Bauprodukte und der Systematisierung der Abläufe zu flexiblen, mechanisierten Prozessen verbunden ist.<sup>46</sup> Dies betrifft nicht nur Fertigungsproduktionen, in denen alle Stufen der Mechanisierung, von manuellen bis hin zu hoch automatisierten Produktionen zum Einsatz kommen, sondern auch die durch handwerkliche Arbeiten geprägte Baustellenproduktion.<sup>47</sup>

Die in diesen Kapiteln beschriebenen Prinzipien stellen Anforderungen an den industriellen Bauprozess und die industrielle Produktion von Elementen und Systemen. Diese Anforderungen und Merkmale werden im nächsten Kapitel näher erläutert.

## 2.2 Charakteristika des industriellen Bauens

Nachdem im vorigen Kapitel wichtige Prinzipien des industriellen Bauens näher erläutert wurden, wird nun auf Anforderungen, Eigenschaften und Merkmale eingegangen. Dazu wird erläutert, welche Anforderungen industrielle Prinzipien und Produktionen an den Bauprozess stellen und welche gängigen Produktionssysteme sich daraus ergeben. Weiters wird da-

---

<sup>46</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Strategisches Bauunternehmensmanagement – Prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft. In: v.0, VDI-Buch. Berlin. Springer Verlag, 2010, S 529f.

<sup>47</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S.14.

rauf eingegangen, welche charakteristischen Elemente durch die industrielle Bauteilproduktion hergestellt werden und wie diese im industriellen Planungsprozess berücksichtigt werden können. Danach wird auf ausgewählte, bauwirtschaftlich relevante Aspekte in der Montage der Elemente und Systeme eingegangen. Sowohl die Charakteristika des industriellen Bauens, als auch die Beschreibung der Elemente und Produktionssysteme dienen dazu herauszufinden, welche Einflüsse sich auf den Bauzeitplan eines industriellen Bauprozesses ergeben. Des Weiteren werden Anforderungen und Randbedingungen für das in Kapitel 4 erläuterte Konzept einer Fertigungslinie beschrieben.

### 2.2.1 Anforderungen an das industrielle Bauen

Um auch in Zukunft wirtschaftlich handeln zu können, ist es aus Sicht produzierender Unternehmen weiterhin nötig, Kundenwünsche zu identifizieren und die eigene Produktion auf diese Anforderungen mit zukunftsorientierten Produktionssystemen anzupassen.<sup>48</sup> Einschlägige Literatur beschreibt die Anforderungen an den Kernprozess eines produzierenden Unternehmens weitestgehend mit einem Viereck, in dem die Kriterien „Zeit“, „Kosten/Wirtschaftlichkeit“, „Qualität“ und „Flexibilität“ Zielgrößen der betrieblichen Leistungserbringung zur Befriedigung des Kundenwunsches darstellen.<sup>49</sup> Das in der nachstehenden Abbildung 1 dargestellte Viereck, bildet eine quantitativ gleich groß bleibende Fläche, was zur Folge hat, dass gesteuerte oder unbewusste Veränderungen an einem Eck, Abweichungen an den beiden anderen hervorrufen. Versucht man also beispielsweise die Ausführungsqualität zu erhöhen, steigen Kosten und/oder die Zeit der Leistungserbringung, wodurch Zielkonflikte, dargestellt in Form eines Blitzes, zwischen den einzelnen Kriterien auftreten können.<sup>50</sup>

<sup>48</sup> Vgl. KLETTI, J.: MES - Manufacturing Execution System. Berlin. Springer Verlag, 2015, S.12f.

<sup>49</sup> Vgl. KUMMER, S.; GRÜN, O.; JAMMERNEGG, W.: Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. Hallbergmoos. Pearson, 2019, S. 71.

<sup>50</sup> Vgl. KUMMER, S.; GRÜN, O.; JAMMERNEGG, W.: Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. Hallbergmoos. Pearson, 2019, S.72f.

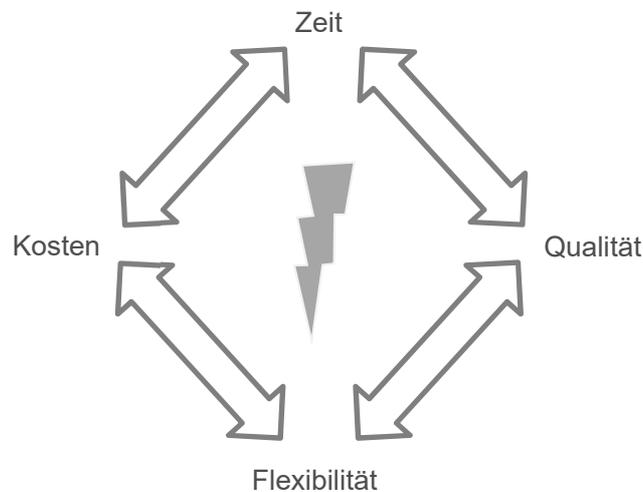


Abbildung 1: Zielgrößen und Zielkonflikte im Prozessmanagement <sup>51</sup>

Von diesen Anforderungen abgeleitete Zielgrößen sind unter anderem Termintreue und Wirtschaftlichkeit im Kontext der Reaktionsfähigkeit und der Transparenz.

Nicht nur im Kontext des Prozessmanagements von Produktionsfertigungen, sondern auch im klassischen Bauprojektmanagement kommen diese, oder ähnliche Darstellungen in Form von Dreiecken zum Einsatz.

Für das industrielle Bauen werden in der Literatur spezifischere Zielgrößen angegeben, die einerseits als Erweiterung und andererseits als Umsetzungshilfe zu den bereits genannten verstanden werden können. Diese sind der nachstehenden Liste zu entnehmen <sup>52</sup>

- Standardisierung
- Systematisierung
- Flexibilisierung
- Mechanisierung und Automatisierung
- Prozessorientierung
- Rationalisierung

Daraus werden Definitionen abgeleitet, die inhaltlich der nachstehenden ähnlich sind:

<sup>51</sup> Vgl. KUMMER, S.; GRÜN, O.; JAMMERNEGG, W.: Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. Hallbergmoos. Pearson, 2019, S.72.

<sup>52</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S.7. 7

„Rationalisierung von Arbeitsprozessen zur Erreichung von Kosteneffizienz, höherer Produktivität und Qualität“<sup>53</sup>

In der Literatur werden anhand dieser allgemein formulierten Faktoren Anforderungen aufgelistet, die aus den Merkmalen der industriellen Produktion abgeleitet und für das industrielle Bauwesen adaptiert werden.<sup>54</sup>

<b>Merkmale industrieller Produktion</b>	<b>Anforderungen an industrielles Bauen</b>
Zentralisierte Produktion	Vorfertigung von Bauteilen im Werk
Massenfertigung / zunehmend variable Fertigung	Entwicklung von variablen Grundtypen
Fertigung auf Basis standardisierter Lösungen und Produktion von Varianten	Standardisierung von Bauteilen bei Flexibilität in der Gestaltung
Spezialisierung	Konzentration auf bestimmte Marktsegmente
Integration von Planung, Produktion und Marketing	Interaktion von Planung, Konstruktion, Produktionsplanung und Produktion sowie Marketing unter Einbezug des Unternehmers
Optimierte Prozesse und Organisation	Optimierung der Planungs- und Produktionsprozesse in Bezug auf Automatisierung und Mechanisierung

Tabelle 1 Merkmale industrieller Produktion und Anforderungen an die Bauproduktion<sup>55</sup>

Diese von den Merkmalen der industriellen Produktion abgeleiteten Anforderungen orientieren sich inhaltlich an einem ganzheitlich industriellen Bauprozess. Durch die Umlegung der Merkmale auf die Bauproduktion zeichnet sich der Einfluss der industriellen Prinzipien ab. Dazu gehört die in obenstehender Tabelle beschriebene zentralisierte Produktion, die im Bauwesen sowohl durch die Fertigung auf der Baustelle (Baustellenfertigung) oder durch die Vorfertigung in baustellenunabhängigen Werken abgehandelt werden kann. Auch die Forderung nach automatisierten und mechanisierten Prozessen folgt den industriellen Prinzipien. Weiters ist der industrielle Einfluss bei den Forderungen nach standardisierten Bauteilen und Grundtypen, die individuell anpassbar produziert werden sollen, erkennbar. Zur Bewältigung dieser Anforderung, nutzen Unternehmen

<sup>53</sup> GIRMSCHIED, G.: Strategisches Bauunternehmensmanagement – Prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft. In: v.0, VDI-Buch. Berlin. Springer Verlag, 2010, S. 529.

<sup>54</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 7.

<sup>55</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 7.

Methoden, wie die Mass Customization, die dem Markt bedürfniserfüllende Bauprodukte zur Verfügung stellen. Um diese Produkte wirtschaftlich erzeugen und vertreiben zu können, wird in der obenstehenden Tabelle auf die Notwendigkeit der Interaktion von Bauwerksplanung, Produktplanung, Produktionsplanung und Produktion verwiesen. Hier gilt es den Bauprozess neu zu gestalten und Arbeit und Kommunikation über die Schnittstellen der Projektphasen und -beteiligten reibungslos zu ermöglichen. Die sich dabei ergebenden Änderungen und Herausforderungen an den Bauprozess werden im Kapitel 2.3 behandelt.

Abgeleitet von diesen Anforderungen werden beispielhafte Paradigmen zur Realisierung des industriellen Bauprozesses und ihre Auswirkungen auf die Marktstrategie genannt. Je nach Grad der Industrialisierung ist es notwendig, einzelne Maßnahmen zur Zielerreichung zu setzen oder den gesamten Planungs- und Ausführungsprozess neu zu gestalten.<sup>56</sup>

---

<sup>56</sup> Vgl. *GIRMSCHIED, G.*: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 7.

Paradigma	Maßnahme	Marktstrategie bzw. Ziel
<b>Prozessorientierung</b>	Vor- und Baustellenproduktion: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Planungs- und Kontrollinstrumente zur Reduzierung nicht wertschöpfender Tätigkeiten</li> <li>• Produktionsfluss</li> <li>• Logistik</li> </ul>	Kosteneffizienz
<b>Design to build</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammenarbeit in der Planung zwischen Planer und Unternehmen</li> <li>• Standardisierung von Elementen, Details, Verbindungen</li> <li>• Vereinheitlichung ähnlicher Elemente und Details</li> <li>• Digitale Übertragung zu Fertigungseinrichtungen und Controlling</li> </ul>	Kosteneffizienz
<b>Baukastenproduktion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbeitsplanung</li> <li>• Bedarfsplanung</li> <li>• Kontrolle des Arbeitsfortschritts</li> <li>• Mechanisierte Fertigung</li> <li>• Planung der Logistik auf der Baustelle</li> <li>• Controlling</li> </ul>	Kosteneffizienz
<b>Vorproduktion</b>	Im Werk: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Klar definierte Arbeitsabläufe</li> <li>• Unabhängig von klimatischen Bedingungen</li> <li>• Klare Arbeitsvorbereitung</li> <li>• Arbeitsplanung</li> <li>• Bedarfsplanung</li> <li>• Mechanisierte, automatisierte Fertigung</li> <li>• Logistik</li> </ul>	Kosteneffizienz
<b>Produktorientierung</b>	Entwickeln, produzieren und verkaufen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kundengruppen</li> <li>• Prozessorientierte Produktion</li> <li>• Kunden oder Kostenführer hätscheln</li> <li>• Marketing</li> </ul>	Kosteneffizienz und/oder Differenzierung
<b>Nachhaltige Produktionsorientierung</b>	Lebenszyklus- und werterhaltungsorientiertes Produkt: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung des Produkts hinsichtlich Lebenszykluskosten und Werterhaltung</li> <li>• Zusammenarbeit</li> <li>• Marketing</li> </ul>	Kosteneffizienz und/oder Differenzierung

Tabelle 2: Industrialisierungsparadigmen in der Bauproduktion<sup>57</sup>

<sup>57</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 8.

Die obenstehende Tabelle gibt Einblick in exemplarische Handlungsbereiche in der Gestaltung des industriellen Bauprozesses. Wie in Kapitel 2.3 gezeigt wird, in dem Auswirkungen des industriellen Bauens auf den Bauzeitplan erläutert werden, haben vor allem die Paradigmen der „Design to build“ Methode Auswirkungen auf den Verlauf der Planungs- und Ausführungsphasen des Bauprozesses. Ein Beispiel dafür ist das besonders frühe Miteinbeziehen von Produktherstellern in die Planung, um aufwändige Änderungen in der Ausführungsplanung zu vermeiden. Durch diese Maßnahmen verkürzen sich die frühen Projektphasen und kosteneffizientes Planen wird ermöglicht.

Die bereits beschriebenen Prinzipien des industriellen Bauens haben Auswirkungen auf abgeleitete Maßnahmen in Tabelle 2. Beispiele dafür sind die Standardisierung von Produkten, die Automatisierung von Prozessen und Mechanisierung von Tätigkeiten. Über diese Maßnahmen hinaus, werden für das in Kapitel 4 beschriebene Konzept einer Fertigungslinie folgende Maßnahmen identifiziert, die mitunter als Grundlage zur Konkretisierung der Prozessschritte und der Kalkulation dienen:

- Die Maßnahmen des Paradigmas der Prozessorientierung fordern die Trennung von wertschöpfenden und nichtwertschöpfenden Tätigkeiten zur Schaffung von Planungs- und Kontrollinstrumenten der einzelnen Prozesse. Daraus abgeleitet wird, dass es auch in der Kalkulation der Fertigungslinie notwendig ist, zwischen den beiden Tätigkeitsarten zu unterscheiden. Die so erzeugten Werte dienen der Ermittlung der Produktionszeiten und -kosten, und liefern Grundlage für die Entscheidungsfindung bei der Festlegung von Prozessen und Ressourcen einer Fertigungslinie. Diese und weitere Handlungsmaßnahmen sind in Kapitel 4.5 näher erläutert.
- Aus dem Paradigma der Vorproduktion geht, neben einigen grundlegenden Prinzipien des industriellen Bauens, auch die Maßnahme der klaren Definition der Arbeitsabläufe hervor. Dazu wird in Kapitel 3 zuerst die Produktionsfertigung von Betonfertigteilen in den Kontext des Bauzeitplans eines industriell gestalteten Bauprozesses gesetzt und in weiterer Folge in Kapitel 4.2 detailliert auf die Prozesse der Fertigungslinie eingegangen. Dieser genauen Beschreibung bedient sich letztlich die Kalkulation, die einerseits Prozesse quantifiziert und andererseits ressourcenabhängige Kostenanteile darstellt.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Zielgrößen, sowie Anforderungen an den industriellen Bauprozess und die sich daraus ergebenden Handlungsmaßnahmen stellen Randbedingungen für das in Kapitel 4 beschriebene Fertigungskonzept dar. Weiters begünstigen sie verschiedene Produktionssysteme und -verfahren. Auf einige, die für die industrielle Fertigung von Betonbauteilen relevant sind, wird im nächsten Kapitel eingegangen, bevor erläutert wird, welche Elemente und Module damit erzeugt werden können.

## 2.2.2 Produktionssysteme und -typen des industriellen Bauens

Industrielles Bauen verfolgt nicht nur das Ziel der industriellen Produktion, sondern beschäftigt sich auch mit der Umsetzung einer industriellen Organisation der Planungs- und Bauprozesse. Unter industriellem Bauen versteht man nicht nur die Anwendung von speziellen Maßnahmen und Methoden auf die Bauwerkserzeugung, wie dem Ersetzen manueller Arbeit durch Maschinen, oder dem standardisieren und automatisieren einzelner Abläufe.<sup>58</sup> Die Verwendung von industriellen Produktionssystemen im Sinne der Managementlehre, haben Auswirkungen auf nahezu alle Unternehmensbereiche und sind Teil der Schaffung ganzheitlicher Organisationsstrukturen.<sup>59</sup> Dabei können Produktionssysteme als Philosophie, Systematik und Umsetzung von Methoden auf wesentliche Unternehmensbereiche und Prozesse verstanden werden. Sie beinhaltet unter anderem standardisierte und konsequent angewandte Methoden, Techniken und Regeln, die Randbedingungen für die Produktion und den kontinuierlichen Verbesserungsprozess sind. Nachstehend werden einige Systeme genannt und näher beschrieben.<sup>60</sup>

Durch Vermeidung von Verschwendung aller Ressourcen eines Unternehmens hat der Automobilhersteller Toyota Mitte bis Ende des vergangenen Jahrhunderts mit dem Toyota Produktionssystem (TPS) markante Kostensenkungen erreichen können. Auf Grundlage verschiedener Konzepte der Massenproduktion, wie dem Taylorismus und dem Fordismus konnten Methoden und Techniken, wie die Just-In-Time (JIT) Produktion, entwickelt werden, die bis heute Anwendung finden. Ziele der Systeme sind stets eine hohe Produktivität, Flexibilität, Schnelligkeit, Qualität und Transparenz bei ständiger kontinuierlicher Verbesserung zu schaffen. Prozess- und Produktstandards dienen dabei als verbindliche Vorgaben. Das weiterentwickelte System Lean Production tritt heute als Synonym für das TPS auf. Lean Construction ist die Erweiterung des TPS und Lean Production auf die Baubranche. Auch hier ist die Vermeidung von Verschwendung ein zentraler Aspekt des Herstellungsprozesses eines Bauwerks. Dieser wird durch den Fokus auf den gesamten Wertstrom, dem Streben nach Perfektion und dem Erfüllen oder Übertreffen von Kundenerwartungen ergänzt. Die Verbindung mehrerer Produktionssysteme mit dem Ziel Konzepte zu entwickeln, die unternehmensspezifische Stärken hervorheben, und Schwächen sukzessive reduzieren, werden ganzheitliche Produktionssysteme genannt. Dabei werden einzelne kombinierbare Elemente aus unterschiedlichen Systemen eingesetzt. Ein Beispiel wäre die

<sup>58</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 9.

<sup>59</sup> Vgl. SCHLICK, H.: Lean Construction – Ganzheitliches Produktionssystem für den Technischen Generalunternehmer, [https://www.tmb.kit.edu/Forschung\\_595.php](https://www.tmb.kit.edu/Forschung_595.php) [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

<sup>60</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, [http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript\\_Industrielles%20Bauen.pdf](http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript_Industrielles%20Bauen.pdf), 2007, S. 39f [Datum des Zugriffs: 16.01.2020].

Verknüpfung von Vorteilen der Massenproduktion des Taylorismus mit der Vermeidung von Verschwendung des Lean Ansatzes und dem Einsatz innovativer Arbeitsformen, die den Menschen in den Mittelpunkt eines Prozesses stellen.<sup>61</sup>

Betrachtet man das Produktionssystem nicht im Sinne der Managementlehre, sondern als Subsystem der Produktionsfertigung, so ist meist von einzelnen Werken oder Fabriken, sowie Fertigungslinien und Maschinen die Rede, die Teil einer industriellen Organisation sind. Innerhalb dieser werden Input Einheiten (Produktionsfaktoren) einer Veränderung zur Wertsteigerung (Produktionsprozess, wie Fertigung oder Montage) übergeben, um Output Einheiten, also definierte Endprodukte wie Bauteile, Dienstleistungen oder Informationen, zu erhalten. Der Produktionsprozess kann durch drei, weitestgehend zusammenwirkende Faktoren durchgeführt werden: Ressourcen (1) handeln mittels Daten (2) einen Prozess (3) ab. Jene Ressourcen die einen hohen Einfluss auf die Wert-, beziehungsweise Kostenentwicklung haben stellen dabei die maßgeblichen Faktoren dar. Beispielhaft können Mitarbeiter, Maschinen, Werkzeuge genannt werden. Zusammen mit notwendigen Daten, nämlich Arbeitsplänen, Knowhow, Informationen, etc. kann der Prozess zur Wertschöpfung, beziehungsweise -steigerung durchgeführt werden.

Der beschriebene Transformationsprozess kann sich verschiedener Produktionstypen bedienen. Unter dem steigenden Verlangen individuell vorgefertigter Produkte im Bauwesen haben sich folgende Typen in der industriellen Bauwerkserzeugung etablieren können:<sup>62</sup>

- **Einzelfertigung:** Bei diesem Fertigungstyp mit Losgröße eins, werden Produkte einmalig und für einen bestimmten Kunden individualisiert hergestellt. Hinsichtlich der Kommunikation, der Variabilität der Produkte, der Arbeitsschritte und Herstellungsprozesse entsteht ein erheblicher Mehraufwand.<sup>63</sup>
- **Variantenfertigung:** Sie basiert auf der Analyse des Absatzmarktes und stellt standardisierte Bauteile in verschiedenen Varianten her, zwischen denen der Konsument wählen kann. Die Nachteile der Einzelfertigung, mit Ausnahme zusätzlicher Komplexität durch die Variantenvielfalt (beispielsweise an das Qualitätsmanagement) und hoher Lagerbestände, werden so bis zu einem gewissen Grad umgangen.

---

<sup>61</sup> Vgl. KIRSCH J.: Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme – Entwicklung eines Gestaltungsmodells eines Ganzheitlichen Produktionssystems für den Bauunternehmer, 2008, S.17f.

<sup>62</sup> Vgl. PILLER, F.T.: Mass Customization, Markt- und Unternehmensentwicklung Markets and Organisations. Wiesbaden. Springer Fachmedien, 2007, S. 128f.

<sup>63</sup> Vgl. PILLER, F.T.: Mass Customization, Markt- und Unternehmensentwicklung Markets and Organisations. Wiesbaden. Springer Fachmedien, 2007, S. 138f.

- Mass Customization: Sie verbindet die Vorteile der Massenfertigung mit denen der individuellen Fertigung. Kunden haben dabei die Möglichkeit, Einfluss auf bestimmte Bereiche der Bauteilerzeugung oder -verarbeitung zu nehmen, um das Endprodukt an die eigenen Anforderungen anzupassen.<sup>64</sup>

Das in Kapitel 4 beschriebene Konzept einer Fertigungslinie bezieht sich auf die Definition des Produktionssystems im Sinne des Subsystems einer Fertigung. Für die Erzeugung und Verarbeitung der so produzierten und individualisierten Betonfertigteile wird der Produktionstyp der Mass Customization gewählt. Dieser Typ eignet sich für das Konzept besonders, da einerseits die Massenproduktion von Bauteilen im Fokus des Unternehmens +Ultra steht und andererseits vorgefertigte Betonbauteile im industriellen Bauprozess individualisierbar und flexibel sein sollen.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Produktionssysteme und -typen ermöglichen die Herstellung verschiedener Produkte, die in Abhängigkeit des gewählten Vorfertigungsgrads und der Elementierung stehen. Die Beschreibung materialunabhängiger Produktgruppen ist Teil des nächsten Kapitels, wobei konkretere Produkte für den Betonbau in Kapitel 4 beispielhaft genannt sind.

### 2.2.3 Elemente und Module des industriellen Bauens

Ein wesentliches Charakteristikum des industriellen Bauens stellen die herstellbaren Erzeugnisse, also Elemente und Module aus den Produktionssystemen und -typen, die im vorherigen Kapitel erläutert wurden, dar. Nachstehend werden diese Erzeugnisse beschrieben und anhand ihrer Funktionalität und Räumlichkeit kategorisiert. Anschließend wird erläutert, wie diese Elemente in den Planungsprozess integriert werden können, um ein Subsystem, wie einzelne Räume oder ein gesamtes Bauwerk, abbilden zu können.

Industrielles Bauen sieht, wie bereits im Zuge der Formulierung von Anforderungen an den industriellen Bauprozess erläutert, eine Trennung von Produktions- und Einsatzort des Endproduktes vor. Unweigerlich ergeben sich aus dieser Randbedingung in Kombination mit verschiedenen Produktionssystemen und -typen herstellbare Erzeugnisse, die in die nachstehenden Kategorien, unabhängig von den gewählten Basismaterialien, unterteilt werden können und entsprechend nachstehender Abbildung 2 eingeteilt werden können.<sup>65</sup>

<sup>64</sup> Vgl. Kapitel 2.1.6

<sup>65</sup> Vgl. *GIRMSCHIED, G.*: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 2f [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

- Halbfertig-Rohbauelemente: werden als verlorene Schalungen und als Verbundbauteile eingesetzt (zum Beispiel Filigrandecke)
- Fertighohbauelemente: Im Werk vorgefertigte Elemente, die zum Einbauort befördert und durch definierte Anschlüsse auf der Baustelle montiert werden (zum Beispiel Treppenläufe, Stützen, Wandplatten). Unter Umständen sind weitere Bearbeitungsmaßnahmen, wie Oberflächenbehandlungen durchzuführen.
- Fertigelemente: Bauteile, die im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle montiert werden, die ihre konstruktiven, gestalterischen und bauphysikalischen Anforderungen bereits erfüllen (zum Beispiel Fassadenelemente).
- Rohbauraummodule/Rohbaumodule: Bauteile bilden ein raumgebendes Modul. Ausbauarbeiten werden nach Montage auf der Baustelle durchgeführt.
- Fertigraummodule/Fertigmodule: Fertigelemente werden zu raumbildenden Modulen zusammengebaut. Sie bilden funktionsfertige Einheiten, die aus mehreren Bauteilen bestehen können, wobei Ausbauarbeiten bereits im Zuge der Vorfertigung durchgeführt werden. Sie werden vor allem bei hochinstallierten Räumen wie z. B. Bädern eingesetzt, in denen schon im Werk alle notwendigen raumgebenden Elemente zusammengesetzt und Gebäudetechnik und Installationen montiert werden.<sup>66</sup>
- Gebäudesysteme aus Fertigteilen/Fertigsysteme: Bauteile und Elemente, die vorgefertigt hergestellt und im Verbund konstruktive, gestalterische und bauphysikalische Anforderungen erfüllen. Erst aus der Anordnung der Elemente kann die beabsichtigte Aufgabe (Tragwirkung, ästhetische Wirkung) realisiert werden. Abhängig von verschiedenen Faktoren wie der gewählten Bauweise, wird ein unterschiedlicher Vorfertigungsgrad umgesetzt, der Bauwerke beispielsweise durch Stützen-Riegel-System oder auch aus gänzlich vorgefertigten Modulen ermöglicht.

Die Differenzierung der Charakteristika dieser Bauteile ist in der nachstehenden Abbildung 2 dargestellt. Sie ist von der inhaltlichen Integration, also der Integration von verschiedenen Bauelementen und Eigenschaften, sowie vom räumlichen Verknüpfungsgrad abhängig. Sowohl die inhaltliche Integration als auch der räumliche Verknüpfungsgrad werden nach Abbildung 2 näher erläutert.

---

<sup>66</sup> Vgl. *GIRMSCHIED, G.*: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, [http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript\\_Industrielles%20Bauen.pdf](http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript_Industrielles%20Bauen.pdf), 2007, S. 64 [Datum des Zugriffs: 16.01.2020].

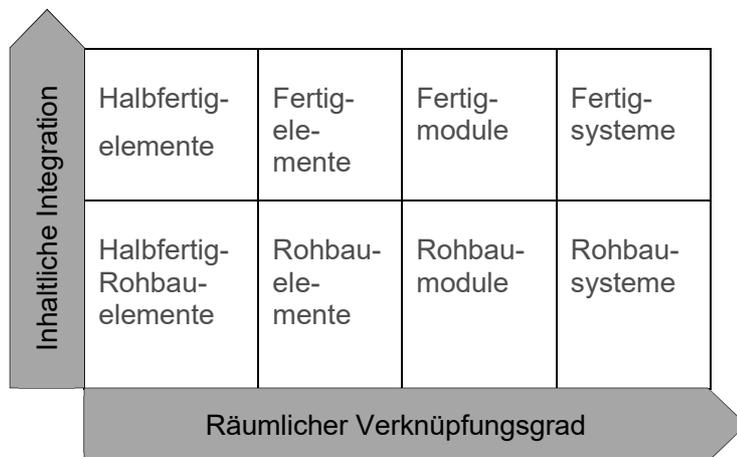


Abbildung 2: Differenzierung der Elemente anhand ihrer inhaltlichen Integration und dem räumlichen Verknüpfungsgrad<sup>67</sup>

Zur Verdeutlichung wie Bauelemente und -systeme anhand ihrer Charakteristika dieser Grafik zugeordnet oder ausgewählt werden können, wird folgendes Beispiel eines Außenwandelements genannt. Eine Betonscheibe, die nur eine Funktion erfüllt, hier beispielsweise die Lastabtragung und ein Einzelteil eines Systems oder Raums darstellt, weist eine geringe inhaltliche Integration und eine geringe Räumlichkeit auf. Werden im Zuge der Vorfertigung Isolierungen, Leitungen, Haustechnik oder Oberflächen mitverbaut, steigt die inhaltliche Integration. Durch dieses Miteinbeziehen zusätzlicher Eigenschaften und Funktionen steigt häufig auch der Planungs- und Koordinationsaufwand, vor allem in den frühen Projektphasen. Denn mit dem Anstieg der inhaltlichen Integration müssen produktspezifischere Detaillösungen schon in der Ausführungsplanung erarbeitet und mehrere Gewerke in die Planung der Werksfertigung miteinbezogen werden.

Die räumliche Verknüpfung beschreibt die Dimensionalität der Bauteile in Bezug auf das fertige System. Wie im Zuge der Beschreibung von Element- und Modulbauweisen in Kapitel 2.1.5 erläutert, stellen linienförmige, eindimensionale Bauteile wie Stäbe, Elemente mit geringer räumlicher Verknüpfung dar. Durch die Steigerung der Dimensionalität einzelner Bauelemente oder der Zusammensetzung eines Systems aus Subsystemen, wie es beim Zusammenfügen von Wandscheiben und Deckenelementen geschieht, erhöht sich der räumliche Verknüpfungsgrad.<sup>68</sup>

Der industrielle Bauprozess fordert folglich eine Erhöhung des Planungsaufwandes in dem, abhängig vom Industrialisierungsgrad, inhaltlich und

<sup>67</sup> GIRMSCHIED, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 2.

<sup>68</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 21.

räumlich komplexere Systeme erzeugt werden können. Dies geschieht, wie in Kapitel 2.3 erläutert, zugunsten der zeitlichen und monetären Reduktion aller weiteren Phasen.

Im Zuge dieses verlängerten Planungsprozesses wird nun die Elementierung des Bauwerkes, in die oben beschriebenen Elemente und Systeme durchgeführt. Um die Kombinierbarkeit der einzelnen Elemente zu gewährleisten, ist die Planung gefordert umfangreiche Bausysteme zu entwickeln. Dies betrifft nicht nur Komponenten der einzelnen Subsysteme, wie Räume, sondern auch deren Summe, die das gesamte Bauwerk abbildet. Bei der Festlegung der Bausysteme kann im Wesentlichen zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterschieden werden. Geschlossene Systeme (Baukastensysteme) sehen für die Herstellung des Bausystems die Verwendung von Elementen eines einzigen Herstellers vor. Sie zeichnen sich durch vordefinierte Kombinierbarkeiten und präzise Lösungen aus, ermöglichen allerdings häufig nur eingeschränkte Gestaltungsfreiheit und lassen sich, wenn überhaupt, nur mit hohem Aufwand auswechseln. Offene Systeme erlauben Produkte verschiedener Hersteller sehr flexibel (mit Einschränkung beispielsweise durch die Maßordnung) zu kombinieren. Daraus entsteht die Notwendigkeit Schnittstellen und Detaillösungen, wie Fugen und Verbindungstechniken, zu beschreiben und zu entwickeln, wodurch ein zusätzlicher Planungsaufwand anfällt.<sup>69</sup>

Mit Hilfe sogenannter Maßlinien, werden Elemente und Module schon in der Planung in zwei-, oder dreidimensionalen Rastern positioniert. Dieses Vorgehen hilft bei der Elementierung des Bauwerkes, verdeutlicht Schnittstellen zwischen verschiedenen Bauweisen und Systemen in der Planung und dient als Grundlage für die Ausführung der Montage. Zur Umsetzung der Planung mittels Raster, bedient man sich bestimmter Abstände von Maßlinien, die auch als Grundmodul M bezeichnet werden. In Europa hat M eine standardisierte Größe von  $M=100\text{mm}$  ( $M:100\text{mm}$ ) etabliert. Die Einheit bildet die kleinste Darstellungsgröße und kann zur übersichtlicheren Gestaltung von Planunterlagen vergrößert werden. Für horizontale Koordinaten bedeutet das, dass das Grundmodul zum Multimodul wird und vorzugsweise auf die Werte 3M, 6M, 12M, oder ein Vielfaches dieser Werte, vergrößert werden kann. Für vertikale Koordinaten, beispielsweise für die Definition der Geschosshöhen, bedient man sich Werten zwischen 1M und 30M, wobei man sich auf den Oberflächenabstand bezieht.<sup>70</sup>

Raster können sowohl Basis für vorgefertigte Bauelemente als auch für Elemente des Innenausbaus und der technischen Gebäudeausrüstung

---

<sup>69</sup> Vgl. ROSENTHAL, M.; DÖRNHÖFER, A.; STAIB, G.: Elemente und Systeme – Modulares Bauen – Entwurf, Konstruktion, neue Technologien. Basel. De Gruyter, 2013, S.42f.

<sup>70</sup> Vgl. MORO, J., L.; ALIHODZIC, B.; ROTTER, M. et al.: Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail – Band 1 Grundlagen. Berlin. Springer Verlag, 2009, S. 58.

sein. Sie fixieren beispielsweise die Positionierung und Spannweiten der konstruktiven Haupt- und Nebenträger. Verschiedene Rasterungen können kombiniert werden, es ist allerdings sicherzustellen, dass die geometrische Grundordnung der Maßlinien erhalten bleibt.<sup>71</sup> Die nachstehende Abbildung 3 zeigt ein schematisches Achsraster in unbestimmtem Maßstab, bei dem Bauteilachsen mittig auf den Rasterlinien, ohne ihre wahren Bauteilstärken, positioniert werden.

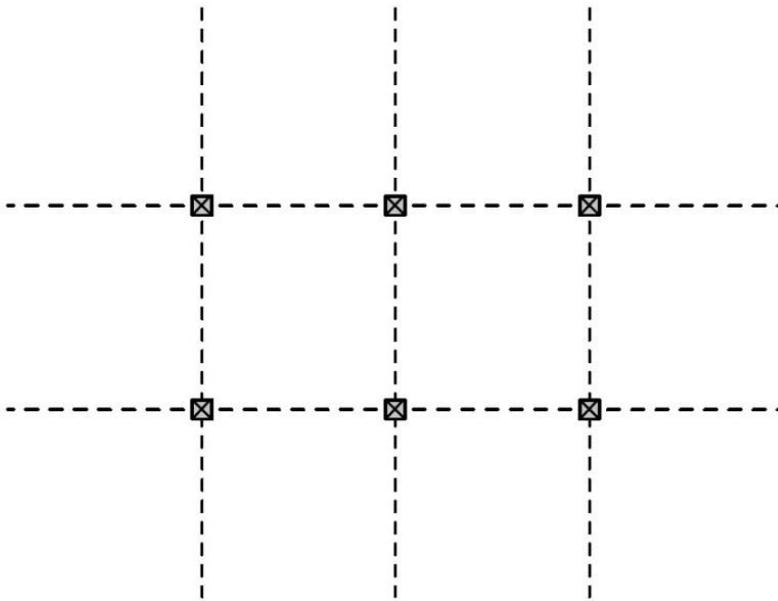


Abbildung 3: Systemdarstellung Achsraster<sup>72</sup>

Weiters stellt Abbildung 3 Maßlinien eines Grundrisses dar, die vorgeben, in welcher Ordnung Bauelemente positioniert werden können. Das Grundmodul *M* ist in dieser Abbildung 3 nicht näher definiert. Beispielhaft sind an den Kreuzungspunkten der Maßlinien Stützen eingezeichnet.

Ein weiteres Rasterystem ist das Bandraster, bei dem Elemente mit ihren echten Geometrien und Dimensionen abgebildet werden, um Schnittstellenprobleme und Berührungspunkte besser zu veranschaulichen. Das Rastermaß kann mit Hilfe von Lichten (Abständen zwischen Bauelementen) zwischen den Tragstrukturen abgebildet werden. Weitere Rasterarten, wie das Ausbauraster, das verschiedene Positionen von raumbegrenzenden Elementen zeigt, werden häufig bei komplexeren Bauvorhaben eingesetzt.<sup>73</sup>

<sup>71</sup> Vgl. HARTMANN, J.: Wiederkehr und Mehrdeutigkeit. Dissertation, Research. Berlin. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 255.

<sup>72</sup> ROSENTHAL, M.; DÖRNHÖFER, A.; STAIB, G.: Elemente und Systeme – Modulares Bauen – Entwurf, Konstruktion, neue Technologien. Basel. De Gruyter, 2013, S. 43.

<sup>73</sup> Vgl. ROSENTHAL, M.; DÖRNHÖFER, A.; STAIB, G.: Elemente und Systeme – Modulares Bauen – Entwurf, Konstruktion, neue Technologien. Basel. De Gruyter, 2013, S. 43f.

Der Einfluss der Elemente auf den Planungsprozess zeichnet sich durch gesteigerte Industrialisierung wie folgt ab. Durch die Steigerung des Industrialisierungsgrades in Form der Erhöhung der inhaltlichen Integration und dem räumlichen Verknüpfungsgrad der Bauelemente, sowie der Wahl des Bausystems ergibt sich ein erhöhter Aufwand in der Ausführungs- und Werksplanung. Detailliertere Schnittstellenbeschreibungen zwischen Elementen und zusätzliche Gewerke müssen dabei zugunsten einer reduzierten Bauzeit in den wesentlichen Teilen der Planung berücksichtigt werden.

#### **2.2.4 Ausgewählte Aspekte der Montage des industriellen Bauens**

Als wesentliches Charakteristikum des industriellen Bauens, verändert sich die Ausführungsphase des klassischen Bauprojekts zur Montage. In diesem Kapitel werden ausgewählte, bauwirtschaftlich relevante Themen der Montagephase, die Einfluss auf die Bauzeit und Kosten haben, beschrieben. Dabei wird zuerst auf den Transport der Elemente eingegangen, bevor einige Aspekte der Montage beschrieben werden. Abschließend werden Forderungen an das Konzept einer Fertigungslinie für Fertigteile formuliert.

Um den Transport vom Fertigungsort zur Baustelle und die Montage der Elemente zu ermöglichen, sind einige Vorbereitungsarbeiten auf der Baustelle durchzuführen. Die Herstellung der Baustelleneinrichtung, Aushub und Erdarbeiten, Einmessungen des Bauwerks, die Herstellung von Baustraßen, sowie die Erzeugung von Fundamenten gehen der Montage häufig voraus.<sup>74</sup>

Die Elemente, die im Zuge der Ausführung verbaut werden, werden durch Transporte zu einer bestimmten Zeit an einem definierten Einbauort zur Verfügung gestellt. Der Transport der Elemente stellt das Bindeglied zwischen der Produktionsfertigung und der Montage dar. Er umfasst dabei alle Bewegungen, die mit einem Element durchgeführt werden. Hierbei handelt es sich in erster Linie um die Lieferung der Produkte vom Fertigungsort zur Baustelle und den Transport des Elements zum Einbauort.

Einen möglichen Zwischenschritt stellt das Verladen des Ladeguts in Zwischenlager auf der Baustelle dar. In diesen können Elemente von Lieferfahrzeugen aus dem Fertigungswerk zwischengelagert werden, bevor diese von Transportmitteln in den Einbauort eingehoben werden.

Gekennzeichnet ist der Transport durch den Einsatz leistungsfähiger Transport- und Hebezeuge. Diese müssen ein sicheres und schnelles

---

<sup>74</sup> Vgl. BAUER, H.: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S. 422.

Transportieren, sowie ein ruckfreies Heben der Last gestatten. Wesentliche Stellgrößen seiner logistischen Planung stellen unter anderem die folgenden Punkte dar:<sup>75</sup>

- Anzahl der Transportakte
- Transportmittelwahl
- Entlade-, Belade- und Wartezeiten

Besonders relevant für die Fertigung von Betonbauelementen sind zulässige Straßentransportabmessungen. Diese limitieren die teils großformatigen Abmessungen der Elemente auf 2,55 m in der Breite und 3,60 m (bei einer zulässigen Fahrzeuggesamthöhe von 4,00 m) in der Höhe. Dabei darf das Fahrzeug samt überstehender Last eine Gesamtlänge von 20,75 m nicht überschreiten. Auch das maximal zulässige Gesamtgewicht für Fahrzeug und Ladung ist, selbstverständlich in Abhängigkeit des Transportfahrzeugs, auf 38 t bei mehrachsigen Gelenkkraftfahrzeugen beschränkt. Für größere Abmessungen wird eine Sondergenehmigung nach § 29 Abs. 3 StVO benötigt.<sup>76</sup>

Befinden sich die benötigten Elemente zur richtigen Zeit auf der Baustelle, werden diese in ihre Endposition eingehoben. Dazu kommen verschiedene Transportmittel, wie Turmdreh- und Autokräne, zum Einsatz. Kräne und Krankapazitäten sind so zu wählen, dass von den gewählten Positionierungsplätzen alle notwendigen Bereiche, wie Lager und Einbauorte, gefahrlos und ohne Versetzen des Gerätes durchgeführt werden können. Neben maximaler Ausladung und größter Hakenhöhe als Kenngrößen für den Arbeitsbereich eines Kranes, wird die Leistungsfähigkeit durch das maximale Lastmoment bezeichnet. Die Auswahl des richtigen Hebezeuges entscheidet über den störungsfreien Ablauf der Montage. Besonders zu berücksichtigen ist die Tatsache, dass schwerere Bauteile leistungsfähigere Transportmittel fordern. Da vor allem Kräne einen hohen Anteil an den Kosten der Montagephase haben, begünstigen leichte Bauteile leistungsschwächere und somit günstigere Transportmittel.<sup>77</sup>

Die Montage bezeichnet verschiedene Prozesse zum Zusammenbau der Elemente zum fertigen Bauwerk. Diese Prozesse beinhalten unter anderem Tätigkeiten, wie das Justieren, das Zusammenfügen und das Prüfen der Bauteile, die für alle Fertigteiltypen beschrieben werden.<sup>78</sup> Jedem Fertigteiltyp liegt eine sogenannte Montageanweisung, die Informationen zum

<sup>75</sup> Vgl. *GIRMSCHIED, G.*: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 74 [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

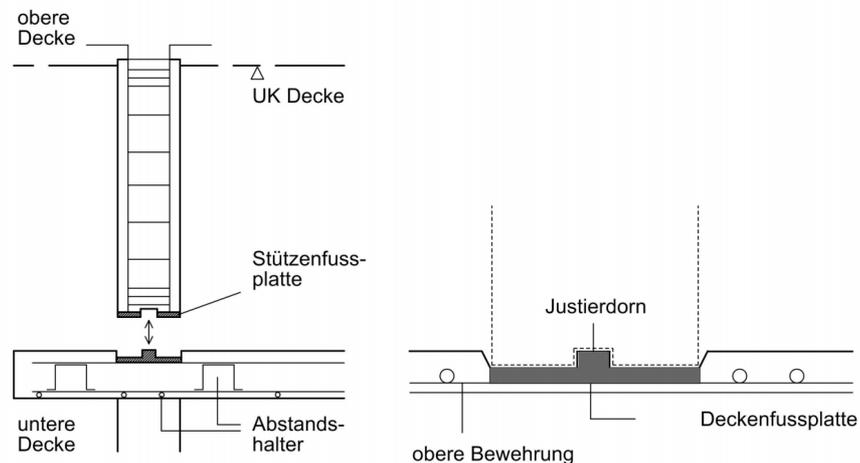
<sup>76</sup> Vgl. *BACHMANN, H.; STEINLE, A.; HAHN, V.*: Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau, Bauingenieur-Praxis. Berlin. Ernst, Wilhelm & Sohn, 2012, K. 2.1.3.

<sup>77</sup> Vgl. *BAUER, H.*: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S. 411.

<sup>78</sup> Vgl. *LOTTER, B.; WIENDAHL, H.P.*: Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis; mit 16 Tabellen. Berlin. Springer Verlag, 2006, S. 2.

sicheren Verbau von Elementen aus dem Montageplan beinhaltet, zugrunde. Zur Sicherstellung des logistischen Ablaufes werden Baupläne, sowie Transport- und Montageabfolgen in den Montageplänen beschrieben. Die horizontale und vertikale Montage der Elemente hat genau nach diesem Montageplan, unter Beachtung der Montageanweisungen, zu erfolgen.<sup>79</sup> Darin werden beispielsweise Transporttypen und Transportmittel, sowie die Art des Anschlagens an die Transportmittel beschrieben. Des Weiteren wird festgelegt, wie Elemente am Einbauort zu positionieren, abzustützen, zu befestigen und mit anderen Bauteilen zu verbinden sind. Beispiele zur endgültigen Sicherung von Bauelementen am Einbauort sind Verschraubungen, Verschweißungen oder der formschlüssige Verguss.<sup>80</sup>

Bei der Positionierung der einzelnen Elemente spielt der Einsatz von Justierhilfen und einfachen Verbindungsmöglichkeiten eine wichtige Rolle. Sie ermöglichen eine schnelle, genaue und sichere Positionierung der Elemente bei kurzen Hakenzeiten, die letztlich der Bauzeitreduzierung dienen.<sup>81</sup> Besonders schnell lassen sich Justierungen mit längenregulierbaren Justierstützen und Schraubenbolzen vornehmen, die vor der Montage der Elemente auf Sollhöhe gebracht werden. Sie sind unter Zug- und Druckkräften einsetzbar und dienen der Positionierung von Stützen-, Wand- und Fassadenelementen im Montagevorgang. Auch der in der nachstehenden Abbildung 4 dargestellte Justierdorn mit Stützfußplatten ist ein effektives und effizientes Mittel zur zügigen Montage.



**Abbildung 4: Einbau einer Fertigteilstütze mittels Justierdorn und Stützfußplatte<sup>82</sup>**

<sup>79</sup> Vgl. FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J.D.; BERGMEISTER, K.: Beton Kalender 2016 – Beton im Hochbau, Silos und Behälter. In: 105.2016, Beton-Kalender. Berlin. Ernst & Sohn, 2016, S. 143f.

<sup>80</sup> Vgl. BAUER, H.: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S.423.

<sup>81</sup> S. 243 HOFSTADLER, C.; MARIUS, R.; KUMMER, M.: Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. Wiesbaden. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, Vgl.

<sup>82</sup> Vgl. JEHLE, P.; MICHAILENKO, N.; SEYFFERT, S. et al.: IntelliBau 2 – Schriften zur Bauverfahrenstechnik. Berlin. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 25.

Bei der Justierung mittels Justierdorn wird ein Element, das eine Stützfußplatte mit Aussparung aufweist, auf einen Justierdorn gestellt. Dabei kann der Justierdorn positioniert werden, bevor das Gewicht des Elements aufgesetzt wird. Die weitere Lagesicherung und Ausrichtung kann dann leicht und sicher, beispielsweise mittels Richtstützen und Montagestreben, durchgeführt werden. Danach kann das finale Zusammenfügen, zum Beispiel durch das Vergießen mittels Zementmörtel oder Beton, durchgeführt werden. Soweit Fertigteile demontierbar sein sollen, sind die Befestigungen und Verbindungen ohne Verguss aus nichtrostendem Material auszuführen.<sup>83</sup>

Die sich aus dem Transport und der Montage ergebenden Kosten haben einen wesentlichen Anteil an den Gesamtkosten der Fertigteile. Dabei verweisen Experten darauf, dass sich die Vorteile der günstigeren Produktionskosten der Fertigteile in der Praxis durch einen erhöhten logistischen Aufwand reduzieren.<sup>84</sup> Deshalb ist schon in der Konzeptionierung einer Fertigungslinie darauf zu achten, dass die Erzeugnisse transport- und montagebedingten Randbedingungen entsprechen. Diese umfassen, neben den Prinzipien und Charakteristika des industriellen Bauens, die Forderung nach leichten, transport- und verladefähigen Bauelementen, die durch einfache Montagesysteme verbaut und ihrer Funktion als Teil des Bauwerks gerecht werden können. So können weitere kosten- und bauzeitreduzierende Vorteile genutzt werden.

Die Charakteristika und Prinzipien des industriellen Bauens fordern, unter anderem aufgrund der beschriebenen Anforderungen an die Industrialisierung des Bauens, dass der Planungs- und Fertigungsprozess des Bauablaufes adaptiert wird.<sup>85</sup> Auf die Zusammenhänge der industriellen Planung und Fertigung, sowie auf deren Auswirkungen auf gängige Bauabläufe wird im nächsten Kapitel eingegangen.

### **2.3 Auswirkungen des industriellen Bauens auf den Planungs- und Ausführungsablauf**

In diesem Kapitel werden die Zusammenhänge und Schnittstellen zwischen Planung, Fertigung und Montage beschrieben. Dazu wird darauf eingegangen, welche Maßnahmen auf Planungs- und Fertigungsseite beitragen, den Bauprozess industriell zu gestalten. Des Weiteren wird dargestellt, wie sich die beiden Phasen in den gesamten Bauablauf einfügen. Dazu werden Unterschiede zur konventionellen Planung und zur Synchronplanung erläutert.

<sup>83</sup> Vgl. *BAUER, H.*: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S. 411.

<sup>84</sup> *HOFSTADLER, C.*: Schularbeiten – Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation, VDI-Buch. Berlin. Springer Verlag, 2008, S. 21.

<sup>85</sup> Vgl. *GIRMSCHIED, G.*: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 9.

In der nachstehenden Abbildung 5 wird auf die Zusammenhänge der Planung, der Fertigung und der Montage eingegangen. Dabei wird gezeigt, welche Teilschritte im industriellen Bauprozess erbracht werden, um vom Entwurf des Gebäudes über die Produktion der Elemente, zur Montage auf der Baustelle zu kommen. Ausgegangen wird von einer integralen, konventionellen Planung.

Als zentrale Basis der Abhandlung des industriellen Bauprozesses dient das virtuelle Gebäudemodell. Es basiert auf dem Vorentwurf der Fachplaner, wird im Zuge der Vorbereitung der Werksfertigung erzeugt und stellt das gesamte Bauwerk in herstell- und verarbeitbaren Elementen und Systemen dar. Ähnlich dem klassischen Bauprojekt wird eine breite Wissensbasis zu konstruktiven, bauphysikalischen und gestalterischen Aspekten abverlangt. Über dieses Wissen hinaus ist es notwendig, über weiterführende Kenntnisse in Fertigungsbereichen, wie standardisierten Bauelementen und Bausystemen zu verfügen. Durch dieses Wissen kann das Gebäudemodell geplant und mit Daten der Produktion beschrieben werden.<sup>86</sup> Diese Zusammenhänge werden in der nachstehenden Abbildung 5 durch die in das virtuelle Modell einlaufenden Pfeile dargestellt. Im Zuge der Planung des virtuellen Gebäudemodells ist ein geeignetes Bausystem zur Bauwerkserstellung (wie beispielsweise Stütz-, Wandtafel-, Deckensysteme) auszuwählen. Dabei bietet es sich an, eine möglichst große Stückzahl an gleichen Elementen unter Bedacht der höchst zulässigen Abmessungen und dem maximalen Gewicht (Transport und Hebe-/Verladevorgänge) festzulegen. Auch die Detailierung der Element- und Systemschnittstellen, sowie die genaue Definition der Befestigungs- und Verbindungsarten ist im Zuge der Planung des virtuellen Gebäudemodells zu beschreiben.<sup>87</sup>

Auf Basis des in Abbildung 38 dargestellten virtuellen Modells können nun sowohl Angebote erstellt und geprüft als auch fertigungsrelevante Informationen ausgegeben werden. Wie der nachstehenden, schematischen Abbildung 5 zu entnehmen, zählen hierzu Stücklisten von Elementen und Modulen, Geometrien zur CNC-Verarbeitung von Bauteilen, sowie Produktionspläne, -listen und Montagepläne. Sofern eine Baustellenproduktion (Feldfabrik) vorgesehen ist, werden auch detaillierte Bauteilzeichnungen ausgegeben anhand derer Arbeitsvorbereitungen vorgenommen werden können. Produktionspläne und -listen geben Auskunft über herzustellende Erzeugnisse, während Stücklisten zur Materialbestellung für die Feldfabrik und die Montage herangezogen werden. Als problematisch wird das Fehlen durchgängiger Schnittstellen über alle Planungsebenen und

---

<sup>86</sup> Vgl. *KESSEL, M.; HOFFMEISTER, W.*: Ökologische Herstellung von Holzhausern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse, [http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische\\_Herstellung\\_von\\_Holzhausern.pdf](http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische_Herstellung_von_Holzhausern.pdf), S. 20 [Datum des Zugriffs: 09.01.2020].

<sup>87</sup> Vgl. *BAUER, H.*: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S. 421.

Projektphasen angesehen.<sup>88</sup> Die bestellten, produzierten und verarbeiteten Produkte werden anschließend auf die Baustelle transportiert und dort montiert. Dabei unterstützt das virtuelle Modell den Montageprozess durch das Bereitstellen von Montageplänen und hilft bei Soll-Ist-Vergleichen.<sup>89</sup>

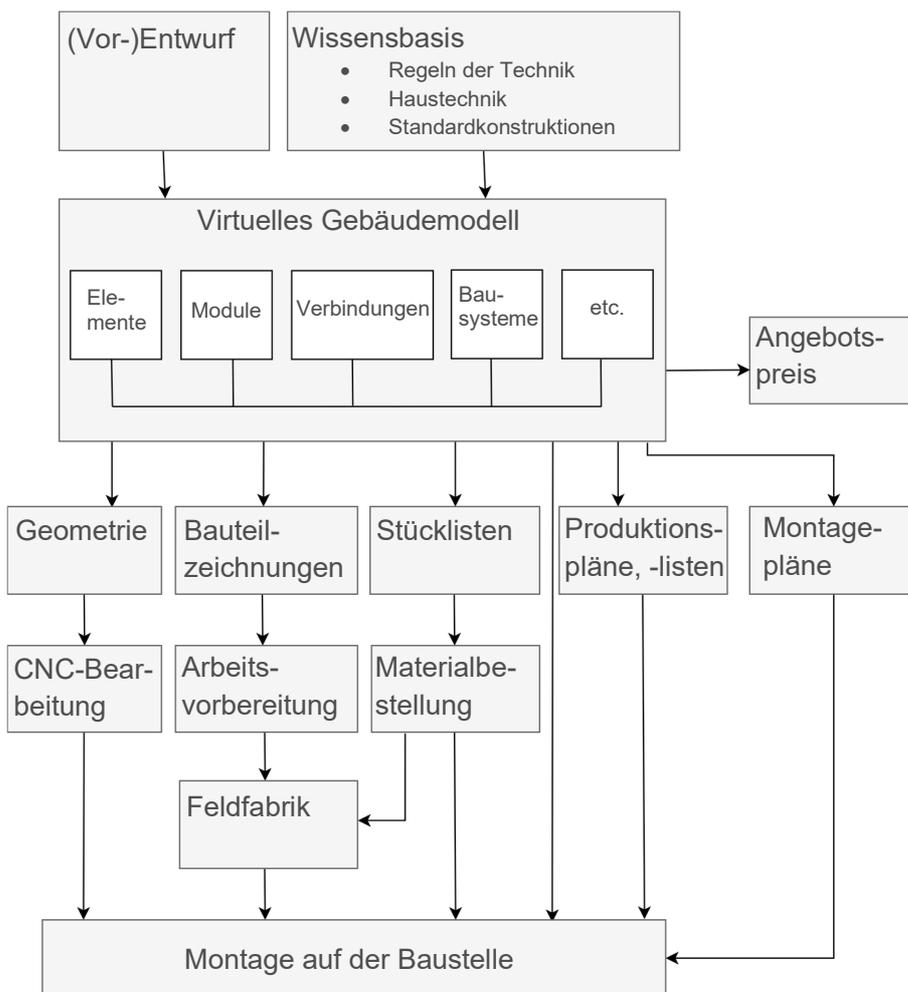


Abbildung 5: Planung und Fertigung von industriell produzierten Holzhäusern<sup>90</sup>

Im Vorfeld der Produktion und der Montage besteht die Möglichkeit, Simulationen auf Basis des virtuellen Modells durchzuführen. Im Falle der Produktion, vor allem bei Auftragsparallelisierung oder der Kombination manueller und automatisierter Fertigungen, können Kollisionen identifiziert

<sup>88</sup> Vgl. KESSEL, M.; HOFFMEISTER, W.: Ökologische Herstellung von Holzhaeusern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse, [http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische\\_Herstellung\\_von\\_Holzhaeusern.pdf](http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische_Herstellung_von_Holzhaeusern.pdf), S. 20 [Datum des Zugriffs: 09.01.2020].

<sup>89</sup> Vgl. KESSEL, M.; HOFFMEISTER, W.: Ökologische Herstellung von Holzhaeusern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse, [http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische\\_Herstellung\\_von\\_Holzhaeusern.pdf](http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische_Herstellung_von_Holzhaeusern.pdf), S. 21ff [Datum des Zugriffs: 09.01.2020].

<sup>90</sup> Vgl. KESSEL, M.; HOFFMEISTER, W.: Ökologische Herstellung von Holzhaeusern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse, [http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische\\_Herstellung\\_von\\_Holzhaeusern.pdf](http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische_Herstellung_von_Holzhaeusern.pdf), S. 21 [Datum des Zugriffs: 09.01.2020].

und die Ressourcenplanung verbessert werden. Weiters können auch Kennzahlen erhoben werden, die der operativen Produktionsplanung und bei logistischen Aspekten der Montagephase auf der Baustelle helfen. Der Materialfluss, sowie weitere input- und outputbezogene Informationen schaffen beispielsweise Grundlagen für eine präzisere Lagerhaltung innerhalb der Produktion und unterstützen bei industriellen Methoden, wie der Just-In-Time Produktion. Ähnliche Vorteile ermöglichen Simulationen des Montageprozesses.

Da die Zusammenhänge zwischen der Planung und der Fertigung erläutert wurden, können diese nun im industriellen Bauablauf dargestellt werden. Dazu wird beschrieben, wie gängige Bauabläufe in der konventionellen Planung und der Synchronplanung gestaltet sein können. Gleichzeitig wird darauf eingegangen, wie sich der industrielle Bauprozess von diesen unterscheidet.

Industrielle Bauabläufe sehen die Trennung von Produktion der Bauelemente und ihrer Montage vor. Dieses Vorgehen erfordert, zumindest im Vergleich zum traditionellen Planungsprozess (ohne BIM), allerdings zusätzlich Planungsmaßnahmen, die in der sogenannten Werkstattplanung Ausdruck finden. Sie wird im industriellen Bauprozess zentraler Bestandteil der Planung aufgrund ihrer Brückenfunktion zwischen Ausführungsplanung und Fertigung, wobei vordefinierte Bauteilkataloge helfen, den Mehraufwand geringer zu halten. Durch diesen erhöhten Planungsaufwand in den ersten Phasen des Projektes, kann ein wesentlicher Mehrwert für alle weiteren Phasen, besonders aber für die Ausführung des Bauwerkes generiert werden. Nachstehend sind schematische Phasen, nämlich Planung, Ausführungsplanung, Ausschreibung, Vergabezeitraum und Ausführung, sowie die jeweiligen Dauern eines industriellen Holzbauprojektes abgebildet. Die Bezeichnung M steht dabei für die gerundete Anzahl an Monaten, die die jeweilige Phase in Anspruch genommen hat. Dargestellt werden einmal ein klassischer Bauablauf in Abbildung 6 und einmal ein industrialisierter Bauablauf in Abbildung 7. Wie aus diesen beiden Abbildungen ersichtlich, ergänzt eine zusätzliche Planungsphase den industriellen Bauablauf, wodurch die komplexe Ausführungsphase der Abbildung 6, durch eine sehr kurze Montagephase ausgetauscht werden kann.<sup>91</sup>

Abbildung 6 stellt den klassischen Bauablauf entlang einer eindimensionalen Zeitachse dar. Nach erfolgtem Projektstart wird zuallererst die Planung, die sich in die Vor-, Entwurfs- und die Genehmigungsplanung unterteilen kann, durchgeführt. Anschließend starten die Ausführungsplanung und Vergabe. In Abbildung 6 ist die sogenannte konventionelle Planung dargestellt, bei der zuerst die Planung und nach deren Ende die Ausführung in Form einer Ende-Anfang-Beziehung durchgeführt wird. Im

---

<sup>91</sup> BLOEMKE, M.; BOENERT, L.: Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft. In: Bauingenieur 80, H6/2003 S227-283.

Zuge der Planung werden alle Ausführungsleistungen genau bestimmt und vertraglich mit den ausführenden Unternehmen vor Leistungsbeginn vereinbart. Als sehr positiv wird bei diesem Vorgehen erachtet, dass die Trennung von Planung, Vergabe und Ausführung einen objektiven Preiswettbewerb gewährleisten kann. Kritik wird am hohen Zeitbedarf und der fehlenden Flexibilität geübt. Durch das nicht Miteinbeziehen von ausführenden Unternehmen tauchen fachspezifische Fragen und Erkenntnisse gegebenenfalls erst spät (während der eigentlichen Ausführung) auf.<sup>92</sup>

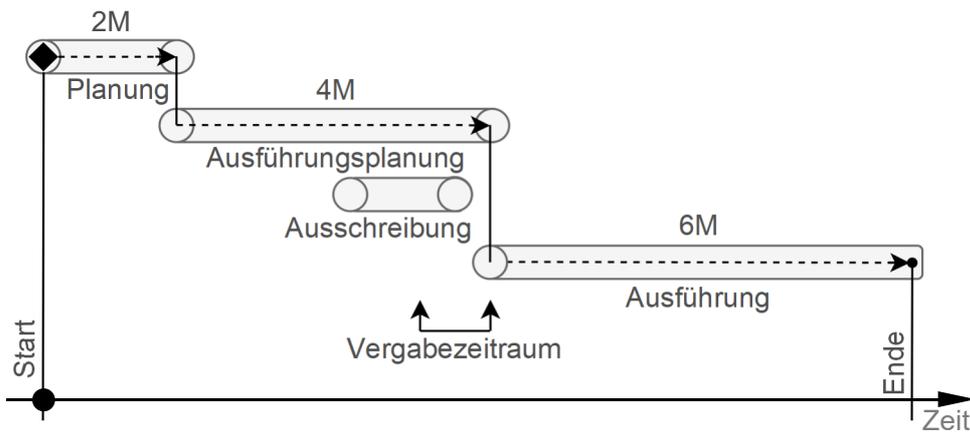


Abbildung 6: Bauphasen eines konventionellen Holzbauprojektes<sup>93</sup>

Im deutsch-, österreichischen Raum sehr gebräuchlich ist die Synchronplanung, die in Folge zeitlicher Forcierungsmaßnahmen Einzug in den heimischen Bauprozess gefunden hat und den konventionellen Bauablauf abändert. Wesentliches Merkmal ist, dass sich einzelne Phasen im Projektverlauf, hauptsächlich um Zeiteinsparungen zu ermöglichen, überlappen können. Dabei werden Ausführungsleistungen nicht gänzlich durchgeplant, sondern nur als Vorbereitung für die Vergabe definiert. Alle weiteren Planungsaktivitäten werden in den folgenden Projektphasen durchgeführt.<sup>94</sup> Vorteile ergeben sich vor allem in Bezug auf die Planungszeit und die Flexibilität, denn ausführende Unternehmen können so leichter in die Ausführungsplanung miteinbezogen werden. Als nachteilig hat sich vor allem die fehlende exakte Definition der Arbeitsleistungen herausgestellt.<sup>95</sup> Auch der zunehmende Kommunikations- und der zeitgerechte Koordinationsaufwand zwischen Projektsteuerung, Planern und Ausfüh-

<sup>92</sup> Vgl. GREINER, P.; MAYER, P., E.; STARK, K.: Baubetriebslehre - Projektmanagement – Wie Bauprojekte erfolgreich gesteuert werden. Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag, 2005, S. 12.

<sup>93</sup> ROTH, C.; ROZYNSKI, D.; KOCH, P. et al.: Vom industrialisierten Einfamilienhaus zum verdichteten Wohnungsbau. Fraunhofer IRB Verlag, 2009, S.68.

<sup>94</sup> Vgl. KÖCHENDÖRFER, B.; LIEBCHEN, J.H.; VIERING, M.G.: Bau-Projekt-Management – Grundlagen und Vorgehensweisen, Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft. Berlin. Springer Vieweg, 2018, S. 113.

<sup>95</sup> Vgl. GREINER, P.; MAYER, P., E.; STARK, K.: Baubetriebslehre-Projektmanagement, Viewegs Fachbücher der Technik. Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag, 2002, S.14f.

Unternehmen steigt markant. Als Resultat entstehen neben Spekulationsmöglichkeiten auch Unsicherheiten, die negative Auswirkungen auf Baukosten und Bauzeit haben können.

Die nachstehende Abbildung 7 beschreibt vereinfacht, wie der Bauablauf unter der Bedingung eines industriellen Bauverfahrens mit vorgefertigten Produkten ablaufen kann. Es handelt sich um dasselbe Holzbauprojekt, das in Abbildung 6 mittels konventioneller Planung dargestellt wurde. Ähnlich der Fertigungsproduktionen anderer Branchen und im Gegensatz zur gängigen Synchronplanung, geschieht die gesamte Ausführungs- und Werkstattplanung<sup>96</sup>, vor der Beauftragung, um Klarheit über die Faktoren Kosten, Zeit und Qualität zu erhalten. Nun folgt einer gleich langen Planungsdauer eine kürzere Ausführungsplanung, die durch die Werksplanung ergänzt wird. In Anbetracht der zeitlichen Vorteile, die sich in der Ausführungsphase ergeben, hält sich der planerische Mehraufwand in Grenzen. Vergleicht man die dargestellten Phasen miteinander, zeichnet sich in Summe eine Zeitersparnis und dadurch auch eine wesentliche Reduktion der Vorhaltekosten ab. Diese Ersparnis für das<sup>97</sup>

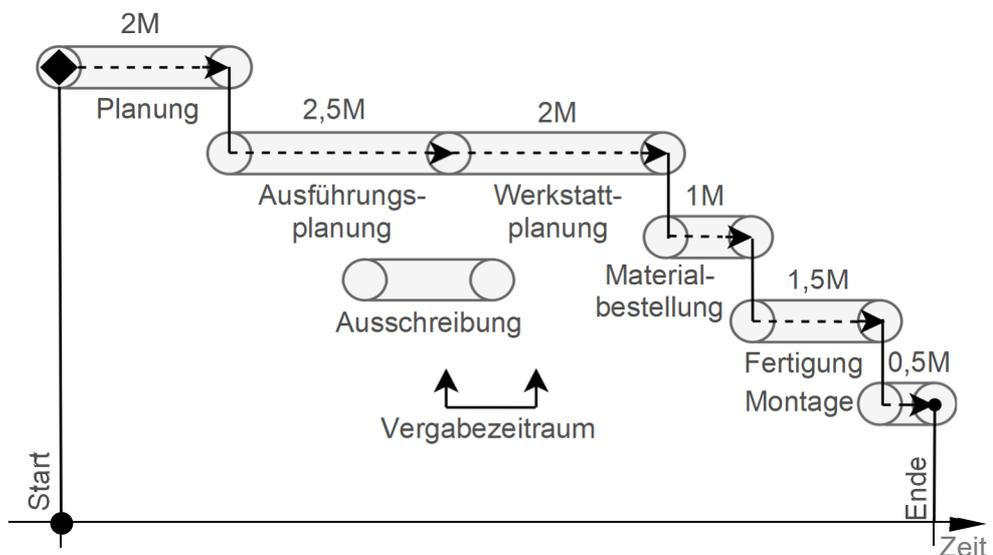


Abbildung 7: Bauphasen eines industriellen Holzbauprojektes<sup>98</sup>

Experten betonen, dass im Zuge der industriellen Bauwerkserzeugung sehr früh Entscheidungen zu Bauverfahren, Bauweisen und Produkten getroffen werden müssen, die sich auf den späteren Lebenszyklus des

<sup>96</sup> Die Werkstattplanung als Teil der Bauplanung ist wesentliche Grundlage für die Herstellung von Bauteilen und Bauelementen in der stationären Vorfertigung. Sie baut auf die Ausführungsplanung des Architekten auf.

<sup>97</sup> Vgl. KESSEL, M.; HOFFMEISTER, W.: Ökologische Herstellung von Holzhausern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse, [http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische\\_Herstellung\\_von\\_Holzhausern.pdf](http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische_Herstellung_von_Holzhausern.pdf), S. 81 [Datum des Zugriffs: 09.01.2020].

<sup>98</sup> ROTH, C.; ROZYNSKI, D.; KOCH, P. et al.: Vom industrialisierten Einfamilienhaus zum verdichteten Wohnungsbau. Fraunhofer IRB Verlag, 2009, S. 68.

Bauwerks auswirken. Diese Entscheidungen haben nicht nur konstruktive, funktionale und gestalterische Einflüsse, sondern wirken sich auch auf die zu erwartenden Kosten der Bauwerkserzeugung aus. Mit voranschreitendem Projektverlauf sinkt dadurch die Beeinflussbarkeit der Kosten und Änderungen werden teurer. Vor allem nach vollendeter Werksplanung können Umplanungen nicht mehr kurzfristig umgesetzt werden, sondern bedürfen einer längeren Vorlaufzeit (wegen der Produktionsplanung).<sup>99</sup> Mitunter deshalb, orientiert sich der industrielle Bauablauf an der konventionellen Planung.

Durch die Beschreibung wie Planung, Fertigung und Montage im Kontext des Bauablaufes zusammenwirken, wird veranschaulicht, wie sich die industrielle Fertigung von Bauteilen in den industriellen Bauprozess eingliedert. Abbildung 7 veranschaulicht dabei, dass Elemente im Zuge der Vorfertigung produziert und durch CNC Maschinen verarbeitet werden können. Für die in Kapitel 4 berechnete Fertigungslinie einer Betonfertigteilherstellung und -verarbeitung ist von Relevanz, dass Fertigungsproduktionen von industriellen Bauprozessen erst nach der Kundenbeauftragung stattfinden. Durch die vollendete Ausführungsplanung muss sowohl in der Werksplanung als auch in der Konzeptionierung und Kalkulation der Fertigungslinie, auf weniger Änderungen von in der Produktion befindlichen Elementen eingegangen werden.

## 2.4 Vor- und Nachteile des industriellen Bauprozesses

Sowohl Unternehmen als auch Branchenkundige sehen im industriellen Bauen großes Potential. In diesem Kapitel wird deshalb auf die Vor- und Nachteile eines industriell gestalteten Bauprozesses eingegangen. Dazu werden unter anderem Forderungen aus klassischen Bauprozessen beschrieben, als auch Potentiale, die sich aus dem Kostentrichter ergeben. Danach wird mit Hilfe der industriellen Prinzipien und Anforderungen erläutert, welche Vor- und Nachteile durch den industriellen Bauprozess mittels vorgefertigter Bauelemente entstehen. Dies dient der Abschätzung von Auswirkungen einer Fertigungsproduktion auf den Bauablauf.

Die Baustelle als zeitlich begrenzter und von vielen Faktoren beeinflusster Produktionsort, der projektbezogener Veränderung unterliegt, fordert innerhalb jedes neuen Herstellungsprozesses die Einrichtung einer Aufbau- und Ablauforganisation, Regeln der Kommunikation und Informationsweitergabe und geänderten Randbedingungen. Die zeitliche und umfangbezogene Trägheit dieser Systeme, vor allem bei hoher Komplexität und vielen Baubeteiligten, stellt eine große Herausforderung dar.<sup>100</sup>

<sup>99</sup> HOFSTADLER, C.: Schularbeiten – Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation, VDI-Buch. Berlin. Springer Verlag, 2008, S. 21.

<sup>100</sup> Vgl. KORDOWICH, P.: Betriebliche Kommunikationsprozesse bei Dienstleistern – Herausforderungen für Organisation und IT durch Kundenorientierung. Dissertation. Hohenheim, 2010, S. 127f.

Das Einsparungspotential in klassischen Bauprojekten, nachstehend am Beispiel des Wohnungsbaus erläutert, kann erkannt werden, wenn man die Kostenstruktur näher betrachtet. Häufig zeigt sie, dass der Anteil der Baukosten, also Kosten für Aufschließung, für das Bauwerk selbst (bestehend aus Rohbau, Technik und Ausbau), sowie für die Einrichtung und die Herstellung der Außenanlagen, an den Gesamtkosten Werte von 55% erreichen, oder sogar überschreiten kann.<sup>101</sup> Eine Studie des Bundesverbands der Deutschen Beton- und Fertigteilindustrie hat die Kostenstruktur im deutschen Wohnungsbau anhand einer repräsentativen Menge an Projekten erhoben. Die Bezifferung der produktionstechnisch bedingten Kosten aus Löhnen, Geräten und dem Bauverfahren belaufen sich dabei auf rund 50% der gesamten Baukosten.<sup>102</sup> Es ist ersichtlich, dass einen hohen Anteil an den Gesamtkosten, die Baukosten darstellen. Diese wiederum sind stark von den Faktoren Mensch, Bauverfahren und Betriebsmittel geprägt. Diverse weitere Erhebungen für im Hochbau durchgeführte Studien renommierter Fachkundiger bewerten den Anteil der nicht wertschöpfenden Teil der Arbeitszeit auf 60-70%<sup>103</sup>. Daraus entsteht nicht nur großes Einsparungspotential, sondern auch die Notwendigkeit Maßnahmen zu Effizienzsteigerungen, zum Beispiel durch Industrialisierung des Bauprozesses, zu setzen. In der Literatur werden bauverfahrensunabhängig folgende Klassifizierungen von Potentialen genannt, die in Bezug zum genannten Kostenblock stehen:<sup>104</sup>

- Steigerung der Effizienz der Herstellungsabläufe und- verfahren
- Eliminierung/Reduktion von Schlechtwetterstunden
- Eliminierung/Reduktion wetterbedingter Leistungsschwankungen
- Effizienzsteigerung durch klare Workflowprozesse
- Eliminierung/Reduktion der Materialsuchstunden
- Eliminierung/Reduktion von Materialumstapelungen
- Reduzierung von Materialverlusten

Weitere Potentiale entstehen im Bereich der Kostensicherheit. Unter anderem durch die in der *ÖNORM B1801-1:2015*<sup>105</sup> geforderten Projekt- und Leistungsphasen und den Ergänzungen der Detaillierungsgraden und Detailschärfen der Planung, ergeben sich beim klassischen Bauprojekt Unsicherheiten in Bezug auf die Kostenfeststellung. Diese Unsicherheiten umfassen, entsprechend der nachstehenden Abbildung 8, nach der Vergabe

---

<sup>101</sup> Vgl. PAULITSCH, K.S.: ZUM LEISTBAREN WOHNRAUM – Material- und Kostenrelevanz, <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=59bef516aba3c&location=browse>, 2017, S. 251ff [Datum des Zugriffs: 23.01.2020].

<sup>102</sup> Vgl. BUNDESVERBAND DEUTSCHE BETON- UND FERTIGTEILINDUSTRIE: Beton und Fertigteil-Jahrbuch, p. 8, [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-33612-5\\_8.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-33612-5_8.pdf) [Datum des Zugriffs: 23.01.2020].

<sup>103</sup> Zusammengesetzt aus den Faktoren: Transporte, Wege, Materialsuche, Aufräumen u. Umräumen, störungsbedingte Unterbrechungen, persönlich bedingte Unterbrechungen und Abwesenheit

<sup>104</sup> GIRMSCHIED, G.: Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Berlin. Springer Verlag, 2014, S. 3.

<sup>105</sup> Vgl. ÖSTERREICHISCHES NORMUNGsinstitut: ÖNORM B 1801-1:2015 Bauprojekt- und Objektmanagement Teil 1: Objekterrichtung. ÖNORM. S. 1f.

immer noch einen Schwankungsbereich von  $\pm 10\%$  nach deutscher Judikatur.

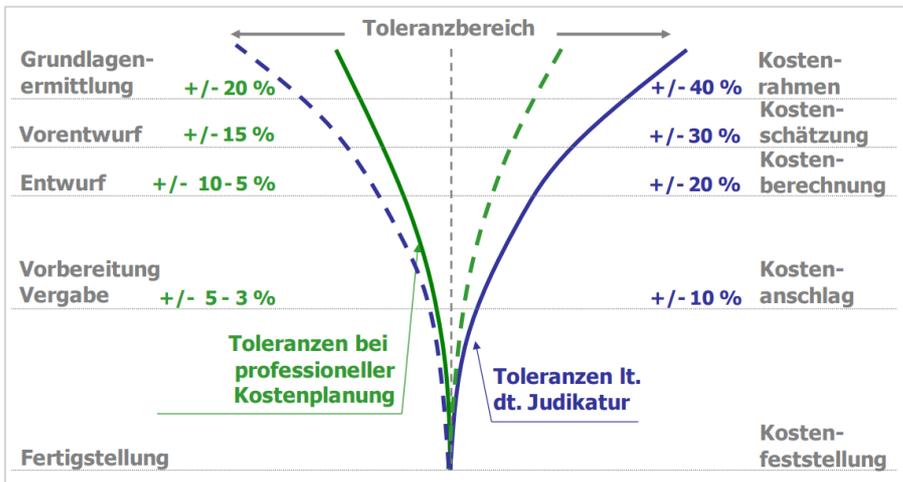


Abbildung 8: Kostentrichter<sup>106</sup>

Potentiale aus dem Kostentrichter ergeben sich aufgrund des im vorherigen Kapitel beschriebenen Bauablaufs. Die industrielle Fertigung erfordert nämlich nicht nur eine gänzlich abgeschlossene Planung mit genau definierten Produkten, sondern bietet auch die Möglichkeit, dass konkrete Informationen von Bauteilerzeugern zu Produktionsdauern, Lieferterminen und Preisen erhoben werden können. So kann schon mit dem Abschluss der Werksplanung eine wesentlich genauere Kostenberechnung erfolgen.

Des Weiteren ergeben sich Potentiale aus dem steigenden Bedarf an günstigen, individuellen Gebäuden. Dies ist längst durch zahlreiche Statistiken belegt. In Österreich beispielsweise stieg die Anzahl an fertiggestellten Wohnungen (ohne An-, Auf und Umbautätigkeiten) und Gebäuden in den vergangenen 3 Jahren zwischen 6,5% und 7,6%.<sup>107</sup> Auch in Deutschland zeichnet sich ein ähnlicher Trend ab. Verschiedene Bedarfprognosen gehen davon aus, dass jährlich 185.000 bis 400.000 neue Wohneinheiten benötigt werden könnten. Berücksichtigt man die steigenden Baukosten (vor allem im Wohnungsbau)<sup>108</sup> zeichnet sich der Handlungsbedarf ab, denn qualitatives, leistbares und menschenfreundliches Bauen wird wichtiger.<sup>109</sup> Dazu wird in den nachstehenden Kapiteln auf die Auswirkungen der industriellen Bauweise durch Vorfertigung im Werk eingegangen.

<sup>106</sup> Vgl. MAUERHOFER, G.: Bauprojektmanagement 2. Skriptum., 2017, S. 35.

<sup>107</sup> Vgl. STATISTIK AUSTRIA: Wohnungs- und Gebäudeerrichtung, Fertigstellungen, [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/menschen\\_und\\_gesellschaft/wohnen/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/wohnen/index.html) [Datum des Zugriffs: 20.01.2020].

<sup>108</sup> Vgl. MICHAEL, F.: Der Handwerker-Effekt macht Bauen fast unbezahlbar, <https://www.welt.de/finanzen/immobilien/article175288013/Baukosten-Anstieg-um-vier-Prozent-seit-Februar-2017.html>, 2018 [Datum des Zugriffs: 21.01.2020].

<sup>109</sup> Vgl. WILDEMANN, H.: Individuelles Bauen mit industrieller Fertigung – Hausbau 4.0, [http://www.forum-holz-bau.com/pdf/25\\_IHF2017\\_Wildemann.pdf](http://www.forum-holz-bau.com/pdf/25_IHF2017_Wildemann.pdf), S. 1f [Datum des Zugriffs: 20.01.2020].

Nicht zuletzt aufgrund dieser Potentiale wird versucht das Bauwerk als abwandlungsfähiges, reproduzierbares und industriell gefertigtes Produkt zu verstehen, dessen Herstellung vorbereitet und durch Fertigungsproduktionen und Montagen durchgeführt werden kann.

Vorteile, die sich aus den beschriebenen Potentialen gegenwärtiger Bauprozesse ergeben und die eine Verwendung von vorgefertigten Bauelementen vorsehen, können im Wesentlichen in die folgenden Kategorien unterteilt werden. Dabei werden jeweils Beispiele veranschaulicht.<sup>110</sup>

**Qualitätsverbesserungen** ergeben sich durch bessere Arbeitsbedingungen und witterungsunabhängige Umstände. Auch die Maßhaltigkeit und geringere Streubreiten bei der Erzeugung von Baumaterialien und -elementen, sowie prozessorientierte Qualitätssicherungen wirken sich positiv auf die Qualität aus.

Die **Verringerung der Herstellkosten** kann durch die Reduktion/Eliminierung nichtwertschöpfender Tätigkeiten, dem Entfall baustellenspezifischer (Vorhalte-)Kosten, der gesteigerten Effizienz und Produktivität, sowie durch Materialersparnisse (zum Beispiel wegen geringerem Verschnitt) erzielt werden. Des Weiteren haben auch die verkürzte Bauzeit und Einhaltung der kalkulierten Kosten (indirekter Preisvorteil) positive Auswirkungen auf die Herstellkosten.

Die **verkürzte Bauzeit** wird einerseits durch die Witterungsunabhängigkeit der Produktion zu jeder Jahreszeit (Montage ist auch im Winter möglich) und andererseits die parallele Produktion mehrerer Bauelemente (unabhängig von der Endposition auf der Baustelle) im Werk gewährleistet. Auf viele Elemente der Baustelleneinrichtung kann verzichtet und der Rohbau weitestgehend trocken errichtet werden. Dieser ist auch sofort belastbar.

Als nachteilig werden vor allem die mangelnde firmenübergreifende Standardisierung, die hohen Transportkosten, sowie die Notwendigkeit leistungsfähiger Auto- und Mobilkrane, genannt. Auch der hohe Fixkostenanteil der Produktion, die zusätzliche Bemessung der Elemente auf den Transport und die Schnittstellen zwischen Ortbetonbauweisen und Fertigteilen stellen zusätzliche Herausforderungen dar.<sup>111</sup>

Über die Vor- und Nachteile einzelner industrieller Bauelemente hinaus, wird nun auf die Vor- und Nachteile des gesamten industriellen Bauprozesses eingegangen.

---

<sup>110</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 20f.

<sup>111</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 21.

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile des industriellen Bauens gegenüber dem klassischen Bauen, die sowohl aus der Literatur als auch aus den vorangehenden Kapiteln erhoben wurden.

	<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<b>Verfahren und Bauzeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bessere Arbeitsbedingungen, vor allem witterungsunabhängige Fertigung</li> <li>• Durchgängige Qualitätskontrollen schon in der Fertigung</li> <li>• Kurze Montagezeiten</li> <li>• Automatisierte Fertigungsprozesse</li> <li>• Sauberere Baustellen</li> <li>• Hohe Mechanisierung und weniger schwere, manuelle (Trag- und Hebe-) Arbeiten</li> <li>• Bauzeitverkürzung durch Vorproduktion unabhängig vom Baufortschritt (Produktion nicht am kritischen Weg)</li> <li>• Reduzierte Baustelleneinrichtung</li> <li>• Hohe Maßhaltigkeit und geringere Streubreite der Elemente</li> <li>• Integrale Planung</li> <li>• Leichte Demontierbarkeit der fertigen Bauten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlen von Schnittstellen der Datenmodelle von Planung bis zur Produktion</li> <li>• Mangelnde firmenübergreifende Standardisierung</li> <li>• Ganzheitliche Planung inkl. Der Gebäudetechnik vor Produktion nötig</li> <li>• Hoher Logistikaufwand auf der Baustelle</li> <li>• Limitierungen der Elementgrößen durch Straßentransport</li> <li>• Wirtschaftliche Transportdistanzen</li> <li>• Zusätzliche Bauteilmessungen durch Transport</li> <li>• Nachträgliche Planänderungen schwer oder nur teuer umsetzbar</li> <li>• Hoher Planungsaufwand bei Einzellösungen</li> </ul>
<b>Arbeits-sicherheit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduziertes Unfallrisiko auf Baustellen</li> <li>• Bessere (v.a. witterungsunabhängige) Arbeitsumgebungen im Werk</li> <li>• Senkung des Gesundheitsrisikos durch betrieblichen Arbeitsschutz</li> </ul>	

<b>Umwelt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringere Abfallmengen</li> <li>• Bessere Abfalltrennung</li> <li>• Reduzierung der Lärm- und Staubemission auf der Baustelle</li> </ul>	
<b>Wertschöpfung und Kosten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Produktivität</li> <li>• Verringerung der nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten</li> <li>• Reduzierung vieler Vorhaltekosten</li> <li>• Geringerer Arbeitskraftbedarf</li> <li>• Einsatz spezifischer und effizienter Maschinen</li> <li>• Effizienter, geringerer Materialeinsatz</li> <li>• Geringere Finanzierungskosten durch kürzere Bauzeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Fixkostenanteil</li> </ul>
<b>Demographie und Mitarbeiter</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neue Berufsbilder, die dem demographischen Wandel der Gesellschaft entsprechen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monotone Arbeiten</li> <li>• Abbau von Arbeitskräften</li> </ul>

Tabelle 3: Vor- und Nachteile des industriellen Bauens.<sup>112 113</sup>

Wie in Tabelle 3 angeführt, werden aus relevanter Literatur erhobene Vor- und Nachteile des industriellen Bauens beschrieben. Dazu wurden vorab fünf Themenbereiche gewählt, denen die jeweiligen Vor- Nachteile zugeordnet wurden.

Für die in Kapitel 4 beschriebene Kalkulation einer Fertigungslinie, werden nun aus den Themenbereichen ausgewählte Vorteile mit besonderer Wichtigkeit für die Fertigungslinie genannt.

- Bessere Arbeitsbedingungen, vor allem durch die Unabhängigkeit der Witterung und durch gleichbleibende Arbeitsumgebungen, ermöglichen produktives, kalkulierbares und sicheres Arbeiten. Durch die

<sup>112</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, [http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript\\_Industrielles%20Bauen.pdf](http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript_Industrielles%20Bauen.pdf), 2007, S. 20 [Datum des Zugriffs: 16.01.2020].

<sup>113</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten – Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation, VDI-Buch. Berlin. Springer Verlag, 2008, S. 9f.

kaum ändernden Produktionsumgebungen profitiert die Herstellkostenberechnung in Form genauerer Kostenberechnungen als bei Bauleistungen die gänzlich auf der ausgeführt werden Baustelle.

- Die Bauzeitverkürzungen durch Vorproduktion, unabhängig vom Baufortschritt ermöglicht die Herstellung von Elementen unabhängig ihrer Position im Einbauzustand. Durch weitere Maßnahmen, die die Trennung der Produktion in einen kundenunabhängigen und einen individualisierbaren Teil (z.B. mittels CNC-Bearbeitung) vorsehen, können Elemente produziert werden, ohne eine Verlängerung des kritischen Weges der Bauwerkserzeugung.
- Die hohe Mechanisierung der Prozesse innerhalb der Fertigungslinien ermöglicht maßgenaues Produzieren, ohne dass Mitarbeiter schwere, repetitive Tätigkeiten manuell ausführen müssen. Dazu sind entsprechende Anlagen und fahrerlose Transportsysteme in der Kalkulation zu berücksichtigen.

Bevor aus den Prinzipien und Charakteristika des industriellen Bauens, die Fertigungslinie von Betonbauteilen und die Kalkulation anhand eines Beispiels beschrieben werden kann, wird im nächsten Kapitel auf die Aspekte des industriellen Betonbaus eingegangen.

### 3 Aspekte des industriellen Bauens im Beton-Fertigteilbau

In den vorangehenden Kapiteln wurden zuerst Prinzipien des industriellen Bauens formuliert und eine Beschreibung relevanter Charakteristika und Anforderungen vorgenommen. Danach wurden die Zusammenhänge der industriellen Planung und Produktion in den Kontext des Bauablaufes eingeordnet und wichtige Vor- und Nachteile, die Auswirkungen auf den industriellen Bauablauf haben, tabellarisch erfasst. Um nun in weiterer Folge auf die Kalkulation einer Produktionsfertigung zur Erzeugung und Verarbeitung von Betonbauteilen eingehen zu können, ist es nötig, auf Aspekte des Betonbaus einzugehen, die für das industrielle Bauen von besonderer Relevanz sind. Um zu erläutern, welche Teilprozesse zur Produktion vorgefertigter Betonteile ablaufen, wird zuerst beschrieben, welche Produktionsphasen sich in der Betonteilerzeugung ergeben. Wesentlicher Bestandteil der Phasen ist die Fertigungsproduktion selbst, auf die in weiterer Folge eingegangen wird. Dazu werden gängige Produktionsverfahren im Betonbau beschrieben. Dies dient sowohl der Abwägung, welches Verfahren Grundlage für die in Kapitel 4 beschriebene Fertigungslinie ist, als auch der Konkretisierung der Abläufe der Fertigungslinie.

Durch die Entwicklung des Eisenbetons des französischen Unternehmers Joseph Monier Mitte des 19. Jahrhunderts ist dem Betonbau und in weiterer Folge der industriellen Fertigteilerzeugung aus Beton sprichwörtlich der Grundstein gelegt worden. Heutzutage werden Betonfertigteile in fast allen Bereichen des Hochbaus verbaut. Techniken und Methoden, aber auch Unternehmen sehen das zukünftige Bauen im Kontext des industriellen Bauprozesses und der Fertigteilerzeugung.<sup>114</sup> Besonders kundenspezifische Einzelbauteile oder Kleinserien dominieren heute schon den Absatzmarkt und Großserien von Betonfertigteilen gehören tendenziell der Vergangenheit an.<sup>115</sup> Nicht zuletzt aufgrund dieser Forderungen und den Randbedingungen der Produktionsverfahren, wie den kritischen Mengenausstößen, werden verschiedene industriewirtschaftliche Aspekte genutzt um wirtschaftliches Produzieren zu ermöglichen. Dazu zählen die in Kapitel 2 genannten Aspekte, wie die Möglichkeiten, Elemente in beliebiger zeitlicher Reihenfolge herstellen zu können und diese über größere Entfernung transportieren zu können (wirtschaftlich bis etwa 200 km, zum Teil auch weiter).<sup>116</sup>

---

<sup>114</sup> Vgl. HECK, D.: BAUVERFAHRENSTECHNIK – Skriptum, S. 105.

<sup>115</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 36 [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

<sup>116</sup> Vgl. BAUER, H.: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S.400.

Im konstruktiven Bauwesen werden vorgefertigte Betonbauteile dort eingesetzt, wo sie signifikante Kosten- oder Zeitersparnisse ermöglichen oder eine Errichtung des Bauwerks überhaupt erst möglich wird.

Zur Herstellung von (Stahl-) Betonbauteilen ergeben sich im Wesentlichen drei vom Produktionsverfahren unabhängige Phasen:<sup>117</sup>

1. Die Vorbereitungsphase: Im Zuge der Vorbereitung werden erforderliche Ausführungspläne aus dem virtuellen Gebäudemodell in Werkstatt- und Produktionspläne verarbeitet. Zu extrapolierende Informationen sind dabei unter anderem:
  - Stücklisten und Mengenermittlung für Bauteile (und deren Rohstoffe, Hilfsstoffe, etc.), Einbauteile, Anbauteile
  - Statische Anforderungen
  - Schalungs-, Bewehrungspläne, Vorspannprotokolle
2. Die Produktionsphase (im Werk) unterteilt sich in:
  - Unterstützungsprozess wie die Beschaffung, Herstellung und, oder Vorfertigung der notwendigen Stoffe, Materialien und Ein- und Anbauteile, wie Beton, Bewehrungsseisen und Schalung.
  - Fertigung: Sie geschieht auf Basis der Unterstützungsprozesse und ist auf eine spezielle Methode ausgelegt.<sup>118</sup> Sie umfasst das Zusammensetzen der Schalung, Einbringen der Einbauteile, Vorspannen, Betonieren, Rütteln, Glätten, Härten, Ausschalen und gegebenenfalls weitere Schritte zur Vorspannung des Elements.
  - Nacharbeiten und Lagerung: Hierzu gehören Oberflächenbehandlungen und Nacharbeiten, Qualitätskontrollen, sowie der Transport und die Einlagerung in Zwischenlager.
3. Die Auslieferungsphase zur Montage: Unter Berücksichtigung der Logistikkette werden Produkte auf die Baustelle geliefert.

Die nachstehende Abbildung 9 zeigt einen schematischen Balkenplan für die Produktion, den Transport und die Montage eines Skelettbaus aus Stahlbetonfertigteilen. Darin ersichtlich ist die Trennung der Vorgänge von Unterstützungs- (Formbau, Bewehrung), Fertigungs- und Nachbearbeitungsprozessen. Die Dauern der einzelnen Vorgänge ergeben sich durch die Multiplikation der produzierten Bauteilstücke mit den benötigten Produktionszeit angegeben in Stück pro Arbeitstag (AT). Für die Fertigung der Elemente ergeben sich durch die Aushärtungszeiten, häufig Tages- oder Halbtagestakte. Für die Transportwege im Werk zwischen den einzelnen Stationen und Maschinen werden häufig Hebezeuge eingesetzt.

<sup>117</sup> Vgl. BAUER, H.: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S. 394f.

<sup>118</sup> Siehe hierzu Kapitel 3.1

Fertigungshallen sind deshalb häufig mit Brückenlaufkränen oder Portal-  
kränen ausgestattet, die über die Halle hinaus Lagerplätze beliefern.<sup>119</sup>

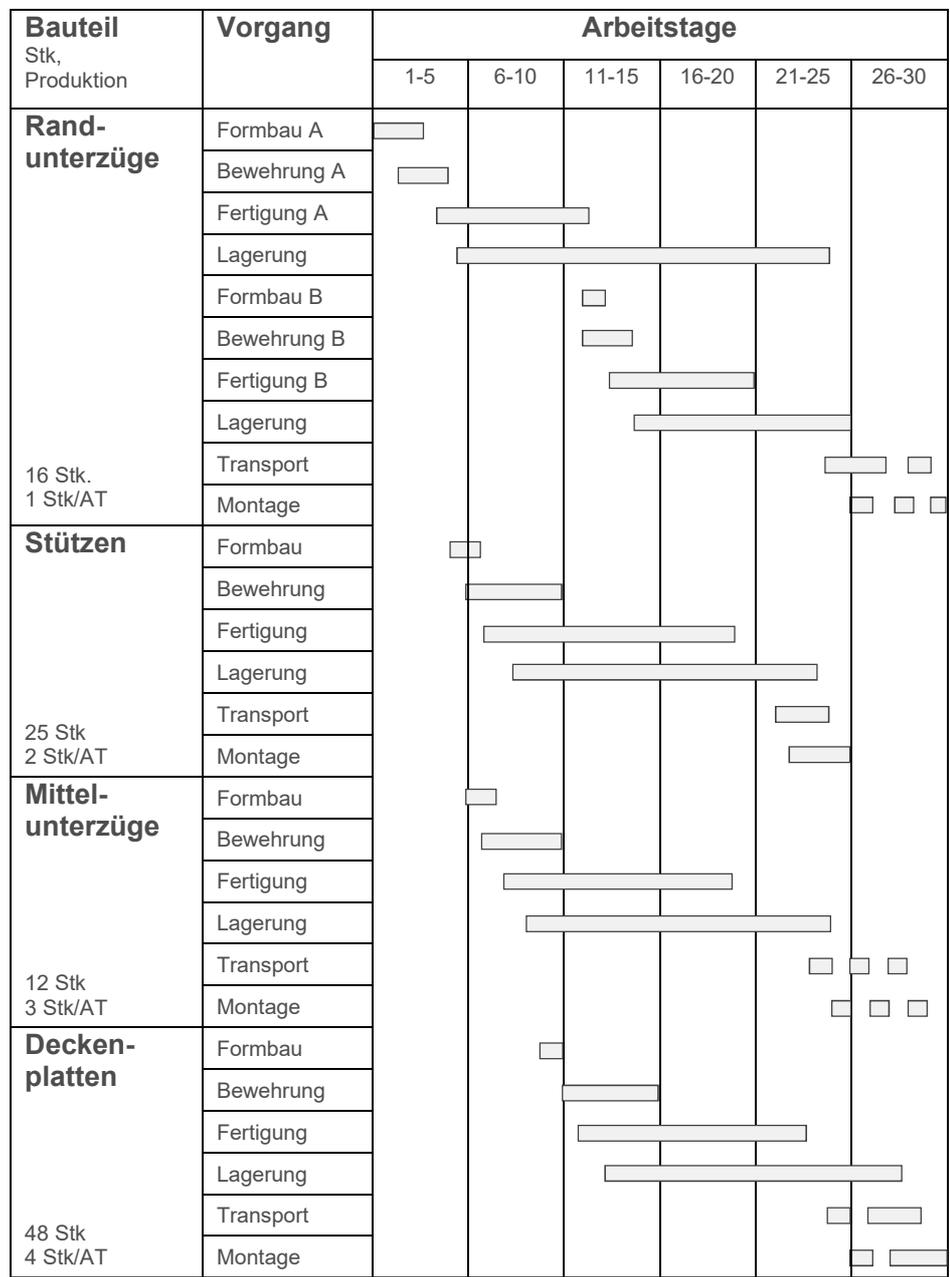


Abbildung 9: Schematischer Balkenplan der Produktion, Fertigung und Montage eines Skelettbaus aus Stahlbetonfertigteilen <sup>120</sup>

Da sich das in Kapitel 4 beschriebene Konzept einer Fertigungslinie mit der Fertigung als Teil der Produktionsphase beschäftigt, ist es nun nötig,

<sup>119</sup> Vgl. GRABNER, T.: Operations Management – Auftragserfüllung bei Sach- und Dienstleistungen. Wiesbaden. Springer Gabler, 2017, S. 201f.  
<sup>120</sup> Vgl. BAUER, H.: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S. 422.

auf die Produktionsverfahren näher einzugehen. Dazu werden im nächsten Kapitel gängige Fertigungsverfahren beschrieben.

### 3.1 Produktionsverfahren

Als wichtige Randbedingung der Fertigungslinie, bildet ein Produktionsverfahren die organisatorische Basis zur Herstellung von betonierten Fertigteilen. Sie ordnet sich in die Produktionsphase, die im vorangestellten Kapitel beschrieben wurde ein und versucht Prozesse mit unterschiedlichen technologischen Mitteln und Verfahren durchzuführen. Des Weiteren legt sie den Produktionsablauf fest und integriert Unterstützungsprozesse. In diesem Kapitel wird zuerst veranschaulicht welche Unterstützungsprozesse in die Fertigung von Betonbauteilen miteinbezogen werden müssen, um anschließend die für den Betonbau relevanten Produktionsverfahren beschreiben zu können.<sup>121</sup>

Die sich für die Betonfertigteilerzeugung ergebenden Randbedingungen zur Herstellung der Elemente ist in der nachstehend Abbildung 10 am Beispiel von Stahlbetonfertigteilen dargestellt. Ähnlich der Herstellung eines Bauwerks in Ortbetonbauweise ergeben sich für die Unterstützungsprozesse der Fertigung ebenfalls die Bereiche des Formbaus (Schalung), der Bewehrung und der Betonherstellung. Darüber hinaus sind in der nachstehenden Abbildung auch die Produktion und Verarbeitung von Ein- und Anbauteilen dargestellt. Die Fertigung fordert, dargestellt durch in die Fertigung einlaufende Pfeile, dass diese Unterstützungsprozesse die zeitgerechte und quantitative Materialbereitstellung gewährleisten.

<sup>121</sup> Vgl. KUMMER, S.; GRÜN, O.; JAMMERNEGG, W.: Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. Hallbergmoos. Pearson, 2019, S. 251f.

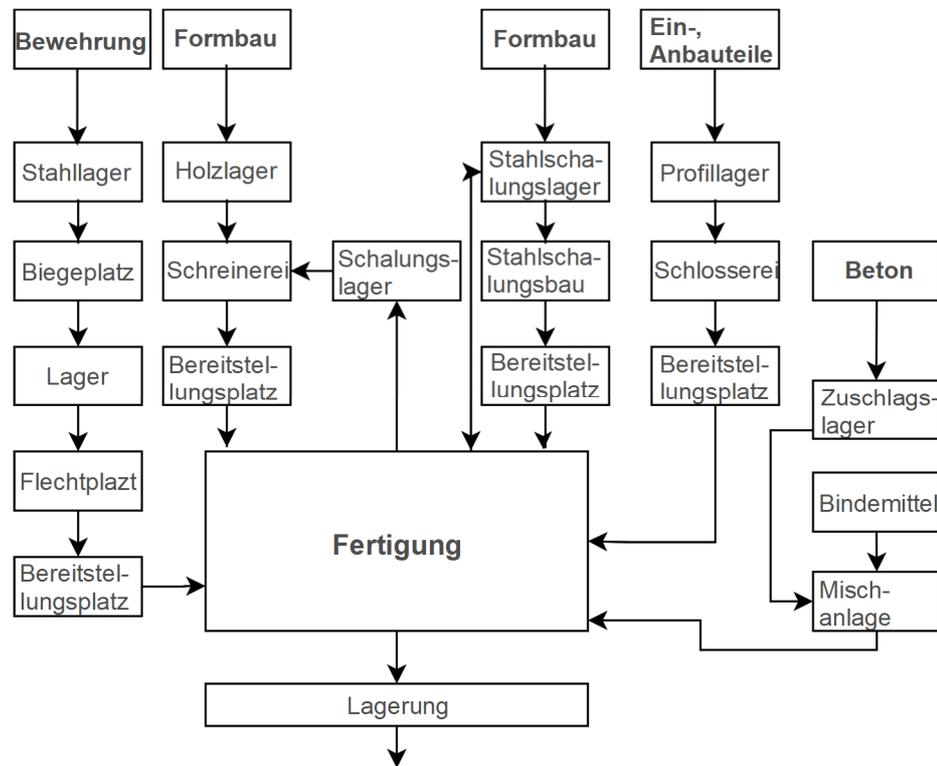


Abbildung 10: Unterstützungsprozesse der Fertigung<sup>122</sup>

Viele unterstützende Prozesse, wie die Betonherstellung, sind durch die Herstellung und Verarbeitung im Werk nicht zwingendermaßen günstiger, aber mit wesentlich höheren Qualitäten durchzuführen als auf der Baustelle. Gründe für die verbesserte Betonproduktion beispielsweise werden darin gesehen, dass alle Betonkomponenten aus permanenten Quellen stammen, die im Labor sorgfältig untersucht werden. Definierte und verbesserte Arbeitsvorgänge vermeiden Fehler, zum Beispiel durch das Übersehen der maximalen Fallhöhe von Beton oder besserer Verdichtungsmethoden. Auch die witterungsfreie Umgebung, sowie regelmäßige Qualitätskontrollen tragen dazu bei.<sup>123</sup>

Für industrielle Produktionsverfahren der Betonfertigteilerzeugung, die zentraler Bestandteil der Fertigung sind, findet man in der Literatur verschiedene Gliederungsmöglichkeiten. Eine davon ist nachstehend beschrieben. Sie unterteilt die Verfahren im Wesentlichen in zwei Gruppen:<sup>124</sup>

<sup>122</sup> Vgl. BAUER, H.: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S. 397.

<sup>123</sup> Vgl. JEHL, P.; MICHAILENKO, N.; SEYFFERT, S. et al.: IntelliBau 2 – Schriften zur Bauverfahrenstechnik. Berlin. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 3.

<sup>124</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 36 [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

- Produktionsverfahren mit stationärer Einzelschalung und mobilen Arbeitsstätten und -abläufen im Zyklusprozess
- Produktionsverfahren mit mobiler Schalungsführung und stationären Arbeitsstätten und -abläufen

**Produktionssysteme mit stationärer Einzelschalung** können weiter in die für die Vorfertigung von Betonbauteilen relevanten Gruppen der Fertigung auf kurzen oder auf langen Bahnen unterteilt werden.

Bei der **Fertigung auf kurzen Bahnen** werden alle notwendigen Repetier- und Produktionsfaktoren in richtiger Reihenfolge, fortlaufend zum Ort der Schalung befördert. Die nachstehende Abbildung zeigt die standortgebundene Schalung in grau und die zeitliche Abfolge aller Einsätze der einzelnen Faktoren.

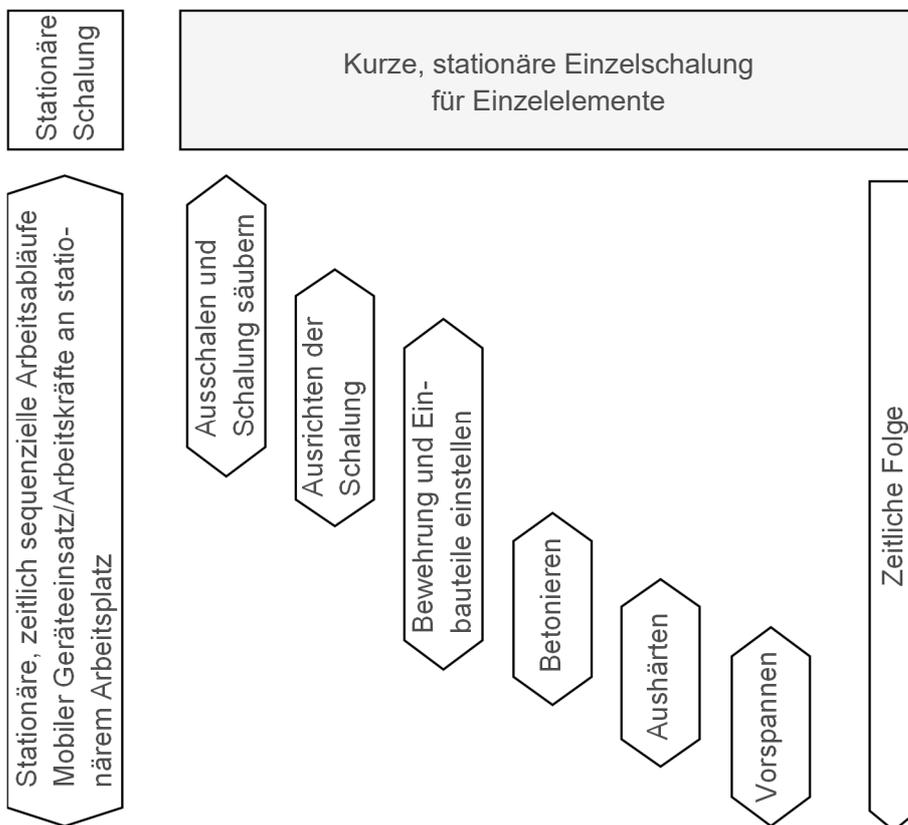


Abbildung 11: Systematische Darstellung der Fertigung auf kurzen Bahnen<sup>125</sup>

<sup>125</sup> GIRMSCHIED, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 37 [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

Bekannte Vertreter dieses Verfahrens sind unter anderem:

- Das Schleuderbetonverfahren dient der Herstellung von Bauteilen die einen zentralsymmetrischem Querschnitt aufweisen. Ein schnellrotierender Hohlkörper (beispielsweise aus Stahl) wird dabei mit Beton verdichtet. Erzeugnisse können unter anderem Betonrohre, Stützen und Pfeiler sein.<sup>126</sup>
- Batterieschalungsverfahren: Große, gleichförmige Trennschotten ermöglichen das gleichzeitige Herstellen vieler Betonfertigteile. Die Batterieform begrenzt dabei die plattenförmigen Betonfertigteilen mit 5-seitig schalungsglatten Oberflächen. Herstellbare Produkte sind dabei Massivdecken, -wände und Balkonplatten.<sup>127</sup>

Die wesentlichen Produktionsverfahren im konstruktiven Betonbau sind allerdings die Fertigung auf langen Bahnen, und die Umlauffertigung als Beispiel eines Produktionsverfahren mit mobiler Schalungsführung.<sup>128</sup> Diese werden nachstehend beschrieben.

Die **Fertigung auf ortsgebundenen langen Bahnen** kommt in den Bereichen Träger-, Decken- und Plattenherstellung zum Einsatz. Sowohl schlaff armierte als auch vorgespannte Elemente können bei diesem Fertigungsverfahren erzeugt werden. Repetier- und Produktionsfaktoren werden, ähnlich wie bei der Fertigung auf kurzen Bahnen, sequenziell eingesetzt, die notwendigen Arbeitsschritte geschehen allerdings entlang einer langen Bahn. Mit Hilfe von Trennschalungen oder, sofern das Bewehrungsmaterial es erlaubt, Trennschnitten, können individuelle Maße erzeugt werden.<sup>129</sup> Im Zuge der sogenannten Gleitfertigung, einem Fertigungsprinzip der Fertigung auf langen Bahnen, füllt ein Gleitfertiger den Beton in die stationäre Schalung, verdichtet diesen und führt verschiedene Behandlungsmaßnahmen durch. Alternativ zur Gleitfertigung kann auch ein Extruder eingesetzt werden, der steifen Beton durch eine Förderschnecke unter hohem Druck und gleichzeitigem Rütteln in die Fertigungsstreifen einbringt. Sofern das Bewehrungsmaterial es zulässt, können Trennschnitte zur individuellen Formgebung genutzt werden, andernfalls sind Trennschalungen vorzusehen.<sup>130</sup> Die nachstehende Abbildung 12 soll das System zur besseren Verständlichkeit darstellen.

---

<sup>126</sup> Vgl. Schleuderbeton, <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/schleuderbeton-1476621> [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

<sup>127</sup> Vgl. Batterieschalung, <https://www.bt-innovation.de/produkt/batterieschalung/> [Datum des Zugriffs: 24.01.2020].

<sup>128</sup> Vgl. BAUER, H.: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S.403.

<sup>129</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 36 [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

<sup>130</sup> Vgl. KUCH, H.; SCHWABE, J.-H.; PALZER, U.: Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen – Verfahren und Ausrüstungen. s.I. Verlag Bau+Technik, 2015, S. 228f.

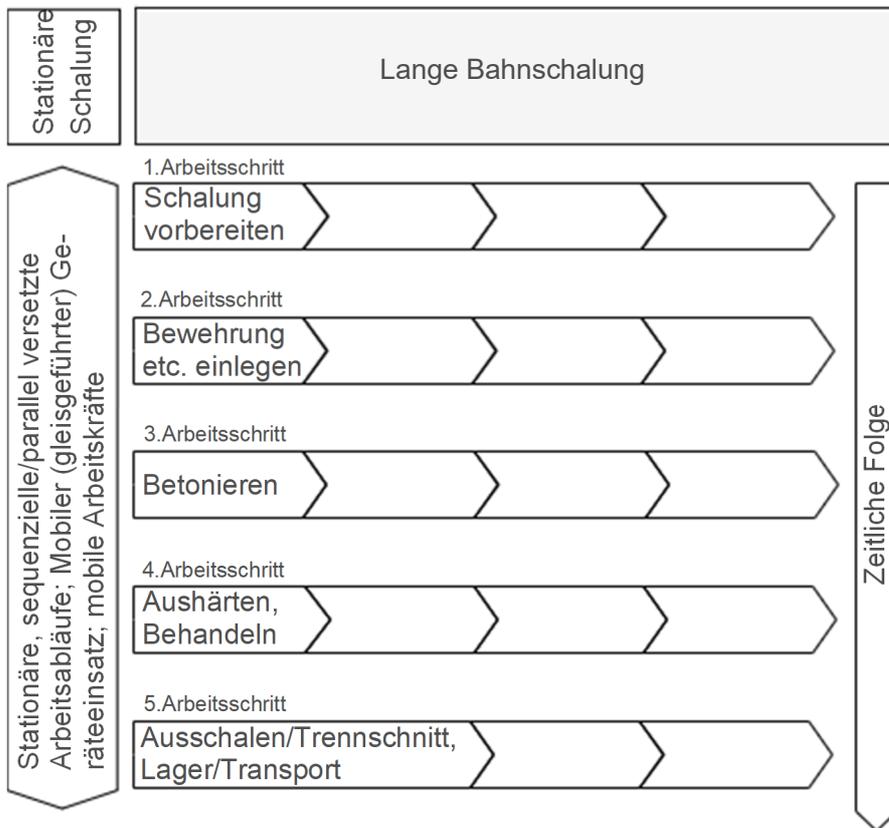


Abbildung 12: Systematische Darstellung der Fertigung auf langen Bahnen<sup>131</sup>

Das zweite gängige Verfahren zur Fertigungsproduktion von Betonbauteilen ist die **Umlaufproduktion**. Mithilfe dieses Fertigungsverfahrens können unter anderem Massivwände und Elementdecken, sowie Hohldielendecken, Hohlwände und Sandwichwände gefertigt werden. Das Verfahren zeichnet sich durch seinen hohen Industrialisierungsgrad aus, der unter anderem durch Standardisierung, besonders hoher Mechanisierung und Automatisierung bei individuellen Endprodukten umgesetzt wird.<sup>132</sup> Zuzuordnen ist es den Verfahren mit mobiler Schalung und stationären Arbeitsstätten und -abläufen. Konträr zu den bereits beschriebenen Verfahren, gibt es nun ein sogenanntes Fließgut, dass sich mit Hilfe verschiedener Transportsysteme zu den einzelnen Arbeitsgängen bewegt. Da Maschinen, Arbeitsplätze und Arbeitskräfte in der Regel ortsgebunden den Produktionsprozess kontinuierlich durchführen, spricht man auch von einer (flexiblen) Fließfertigung.<sup>133</sup> Ein einheitlicher Materialfluss muss dabei

<sup>131</sup> GIRMSCHEID, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 42 [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

<sup>132</sup> Vgl. KUCH, H.; SCHWABE, J.-H.; PALZER, U.: Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen – Verfahren und Ausrüstungen. s.l. Verlag Bau+Technik, 2015, S. 233f.

<sup>133</sup> Beim Objektprinzip werden komplexe Aufgaben zerlegt und organisatorische Einheiten übertragen (Objektgliederung).

nicht gegeben sein, denn auch die Erzeugung verschiedener Endprodukte ähnlicher Einzelteile soll gewährleistet sein.<sup>134</sup>

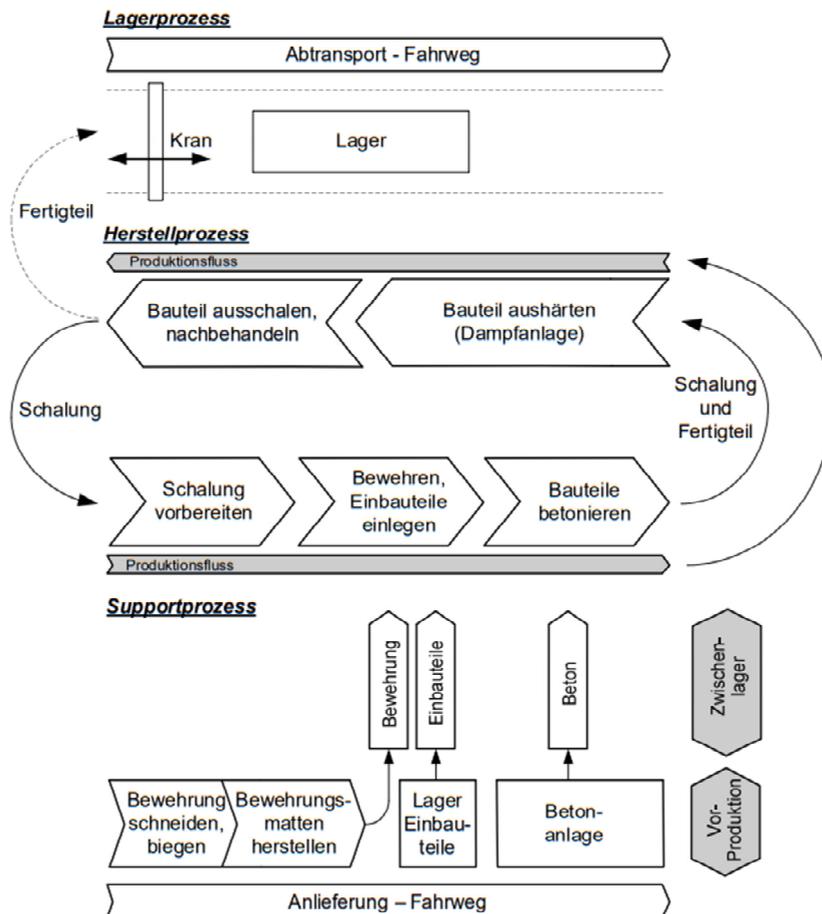


Abbildung 13: Systematische Darstellung der Umlauffertigung<sup>135</sup>

Die schematische Darstellung zeigt im Wesentlichen die Aufgabenfolge der klassischen Umlaufproduktion von Betonbauteilen. Die essenziellen Aufgaben umfassen das Vorbereiten der Schalung, das Einlegen der Bewehrung, der Abstandshalter und der Einbauteile, sowie das anschließende Betonieren. Zu unterscheiden ist, ob im Zuge der Herstellung horizontale oder vertikale Schaltische zum Einsatz kommen. Horizontale Schalungen ermöglichen eine, vertikale (beispielsweise Batterieschalungen<sup>136</sup>) zwei schalungsglatte Oberflächen. Danach können, wie in Abbildung 13 gezeigt, Geräte, wie Dampfanlagen zur schnelleren Aushärtung des Betons eingesetzt werden, bevor ausgeschalt und nachbehandelt

<sup>134</sup> Vgl. KUMMER, S.; GRÜN, O.; JAMMERNEGG, W.: Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. Hallbergmoos. Pearson, 2019, S. 255.

<sup>135</sup> GIRMSCHIED, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 46 [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

<sup>136</sup> Vgl. Batterieschalung, <https://www.bt-innovation.de/produkt/batterieschalung/> [Datum des Zugriffs: 24.01.2020].

wird. Sofern nicht zugekauft, sind die Bewehrungs- und Betonherstellung Teil der Vorproduktion. (Zwischen-)Lager vor, in und nach der Produktion stellen sicher, dass Prozesse kontinuierlich ablaufen können. Gerade im Betonbau ermöglicht dieses Produktionsverfahren große Flexibilität. Auf entsprechenden Schaltischen können einzelne Schalungs-, Bewehrungs- und Einbauteile sowie das Befüllen mit Beton automatisiert und in individuellen Formen verarbeitet und abgehandelt werden.<sup>137</sup>

Besonders die Organisation des Produktionsablaufes stellt einen Vorteil der Umlaufproduktionsverfahren dar. Der zeitlich und örtlich meist kreuzungsfreie, also sehr übersichtliche Materialfluss, ermöglicht eine genaue Produktionsplanung. Kurze Transportwege und präzise eingesetzte Puffer und (Zwischen-)Lager ermöglichen geringe Durchlaufzeiten und auftragsabhängig niedrige Lagerbestände. Auch Sicherheitsaspekte können durch sehr genau definierte Bewegungsflächen, Arbeitsbereiche und -aufgaben im Sinne von örtlich und dem Umfang nach, positiv umgesetzt werden.

Weiters entstehen reduzierte Anlagekosten, da einzelne Arbeitsgänge an dafür speziell eingerichteten Stationen optimal durchgeführt werden können und z. B. die Rüttler oder die Kipphydraulikausrüstung nur einmal, dafür aber komfortabler ausgestattet, vorgehalten werden können.<sup>138</sup>

Für die in Kapitel 4 beschriebene Fertigungslinie eignet sich aufgrund der Elemente, die produziert werden sollen, vor allem die Umlaufproduktion. Auf Elemente, die durch diese Produktionsverfahren erzeugt werden können, wird im nächsten Kapitel eingegangen.

### 3.2 Arten von Betonfertigteilen

Nun, da Produktionssysteme allgemein und Produktionsverfahren des Betonbaues erläutert wurden, bietet es sich an, aus Beton erzeugbare Fertigteilarten und Beispiele näher zu beschreiben. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über einige, am Markt erwerbbar Standardprodukte und -formate. Auf Sonderkonstruktionen in verschiedenen Dimensionen und Abmessungen wird nicht eingegangen.

Häufig verwendete Elementgruppen von vorgefertigten Betonelementen am Markt, können grob in die nachstehenden unterteilt werden.<sup>139</sup>

<sup>137</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, 2007, S. 47 [Datum des Zugriffs: 01.02.2020].

<sup>138</sup> Vgl. BAUER, H.: Baubetrieb. Berlin. Springer Verlag, 2007, S. 404.

<sup>139</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schularbeiten – Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation, VDI-Buch. Berlin. Springer Verlag, 2008, S. 9.

- Wände
  - Massivwände
  - Sandwichplatten
  - Hohlwände
- Fassaden
  - Fassadenplatten
  - Sandwichfassaden
- Decken
  - Flächen: Spannbeton, Hohldecken, Elementdecken, Rippendecken (T – Elemente, TT – Elemente, U – Elemente)
  - Balkendecken: Vorgefertigte Füllelemente, Ortbeton – Füllelemente
- Stützen
  - Rundstützen
  - Rechteckstützen
- Treppen
  - Gewendelte Treppen
  - Gerade Treppen
  - Treppenpodest
- Balkon
  - Balkonbrüstungen
  - Balkonplatten
- Fenster
  - Fensterstürze
  - Fensterumrahmungen
- Liftschächte
- Dachbinder
- Sonderbauteile (Betonfundamente, Brückenelemente)
  - Maste, Rohre
  - Gleisschwellen
- Systemmodule, z.B. Fertigbäder

Eine Einteilungsmöglichkeit dieser Elemente entsprechend der inhaltlichen Integration für das Bauwerk und ihrer räumlichen Bedeutung wurde

in Kapitel 2.2.3 Abbildung 2 vorgenommen. Diese wird nun herangezogen, um auf Produkte aus Betonfertigteilen näher einzugehen.

**Halbfertig-Rohbauelemente:** Kommen halbfertige Rohbauelemente zum Einsatz, ergeben sich häufig Mischbauweisen aus Fertigteilen und Ortbeton. Dabei werden zum Beispiel vorgefertigte Elementplatten, deren erste Bewehrungslage schon im Werk eingebaut wurde, geliefert, an der Einbaustelle mit weiterer Bewehrung versehen und letztlich zu einem monolithischen Bauteil vergossen. Ausführungen können vorgespannt oder schlaff armiert sein. Der Name Elementdecke und der Markenname Filigrandecke sind im Sprachgebrauch geläufig.<sup>140</sup>

Auch Holz-Beton-Verbunddecken sind ein Beispiel für diese Fertigteilart. Dabei werden Brettstapelhölzer oder Holzschalungen auf Holzbalken mit Aufbeton und schubfesten Verbindungen, wie beispielsweise Dübeln, vereint. Der Verbund beim Einsatz vorgefertigten Betonplatten kann durch Verschraubungen hergestellt werden. Der Holzbalken nimmt dabei die Zugkräfte auf, während der Beton als Druckplatte wirkt.<sup>141</sup>

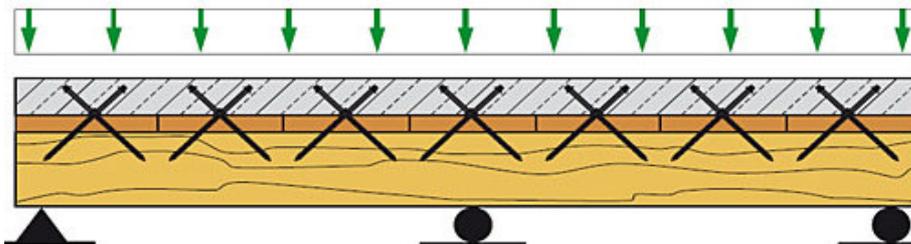


Abbildung 14: Holz-Beton-Verbunddecke<sup>142</sup>

Ein weiteres Beispiel stellen Hohl- und Doppelwandelemente, deren Außenseiten Halbfertige Rohbauelemente und gleichzeitig die Schalung darstellen können. Auf der Baustelle können die bewehrten, formgebenden Elemente mit Ortbeton befüllt werden, sodass ein ständiger Verbund gegeben ist. Alternativ kann auch eine Kerndämmung zwischen den beiden Platten werksseitig verbaut werden. Hohlwände werden mit Variablen Abmessungen in Stärken von 18cm bis 40cm verbaut.<sup>143</sup>

**Fertigrohbauelemente:** Vorgefertigte Elemente, die am Einbauort durch definierte Anschlüsse montiert werden, stellen eine häufige Einsatzform von Fertigteilen dar. Konkretere Vertreter findet man in allen Fertigteilgrup-

<sup>140</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, [http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript\\_Industrielles%20Bauen.pdf](http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript_Industrielles%20Bauen.pdf), 2007, S. 22 [Datum des Zugriffs: 16.01.2020].

<sup>141</sup> Vgl. SFS INTEC: Verbundsystem VB von SFS intec – Technische Informationen, [https://www.sfsintec.biz/internet/sfsintde.nsf/Print/System\\_VB](https://www.sfsintec.biz/internet/sfsintde.nsf/Print/System_VB) [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

<sup>142</sup> SFS INTEC: Verbundsystem VB von SFS intec – Technische Informationen, [https://www.sfsintec.biz/internet/sfsintde.nsf/Print/System\\_VB](https://www.sfsintec.biz/internet/sfsintde.nsf/Print/System_VB) [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

<sup>143</sup> Vgl. [http://www.wohnbeton.at/Seiten/wohnbaulemente/02\\_kellerwaende/02\\_5\\_hohlwaende.asp](http://www.wohnbeton.at/Seiten/wohnbaulemente/02_kellerwaende/02_5_hohlwaende.asp) (zuletzt abgerufen 23.01.2020)

pen der obenstehenden Liste. Beispiele sind unter anderem Liftschachtelemente und Treppenläufe, besonders auch Stützen und Wandplatten. Weiters können auch Betonfassadenelemente, Balkonplatten oder Brüstungen in diese Kategorie fallen.<sup>144</sup> Geometrisch komplexere Bauteile, oder Bauelemente mit hohen Qualitätsanforderungen, werden häufig im Werk als Fertighohbauelement erzeugt. Unter Umständen sind weitere Bearbeitungsmaßnahmen, wie Oberflächenbehandlungen durchzuführen.

(Stahl-)Betonträger werden als Fertighohbauelement eingesetzt. Sie können unterschiedliche Querschnittsformen, wie eckig, T-förmig, L-förmig, etc., annehmen, die auch das Verbauen von Gebäudetechnikelementen erleichtern. Maximale Abmessungen reichen dabei bis zu 1,5x1,8x34m.<sup>145</sup>

Stahlbetonbinder werden vor allem im Industrie- und Hallenbau als Dachträger und für sehr große Stützweiten eingesetzt. Querschnittsformen sind dabei zum Beispiel T- oder I-förmig. Hier ergeben sich maximale Abmessungen zu 0,5x2,5x50 m. Durch Parallelbinder und Satteldachbinder lassen sich unterschiedliche Dachneigungen herstellen.<sup>146</sup>

Deckenelemente können als Flächendecken ausgebildet sein. Dazu zählen beispielsweise Spannbeton-Hohldecken. Die charakteristischen Hohlräume dienen der Gewichtsreduzierung und ermöglichen Materialersparnisse. Die Decken sind weitspannend und ermöglichen verschiedene Anordnungen. Das nachstehende Bild zeigt ein solches Deckensystem.

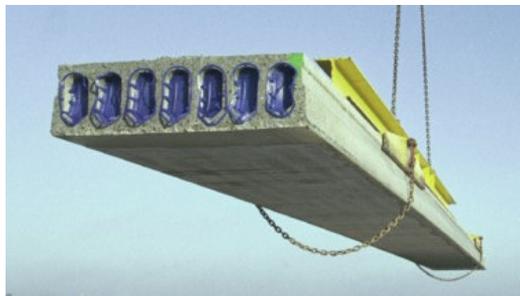


Abbildung 15: Spannbeton-Hohldecke<sup>147</sup>

Auch betonierte Rippendecken zählen zu den Flächen-/Plattendecken. Der lichte Rippenabstand beträgt in der Regel maximal 0,70 m, die Rippenbreite mehr als 0,05 m und die Plattendicke mindestens 1/10 des lichten Rippenabstandes. Bei einer Rippenhöhe bis 0,40 m sind Decken mit Spannweiten < 10m wirtschaftlich einsetzbar.<sup>148</sup>

<sup>144</sup> Vgl. GIRMSCHEID, G.: Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften, [http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript\\_Industrielles%20Bauen.pdf](http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/SkripteBauprzMgmt/Skript_Industrielles%20Bauen.pdf), 2007, S. 24 [Datum des Zugriffs: 16.01.2020].

<sup>145</sup> Vgl. VOIT, C.: STAHLBETONTRAEGER – Typenblätter konstruktiver Fertigteilbau, [https://www.oberndorfer.at/fileadmin/user\\_upload/images/products/Fertigteil\\_Bau/08.01\\_Traeger.pdf](https://www.oberndorfer.at/fileadmin/user_upload/images/products/Fertigteil_Bau/08.01_Traeger.pdf), 2013 [Datum des Zugriffs: 24.01.2020].

<sup>146</sup> Vgl. VODEL BAU: Konstruktive Stahlbetonfertigteile - Binder, <https://vogel-bau.de/kompetenzen/stahlbetonfertigteile/leistungen/betonbinder/> [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

<sup>147</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Spannbeton-Fertigdecke#/media/Datei:SpannbetonFertigdecke\\_Montage.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Spannbeton-Fertigdecke#/media/Datei:SpannbetonFertigdecke_Montage.jpg) [Datum des Zugriffs: 24.01.2020]

<sup>148</sup> Vgl. Rippendecke, <https://baulexikon.beuth.de/RIPPENDECKE.HTM>. Berlin. Beuth Verlag [Datum des Zugriffs: 26.01.2020].

**Fertigelemente:** Ähnlich wie Fertighohbauelemente werden auch sie im Werk gefertigt und auf die Baustelle transportiert. Dabei werden konstruktive, gestalterische und, bauphysikalische Anforderungen bereits erfüllt.

Bekannte Vertreter sind Sandwich-Elemente. Sie bestehen aus mehreren verbundenen Schichten. Im Falle der Betonfertigelemente bestehen diese meist aus tragenden und nicht tragenden Betonschichten, isolierenden und dampfdiffusionshemmend Zwischenschichten, gegebenenfalls Luftschichten und schützenden Außenschichten, die wiederum aus Beton sein können.

**Fertigraummodule** bestehen aus den oben beschriebenen Fertigteilen und werden vor allem in hochinstallierten Räumen wie EDV- und Serverräumen, sowie Bädern eingesetzt. Bei der Erzeugung vieler gleicher oder zumindest ähnlicher Zellen, wie im Krankenhausbau, bei Wohnheimen, Hotels, aber auch im Schiffsbau eignen sich diese Module besonders. Unter Verwendung von standardisierten Abmessungen, Oberflächenqualitäten und Ein- und Anbauteilen können Kosteneinsparungen erzielt werden.<sup>149</sup> Räume mit geringeren Anforderungen an die Installationen und Gebäudetechnik beispielsweise Garagen, können ebenfalls produziert werden.



Abbildung 16: Fertigraumzelle

Die beschriebenen Elementgruppen und beispielhaft genannten Bauteile können im Zuge der Umlaufproduktion erzeugt werden. Für das Konzept einer Fertigungslinie im Betonbau stellen diese Produkte herstellbare Erzeugnisse dar.

Zur Erzeugung dieser Elemente kommen in der Planung und im Produktionsprozess zahlreiche Informationstechnologien zum Einsatz. Sie sollen durchgängige Datenmodelle bereitstellen die das Produzieren nicht nur schneller und ressourcenschonender, sondern letztlich wesentlich günstiger gestalten sollen. Diese Informationstechnologien sind Teil des nächsten Kapitels.

<sup>149</sup> Vgl. *PIRCHNER, E.*: In dreifacher Ausführung: Bürogebäude für Österreich, Rumänien und Deutschland. – In: Zuschnitt, 50/2013, S. 12ff.

### 3.3 Einsatz von Informationstechnologien

Durch den immer höher werdenden Grad an Mechanisierung und Automatisierung der Prozesse, gewinnen Informationstechnologien an Wichtigkeit. Um zu erläutern, wie diese den Planungs- und Fertigungsprozess erleichtern können, wird in diesem Kapitel auf gängige Informationstechnologien und ihr Zusammenwirken eingegangen.

Vor allem in der Planung haben sich Methoden, die auf einem zwei- oder mehrdimensionalen virtuellen Modell, auch Computer Aided Design (CAD) genannt basieren, durchgesetzt. Auch in der computergesteuerten Produktion setzt man auf solche Systeme. Unter dem Namen Computer Aided Manufacturing (CAM) wird im Betonbau die Verwendung von Software zur Steuerung verschiedener Maschinen verstanden. Die herstellerübergreifenden Programme erstellen dabei numerische Codes (NC-Codes) um beispielsweise CNC Maschinen anzusteuern. In der Theorie arbeiten CAD und CAM Systeme zusammen. Über Schnittstellen wird das benötigte Bauteil oder Bauwerk übergeben und einige Logikprüfungen ermitteln Planungsfehler. Die einzelnen Bauelemente werden, unter einigen Kriterien der Optimierung im Programm dargestellt. Die notwendigen Operationen, wie beispielsweise Formatierungen werden eingetragen und systemspezifische Werte, wie Bewegungsgeschwindigkeiten kontrolliert und gegebenenfalls abgeändert. Die durchzuführenden Operationen können zur Kontrolle simuliert und anschließend auf dem zu bearbeitenden Bauteil durchgeführt werden. Die Grenzen zwischen der anonymen Fertigungsproduktion und der individuellen Bauwerkserzeugung verschwimmen durch diese maßgeschneiderten Bauteile und kundenabhängigen Manipulationen immer mehr.

Man verfolgt das Ziel, über die Planung und Produktion hinaus, ein durchgängiges Datenmodell für alle Teilbereiche der Planung und Produktion zu schaffen. Man spricht dann von Computer-integrale Manufacturing (CIM). Für CIM ergeben sich in einem Unternehmen drei wesentliche Aufgabenbereiche:<sup>150</sup>

- Unterstützung der Planung und des Produktentwicklungsprozesses, beispielsweise durch PDM (Produktdatenmanagement) und CAD
- Unterstützung der Auftragsabwicklung und Produktionssteuerung beispielsweise durch PPS (Produktionsplanung und Steuerung) oder ERP Systeme (Enterprise Ressource Planungssysteme)<sup>151</sup>

---

<sup>150</sup> Vgl. TUP - REDAKTION: Vernetzte Produktion: Computer-integrated Manufacturing, <https://logistikknowhow.com/informationssysteme/vernetzte-produktion-computer-integrated-manufacturing/>, 2017 [Datum des Zugriffs: 28.01.2020].

<sup>151</sup> ERP-Systeme dienen der umfassenden Planung, Koordination und Steuerung vieler unternehmerischer und betriebswirtschaftlicher Aufgaben (Disposition, Einsatzplanung der Ressourcen, Bestandsführung). Auch finanzwirtschaftliche, buchhalterische und Aufgaben des Controllings können mit entsprechendem Aufwand eingepflegt werden.

- Unterstützung beim Herstellungsprozess, beispielsweise durch CAM

Durch Kombination verschiedener Systeme wird versucht, das CIM durchgängig umzusetzen. Es können unter anderem nachstehende Systeme zum Einsatz kommen:<sup>152</sup>

- CAD (Computer Aided Design): computergestützter Entwurf und Konstruktionszeichnung
- CAP (Computer Aided Planning): Informationen und Daten für die Teile-Fertigung sowie Montageanweisungen
- CNC (Computerized Numerical Control): computergestützte Fertigung der Produkte mit Hilfe von numerischen Maschinensteuerungen
- CAM (Computer Aided Manufacturing): Überträgt die Konstruktionsdaten (NC-Code) an CNC-Maschinen
- CAQ (Computer Aided Quality Assurance): Qualitätssicherung
- PPS (Produktionsplanung und -steuerung): zur Auftragsabwicklung
- BDE (Betriebsdatenerfassung): Datenbanken für alle benötigten Auftrags-, Personal-, Maschinen- und Prozessdaten

CIM Systeme ermöglichen die Verknüpfung von Daten und Ressourcen, sodass mehrfache und manuelle Dateneingaben verhindert werden, die Zahl von ausführungsrelevanten und qualitätsbeeinträchtigenden Fehlerquellen sinkt und die Datenkonsistenz und deren Aktualität sichergestellt werden.

Als problematisch ergeben sich heute vor allem Schnittstellen zwischen den einzelnen Systemen, die verhindern, dass Entwurfsdaten des Architekten direkt den Planern der Fertigungsproduktion zur Verfügung stehen. Viele Schritte wie die Erfassung der Geometrie, die Eingabe von Operationen und die Übertragung von Daten müssen dann manuell oder sogar doppelt erledigt werden.

Im Betonbau können CIM Systeme in den meisten Produktionsprozessen eingesetzt werden. Schalroboter beispielsweise können angesteuert werden, um Schalungen mit besonders hoher Genauigkeit auf vorab gereinigten und geölten Platten zu positionieren.<sup>153</sup> Je nach Produktionsverfahren und eingesetztem Material, können Bewehrungen automatisch hergestellt

---

<sup>152</sup> Vgl. TUP - REDAKTION: Vernetzte Produktion: Computer-integrated Manufacturing, <https://logistikknowhow.com/informationssysteme/vernetzte-produktion-computer-integrated-manufacturing/>, 2017 [Datum des Zugriffs: 28.01.2020].

<sup>153</sup> Vgl. WECKENMANN ANLAGETECHNIK: Mono-Z Schalungsroboter – Weckenmann Anlagentechnik [Youtube], <https://www.youtube.com/watch?v=x3u-De9orek> [Datum des Zugriffs: 26.01.2020].

und eingesetzt werden. Ein Beispiel dafür ist das sogenannte Strangziehverfahren, ein kontinuierliches Herstellungsverfahren von faserverstärkten Kunststoffprofilen (CFK), die im Beton als Bewehrung eingesetzt werden können.<sup>154</sup>

Unter Erkennung von Aussparungen kann auch der Betoniervorgang mit hoher Maßgenauigkeit von CAM-Systemen gesteuert werden. Abhängig vom Produktionsverfahren kommen dabei unterschiedliche Roboter zum Einsatz. Auch Transporte und Lager können von automatisierten, fahrerlosen Systemen sichergestellt werden.<sup>155</sup>

Diese Informationstechnologien sind relevant für den industriellen Bauablauf im Betonbau, denn sie ermöglichen durch den Einsatz der genannten Systeme, nicht nur die Bereitstellung notwendiger Planungs- und Fertigungsinformationen, auf die in Kapitel 2.3 eingegangen wurde, sondern auch die automatisierte Produktion der Elemente. Des Weiteren kann durch den Einsatz von CNC-Systemen und den dazu notwendigen Materialien und Maschinen, die Trennung der Produktion in einen kundenunabhängigen und einen kundenabhängigen Teil vorgenommen werden. Im Stahlbetonbau ist die CNC-Bearbeitung nur bedingt möglich. Deshalb wird im nachstehenden Kapitel auf ein Fertigungsmaterial auf Betonbasis eingegangen, mit dem diese CNC-Bearbeitbarkeit ermöglicht werden kann.

### 3.4 Carbonbeton

Der Einsatz moderner Materialien zeichnet sich im industriellen Bauen ab. Durch die Verlagerung der Baustelle ins Werk stehen der Produktion von Bauteilen wesentlich mehr Technologien und Maschinen zur Verfügung, die gänzlich andere Materialien verbauen können. Eines dieser Materialien ist Carbonbeton. Er stellt einen künstlich erzeugten Verbundwerkstoff dar, der im Wesentlichen aus zwei Komponenten, Beton und Bewehrung, besteht. Die Bewehrung besteht aus sogenannten Carbonfasern, die auch Kohlefasern genannt werden. Im Zuge der Herstellung werden einzelne Fasern zu sogenannten Filament-Garn zusammengefasst und aufgespult oder ganze Stäben erzeugt. Das Filament kann dann zu Geweben wie Lamellen oder Matten weiterverarbeitet werden. Verbindet man die Carbonelemente mit Epoxidharzen, entstehen kohlenstoffverstärkte Kunststoffe, die im Carbonbeton als sogenannte CFK-Bewehrungen eingesetzt werden. Gängige CFK Grundformen, die im Carbonbeton sowohl in der Sanierung als auch im Neubau zum Einsatz kommen sind Lamellen, Matten oder Stäbe. Die nachstehende Abbildung 17 zeigt die genannten Grundformen eines Herstellers.

<sup>154</sup> Vgl. CARBON-EXPRESS: Pultrusion Carbon CFK, <https://carbon-deutschland.de/pultrusion-carbon-cfk/>, 2014 [Datum des Zugriffs: 27.01.2020].

<sup>155</sup> Vgl. ZILCH, K.; DIEDERICH, C.J.; KATZENBACH, R.: Handbuch für Bauingenieure – Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit - Fachwissen in einer Hand. Berlin. Springer Verlag, 2002, S. 230.



Abbildung 17: CFK Lamellen, CFK Matten, CFK Stäbe<sup>156</sup>

Im Sprachgebrauch werden mattenartig bewehrte Bauteile, wegen des Herstellungsprozesses, häufig als Textilbeton bezeichnet. Dieser Oberbegriff umfasst weitere Bewehrungsmaterialien, wie alkalisiertes Glas, oder Basalt, die allerdings nicht in die Kategorie des Carbonbetons fallen. Carbonbeton und Textilbeton sind also gesondert zu betrachtende Begriffe, die eine gemeinsame Produktschnittmenge bei mattenartigen Bewehrungen aufweisen.<sup>157</sup>

Wie in Kapitel 4 näher erläutert, werden im Zuge der Prozesse Pultrusion und Harfenfertigung zwei der beschriebenen Grundtypen produziert. Es werden aus Filamenten Lamellen und in weiterer Folge Gewebe in Mattenform produziert. Auf das genau Produktionsverfahren wird in Kapitel 4.2 eingegangen.

Die Eigenschaften des Carbon unterscheiden sich in mehrererlei Hinsicht von denen des Stahlbetons. Dabei profitieren Betonbauteile nicht nur von wesentlich längerer Dauerhaftigkeit, sondern auch von höheren Festigkeitseigenschaften im Vergleich zu Stahlbeton. Während Bewehrungsstahl elastisch-plastische Materialeigenschaften aufweist, verhält sich der Faserverbundwerkstoff linear-elastisch und erreicht, wie in nachstehender Abbildung 18 gezeigt, fünf- bis sechsmal höhere Tragfähigkeiten. Um diesen Unterschied zu visualisieren, werden nachstehend die Arbeitslinien von Betonstahl und CFK Bewehrung im Spannungs-Dehnungsdiagramm dargestellt. Die Werte können in Abhängigkeit des Erzeugers abweichende Größen annehmen. In der Abbildung wurden Carbonfasern in einer Stärke von 7-8  $\mu\text{m}$ , mit einer Dichte von 1,75-1,82  $\text{g}/\text{cm}^3$  in einen Vergleich mit BSt. 550 gebracht. Darin wird gezeigt, dass sich für die betrachteten Carbonfasern eine Zugfestigkeit von rund 2500  $\text{N}/\text{mm}^2$ , die mit einer horizontalen, gestrichelten Linie markiert ist, bei einem E-Modul von rund 240  $\text{KN}/\text{mm}^2$  ergeben. Die Bruchdehnung ergibt sich zu rund 1,5 %. Im Vergleich zu üblichem Bewehrungsstahl (BSt. 550), der eine Zugfestigkeit von 550  $\text{N}/\text{mm}^2$  erreicht. Für das in Kapitel 4 beschriebene Konzept einer

<sup>156</sup> Vgl. S&P: Grundlagen für S&P FRP-Systeme – VER13.11.20014/ISM, [https://www.sp-reinforcement.at/sites/default/files/field\\_product\\_col\\_doc\\_file/20141113\\_grundlagen\\_fuer\\_sp\\_frp-systeme\\_2.pdf](https://www.sp-reinforcement.at/sites/default/files/field_product_col_doc_file/20141113_grundlagen_fuer_sp_frp-systeme_2.pdf), 2014, S. 3/34 [Datum des Zugriffs: 09.02.2020](zuletzt abgerufen 28.01.2020).

<sup>157</sup> Vgl. SCHLADITZ, F.: M. Curbach: Carbon Concrete Composite. In: K. Holschemacher (Hrsg.): 12. Tagung Betonbauteile - Neue Herausforderungen im Betonbau. Beuth Verlag, 2017, S. 121–138.

Fertigungslinie zur industriellen Erzeugung und Verarbeitung von Betonbauteilen zeigt sich, dass durch den Einsatz von Kohlefaserbewehrung wesentlich höhere Festigkeiten erzielt werden können.

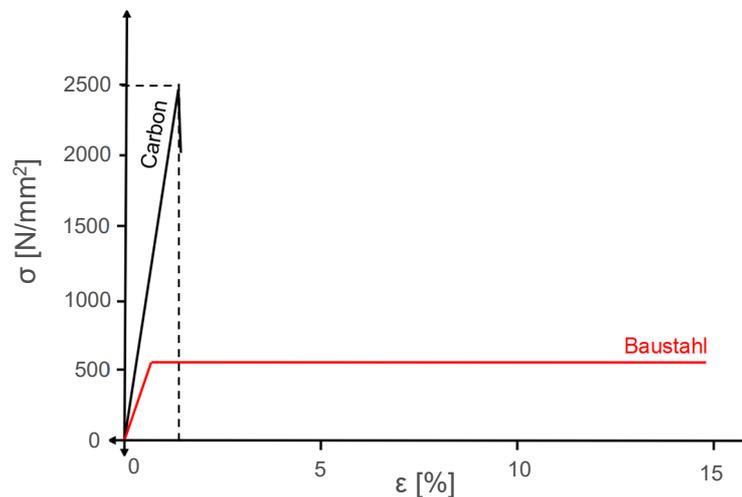


Abbildung 18: Arbeitslinie von Carbonfasern des Herstellers S&P<sup>158</sup>

Der Hersteller der Produkte bietet darüber hinaus auch Fasertypen mit Zugfestigkeiten von bis zu 4500 N/mm<sup>2</sup> an.<sup>159</sup> Andere Quellen offenbaren ähnliche Werte und benennen die thermische Belastbarkeit des Materials auf rund 2000°C, was wesentlich über den entstehenden Hydratationswärmen des Betons liegt.

Bei der Wahl des Betons ergeben sich durch Festlegung der Zusatzmittel- und Stoffe, sowie durch die Sieblinie unterschiedliche Materialeigenschaften. Bei der Verwendung von Beton mit CFK Bewehrungen, wird angeraten mit einem Größtkorn von  $\leq 8$  mm zu arbeiten.<sup>160</sup> Die Bewehrung kann einlagig, also in einem 2D-Gelege, oder mehrlagig in 3D-Bewehrungsstrukturen im Beton verlegt sein.

Vorteile der Carbonbewehrung gegenüber der Stahlbewehrung liegen vor allem bei der Korrosionsbeständigkeit und der damit einhergehenden längeren Lebensdauer von Betonteilen. Weiters können Materialeinsparnisse durch die Reduktion der zentimeterhohen Betonüberdeckungen des Baustahls zum Schutz vor Korrosion, erwirkt werden. Die Überdeckung kann auf wenige Millimeter verringert werden. Weitere Einsparungen ergeben sich durch die Menge an verbauter Bewehrung. Carbon ist mit einer Dichte von rund 1,8 g/cm<sup>3</sup> nicht nur viermal leichter als der gängige Baustahl BSt

<sup>158</sup> Vgl.S&P: Grundlagen für S&P FRP-Systeme – VER13.11.20014/ISM, [https://www.sp-reinforcement.at/sites/default/files/field\\_product\\_col\\_doc\\_file/20141113\\_grundlagen\\_fuer\\_sp\\_frp-systeme\\_2.pdf](https://www.sp-reinforcement.at/sites/default/files/field_product_col_doc_file/20141113_grundlagen_fuer_sp_frp-systeme_2.pdf), 2014, S. 3/34 [Datum des Zugriffs: 09.02.2020](zuletzt abgerufen 28.01.2020).

<sup>159</sup> Vgl.S&P: Grundlagen für S&P FRP-Systeme – VER13.11.20014/ISM, [https://www.sp-reinforcement.at/sites/default/files/field\\_product\\_col\\_doc\\_file/20141113\\_grundlagen\\_fuer\\_sp\\_frp-systeme\\_2.pdf](https://www.sp-reinforcement.at/sites/default/files/field_product_col_doc_file/20141113_grundlagen_fuer_sp_frp-systeme_2.pdf), 2014, S. 3/34 [Datum des Zugriffs: 09.02.2020](zuletzt abgerufen 28.01.2020).

<sup>160</sup> LIEBOLDT, M.: Feinbetonmatrix für Textilbeton; Anforderungen – baupraktische Adaption – Eigenschaften. In: Beton- und Stahlbetonbau Spezial 110. Heft S1, 2015, S.22ff.

550 mit  $7,85 \text{ g/cm}^3$ , sondern auch mehr als fünfmal so tragfähig ( $3.000 \text{ N/mm}^2$  zu  $550 \text{ N/mm}^2$ ). Die Vorteile des wesentlich geringeren Materialeinsatzes resultieren neben der geringeren Umweltbelastung auch in leichteren Bauteilen, was positive Auswirkungen auf den Transport und die Montage zur und auf die Baustelle hat.

Experten sehen Einsparpotentiale von Material bei massiven Bauteilen in einer Höhe rund 50 %.<sup>161</sup> Betonierte Fertigteil-Fassadenelemente beispielsweise können so mit 2-3 cm Stärke produziert und verbaut werden. Ein konkretes Beispiel hat die Technische Universität Dresden veröffentlicht. In einem Versuch wurden carbonbewehrte Deckenplatten für den Einsatz in Parkhäusern getestet. Stahlbetondecken erleiden in diesen Umgebungen besonders durch Chloridbelastungen von Tausalz häufig massive Korrosionsschäden. Die Tragfähigkeit wurde mit 4-Punktversuchen auf Carbonbetonplatten in den Abmessungen  $1 \times 2,5 \times 10 \text{ cm}$  getestet. Unter Berücksichtigung des Eigengewichtes ergab sich ein Bruchmoment von  $65,6 \text{ kNm}$  und eine maximal aufnehmbare Prüflast von  $158 \text{ kN}$ . Für diesen Anwendungsbereich konnten alle erforderlichen Tragfähigkeitsnachweise erfüllt werden.<sup>162</sup>

Anwendung findet das Verbundmaterial vor allem bei dünnen, aber tragfähigen Schalen (für Wände, Decken), Fassadenelementen und beim Einsatz schlanker Verstärkungsschichten bei Instandsetzungen.

Moderne Trennverfahren ermöglichen weiters, dass die Beton-Carbon Verbundbauteile nach dem Ende der Nutzungszeit mit einem Reinheitsgrad von rund 97% getrennt werden. Die Recyclingprodukte können in Form von Betonrecycling und Carbonrecycling zur Herstellung neuer Bauteile wiederverwendet werden.<sup>163</sup>

Besonders das Fehlen industrieller Herstellungsmöglichkeiten von Fertigteilen aus Carbon-Beton stellt zum momentanen Zeitpunkt einen Nachteil dar. Unter anderem wird in Fertigteilwerken die Bewehrungen häufig händisch zugeschnitten und Roboter (wie Schweißroboter im Stahlbeton) sind kaum vorhanden. Ein weiterer Nachteil von Carbonbeton ist die geringe Erfahrung bezüglich des Recyclings. Auch wenn Carbon und Beton bereits getrennt und recycelt werden können, fehlen Produkte, in denen recycelte Carbonfasern genutzt werden. Darin sehen Experten einen Forschungsschwerpunkt der nächsten Jahren.<sup>164</sup>

<sup>161</sup> Vgl. MICHLER, H.: Entwicklung leichter Deckenelemente aus Carbonbeton – RESSOURCENSPPARENDES DECKEN-BAUTEIL AUS CARBONBETON, <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/TRC-C3/grundlagenforschung/C3-Bauteile>. Dresden. Institut für Massivbau, 2018 [Datum des Zugriffs: 10.02.2020].

<sup>162</sup> Vgl. BOCHMANN, J.; SCHEERER, S.: Parkhausplatte aus Carbonbeton, <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/TRC-C3/grundlagenforschung/C3-Bauteile>, 2016 [Datum des Zugriffs: 09.02.2020] (zuletzt abgerufen 28.01.2020).

<sup>163</sup> Vgl. KORTMANN, J.; KOPF, F.; HILLEMANN, L. et al.: Recycling von Carbonbeton – Aufbereitung im großtechnischen Maßstab gelungen! In: Bauingenieur, 11/2018, Jahresausgabe 2018/2019 des VDI-Fachbereichs Bautechnik, S. 38ff.

<sup>164</sup> Vgl. KORTMANN, J.; KOPF, F.: C<sup>3</sup>-V-1.13 Branchenübergreifender Einsatz von recycelten Carbonfasern aus C<sup>3</sup>-Bauteilen – In: C<sup>3</sup> - Carbon Concrete Composite e.V. und TUDALIT e.V. (Hrsg.): Tagungsband zu den 10. Carbon- und Textilbetontagen, 2018, S. 84f.

Schlussfolgernd ist zu sagen, dass der Einsatz von Carbonbeton wesentliche Vorteile in der Fertigung und Montage von Elementen und Modulen bietet. Diese ergeben sich aus der Notwendigkeit geringerer Materialeinsätze bei ähnlichen konstruktiven Eigenschaften. Des Weiteren profitieren auch der Transport und die Montage von leichten Bauelementen. Der Transport kann durch leistungsschwächere Transportmittel kostengünstiger gestaltet und die Montage durch leichtere Bauteile sicherer und schneller durchgeführt werden.

Von besonderer Relevanz für diese Masterarbeit und die in Kapitel 4 beschriebene Fertigungslinien, ist die CNC-Bearbeitbarkeit des Verbundwerkstoffes. Diese ermöglicht die Trennung von der Produktion in einen kundenunabhängigen und kundenindividuellen Teil. Dazu wird im nachstehenden Kapitel auf ein Konzept einer Fertigungslinie zur Erzeugung und Verarbeitung von Betonbauteilen eingegangen, das den Prinzipien und Charakteristika des industriellen Bauens, sowie den Anforderungen an den industriellen Bauprozess folgen soll.

## 4 Konzept einer Fertigungslinie in der Betonfertigteilherzeugung

In der Planung von Produkten und Produktionslinien im Betonbau war bis dato zu unterscheiden, welcher Grad an Flexibilität und Standardisierung an welcher Stelle der Produktion notwendig ist, um wirtschaftlich ein Sortiment an Produkten mit Individualisierungsparametern anbieten zu können. Mit Hilfe der beschriebenen Prinzipien und Charakteristika des industriellen Bauens, sowie den Anforderungen an den industriellen Bauprozess, wird nun ein Konzept zur weiteren Industrialisierung der Betonfertigteilherzeugung und -verarbeitung beschrieben und kalkuliert.

Als wesentlicher Unterschied zum industriellen Holzbau, bei dem vorgefertigte Platten in Standardmaßen auf Lager gelegt und durch Formatierungsarbeiten in die gewünschte Form gebracht werden, wird im Betonbau der Herstellungsprozess des Basisteils häufig erst nach Beauftragung durchlaufen. Dieser Zustand fordert ein hohes Maß an Flexibilität des Produktionssystems. Die Flexibilisierung von Produktionsprozessen verursacht Kosten und sollte somit auf genau definierte Bereiche, in denen sie einen merkbaren Mehrwert aus Kundensicht generieren können, eingesetzt werden.

In den einführenden Kapitel der vorliegenden Masterarbeit wurde bereits auf Produktionslinien von Betonfertigteilproduktionen näher eingegangen. Dabei wurde die Umlaufproduktion als Produktionsverfahren für die nachstehend beschriebene Fertigungslinie als geeignetes Fertigungsverfahren gewählt. Wie erläutert, nimmt der Kunde im Zuge der Ausführungsplanung und der Ableitung der Werkstattpläne Einfluss auf den gesamten Produktionsprozess der Bauteile. Durch unterschiedliche Elementtypen und Abmessungen, sowie unterschiedliche konstruktive und bauphysikalische Anforderungen, müssen alle Teilprozesse der Fertigung bis zu einem gewissen Grad individuell ablaufen. Schalung muss angepasst werden, Bewehrung in der richtigen Art, Menge und Form bereitgestellt und eingelegt werden und Beton muss in gewünschter Güte eingebracht werden. Man spricht also von Einzel- oder Kleinserienfertigungen, die die Vorteile der Massenfertigung nicht oder nur in geringem Ausmaß nutzen können.

Viele Hersteller, wie nun am Beispiel des Unternehmens KLH<sup>165</sup> erläutert, bieten am Markt vorgefertigte Elemente aus Holz an. Im Falle von KLH geschieht das in den Stärken 60 mm bis 160 mm (in 10 mm Stufen) und maximalen Längen und Breiten von 16,5x2,95 m. Dabei kann unterschieden werden, ob die Oberfläche des Holzes eine Industriesicht (mindere optische Qualität) oder eine Wohnsichtqualität aufweist (hohe optische

<sup>165</sup> Die KLH Massivholz GmbH, mit Sitz in Teufenbach, Steiermark, gehört zu den Marktführern im Bereich großformatige Brettsperrholzelemente, die als konstruktive Wand-, Decken- und Dachelemente eingesetzt und vertrieben werden

Qualität). Diese Elemente werden kundenunabhängig gefertigt, auf Lager gelegt und nach Auftragserteilung von CNC Maschinen an die Forderungen des Kunden, beispielsweise nach Format, Öffnungen, Einkerbungen für Leitungen, etc., angepasst.<sup>166</sup> Dabei wird der Herstellungsprozess der Fertigteile in einen kundenindividuellen und einen kundenunabhängigen Teil getrennt. So können Vorteile genutzt werden, die einerseits die Wirtschaftlichkeit einer Produktion durch Massenfertigung erhöhen und andererseits die Individualisierbarkeit der Bauteile durch Methoden der Mass Customization gewährleistet.

Im Zuge des 4. Kapitels wird eine Fertigungslinie beschrieben, die es ermöglicht, auch in der Herstellung von Betonfertigteilen eine Produktionstrennung (nach Kundenabhängigkeit) vorzunehmen. Das Produktionsverfahren basiert dabei auf der Umlaufproduktion. Fertigteile sollen mit dem beschriebenen Carbonbeton hergestellt und durch den Einsatz moderner Informationstechnologien, im Speziellen mit Hilfe der CNC-Bearbeitung, verarbeitet werden können.

Wie im einführenden Kapitel dieser Masterarbeit erwähnt, gliedert sich die Beschreibung und Kalkulation der Fertigungslinie in die laufende Forschungsarbeit von DI Gernot Parmann und dem Unternehmen +Ultra ein. In seiner Forschungsarbeit beschäftigt er sich mit der Gestaltung einer ganzheitlich industriellen Organisation, deren zentraler Bestandteil eine Fertigungsproduktion ist. Der Aufbau der Analyse dieser Fertigungsproduktion geschieht anhand des nachstehend beschriebenen Schemas. In dieser Masterarbeit werden zur Kalkulation der Fertigungslinie die Punkte zwei und drei behandelt.

1. Darstellung des Produktes im Produktionsmodell: Abbildung und Beschreibung der essenziellen Schritte eines Durchlaufs des betrachteten Produktes
2. **Darstellung der Prozesskette** zur Herstellung und Verarbeitung des Produktes: Zerlegung des Modells in einzelne Prozesse. Beschreibung der Prozesse und Bewertung ihrer Einflüsse auf die Wertschöpfung
3. **Ermittlung der Stückkosten und Herstellungsdauern**
  - Quantifizierung der einzelnen Prozesse
  - Verkettung der Prozesse zur Erhebung von Durchlaufzeiten und Kosten für die Herstellung eines Stücks des betrachteten Produktes
  - Visualisierung der Kostenentwicklung

---

<sup>166</sup> Vgl. KLH: Plattentypen – Oberflächen & Kenndaten, <https://www.klh.at/plattentypen-oberflaechen-kenndaten/#plattentypen> [Datum des Zugriffs: 29.01.2020].

4. Iterative Identifikation von Engpässen und Berechnung der Flaschenhalszuschläge.
5. Adaption des Modells, einzelner Prozesse oder Anlagen. Wiederholen der Schritte 1-4 nach Notwendigkeit
6. Übergabe der Werte an die digitale Simulation (PlantSim)
7. Auswertung und Bewertung der Simulation. Identifizierung von Engpässen, Durchlaufzeiten, Maschinenstunden, Ressourcennotwendigkeiten, etc.
8. Adaption des Produktionsmodells und Anpassung der Ressourcenplanung mit gewünschtem Verhältnis zwischen Quantitäten und Kosten zu ermitteln, Sensitivitätsanalyse der getroffenen Annahmen (Auslastung, Ressourcenplanung, etc.)

Die weitere Analyse der Fertigungslinie findet teilweise nach Vollendung dieser Masterarbeit statt, weswegen Teilergebnisse präsentiert werden. In weiteren Schritten, die zeitlich nach dieser Masterarbeit durchgeführt werden, findet die Auswertung der Herstellkosten- und Durchlaufzeitberechnung statt. Danach wird das Modell adaptiert und die Ergebnisse der Berechnung einer digitalen Produktionssimulation übergeben. Letztlich finden Auswertungen dieser Simulation, sowie Bewertungen der Ergebnisqualität der Produktion statt. Definiert werden dabei Schlüsselstellen die große Auswirkungen auf die Produktqualität und das Wahrnehmen des Produktes und der Produktion auf den Kunden ausüben. Durch detaillierte Beschreibungen und Definitionen von Anforderungen der Struktur- und Prozessqualität sollen die Ansprüche des Marktes erfüllt werden. Strukturelle Handlungsmaßnahmen ergeben sich dabei in den Bereichen der personellen und materiellen Ressourcen, sowie bei Anlagen, der Arbeitsumgebung, uvm. Ergänzt werden kann die Analyse der Fertigung durch einen praktischen Testdurchlauf in dem reale Ressourcen eingesetzt, die Produktion erprobt, Ergebnisse überprüft und Prozesse adaptiert werden können.

Die Beschreibungen und Analysen des Modells und der Prozesse in den nachstehenden Kapiteln beziehen sich auf die Bewertung und die Kennzahlenermittlung der Faktoren Zeit und Kosten. Dabei werden in jedem Kapitel Beispiele zur Veranschaulichung des Vorgehens der Analyse beschrieben. Alle weiteren Kalkulationen sind dem Anhang, der sich in Anhang 8.1, Übersichtblatt der Kalkulation, und Anhang 8.2 bis 8.8, den Kalkulationsblättern der Prozesse gliedert, zu entnehmen.

#### **4.1 Fertigungslinie**

In diesem Kapitel wird das Konzept der Fertigungslinie vorgestellt. Dazu folgt die Einordnung der Fertigungslinie in die Prozessübersicht der Pro-

duktion und die Beschreibung des wesentlichen Kernprozesses zur Erzeugung und Verarbeitung von kohlefaserbewehrten Betonbauteilen. Anschließend wird eine beispielhafte Platte beschrieben, die im Fertigungsprozess hergestellt werden soll. Diese Beschreibung der beispielhaften Platte umfasst das grundlegende Format und die herzustellenden Aussparungen und Bohrungen. Abschließend wird in diesem Kapitel auf die Anlagen der Fertigungslinie eingegangen, die die Erzeugung der beispielhaften Platte und verschiedene Manipulationen ermöglichen.

In nachstehender Abbildung 19 wird ein vereinfachter Überblick über die Abfolge der Prozesse dargestellt, dessen wesentlicher Bestandteil der Fertigungshallenprozess ist. Dieser stellt den Kernprozess der Produktion dar. Er wird durch die Produktentwicklung, die auf Basis eines Kundenauftrages produzierbare Erzeugnisse entwirft, ausgelöst und bedient sich zur Herstellung von Produkten an Führungs- und Unterstützungsprozessen. Ihm nachgestellt, ist die Montage, in der erzeugte Elemente an die auftragsabhängigen Spezifika, wie dem Zusammenfügen von Fertigteilen zu Modulsystemen, angepasst werden können. Rückkopplungen aus dem Fertigungshallenprozess, der Montage und der Produktauslieferung, dargestellt als Pfeile, symbolisieren Informationen, die der Produktentwicklung zur kontinuierlichen Verbesserung der angebotenen Produkte und Leistungen dienen. Die Beschreibung und Berechnung der Prozesse und Tätigkeiten, die innerhalb des Fertigungshallenprozesses ablaufen, sind wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit. Auf diese wird in den nachstehenden Kapiteln eingegangen.

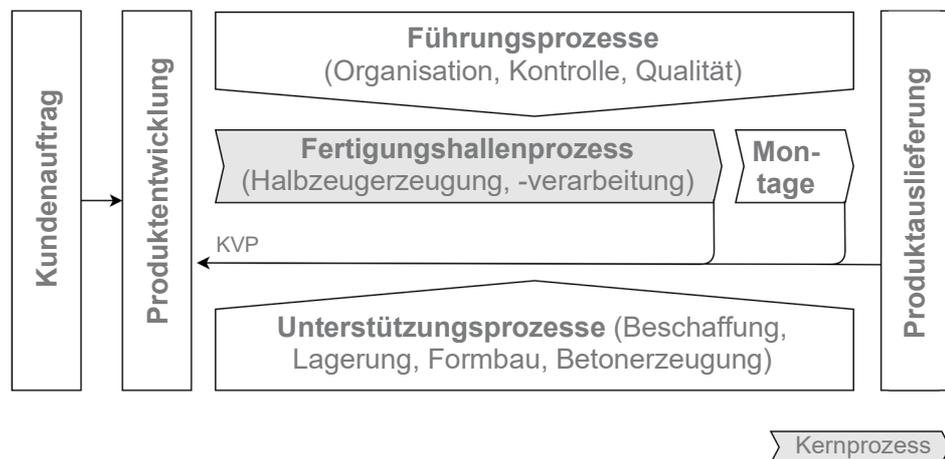


Abbildung 19: Prozessübersicht

Zur Erläuterung der Fertigungslinie, die zentraler Bestandteil des Fertigungshallenprozesses ist, wird die Abfolge der Prozesse anhand einer beispielhaft erzeugten und verarbeiteten Referenzplatte durchgeführt. Die Basis dieser Platte ist das in Kapitel 3.4 beschriebene Material Carbonbeton, einem Verbundwerkstoff aus Beton in Kombination mit Kohlefasern

als Bewehrungsmaterial. Die Platte ist mit nachstehenden Spezifika herzustellen:<sup>167</sup>

- Abmessungen 2,60x2,41x0,02 m
- Formatierungen:
  - Format: Anzahl der Schnitte und Zuschnitt in mm: 1x2600, 1x2410
  - Bohrungen: Anzahl, Durchmesser mit Schnittlänge (s) in mm:  
1xD70 mit s=20, 2xD68 mit s=40, 1xD60 mit s=20, 1xD36 mit s=20, 10xD30 mit s=200, 2xD12 mit s40
  - Schleifen und Schneiden, Abmessungen mit Schnittlänge (s) in mm: 235x235 mit s=940 mm, 430x76 mit s=582

Diese Referenzplatte wird im Zuge der nachstehend beschriebenen Fertigungslinie, die wesentlicher Bestandteil des Fertigungshallenprozesses ist, erzeugt und verarbeitet. Um in weiterer Folge auf die Berechnung der Herstellkosten der Referenzplatte eingehen zu können, wird nun zuerst auf die Prozesse der Fertigungslinie eingegangen, bevor deren Tätigkeiten und Tätigkeitsdauern im nächsten Kapitel beschrieben werden.

Der Fertigungshallenprozess gliedert sich im Ablauf der Fertigungslinie in die beiden nachstehenden Teile, die in Abbildung 20 dargestellt sind:

- Halbzeugerzeugung (kundenunabhängiger)
- Halbzeugverarbeitung (kundenabhängiger)

In der folgenden Abbildung 20 werden diese beiden Teilprozesse des Fertigungshallenprozesses anhand der zu fertigenden Platte näher erläutert. Der Erzeugungsprozess der Halbzeuge orientiert sich inhaltlich an der Umlauffertigung. Es laufen Schalungs-, Bewehrungsherstellungs- und Betoniervorgänge ab, die im Wesentlichen die Halbzeugerzeugung darstellen. Dazu durchläuft die betrachtete Referenzplatte die in Abbildung 20 dargestellten Prozesse Pultrusion<sup>168</sup>, Harfenfertigung<sup>169</sup> (gemeinsam bilden sie die Bewehrungsherstellung) und den Prozess am Schaltisch. Der Prozess des Schaltisches stellt die Arbeit des Schalroboters dar, der standardisierte Alu-Schalungen positioniert, die Grundplatte reinigt und ölt, und Einbauteile positionieren kann. Abgeschlossen wird die Halbzeugerzeugung mit der Betonage am Schaltisch, wo Rohstoffe und bereits hergestellte oder zugekaufte Teile zum Halbzeug verarbeitet werden. Bevor

<sup>167</sup> Die Daten zum Format, sowie die Abmessungen und Manipulationen werden vom Unternehmen +Ultra zur Verfügung gestellt und werden für die weiteren Berechnungen herangezogen.

<sup>168</sup> Beim Pultrusionsverfahren handelt es sich um ein kontinuierliches Herstellungsverfahren zur Fertigung von faserverstärkten Kunststoffprofilen, wobei sich für die Bewehrungsherstellung im Betonbau vor allem die Kombination aus Epoxidharzen als Matrixgeber und Kohlefasern aufgrund der hohen (Dauer-) Festigkeit und Temperaturbeständigkeit bewährt hat.

<sup>169</sup> Im Zuge der Harfenfertigung werden Lamellen aus den faserverstärkten Kunststoffprofilen. Endprodukt ist die sogenannte CFK-Bewehrung

sie der Halbzeugverarbeitung übergeben werden, härten die Produkte aus, werden nachbehandelt und geprüft. Das erzeugte Halbzeug kann dann entweder eingelagert werden, um Sie nach Kundenbeauftragung weiterzuverarbeiten, oder direkt dem nächsten Prozess übergeben werden. Im Zuge der Formatierung, die die Halbzeugverarbeitung und den zweiten Kernprozess der Produktionsfertigung darstellt, können die erzeugten Elemente an kundenindividuelle Forderungen, beispielsweise nach bestimmten Formaten und Abmessungen angepasst werden. Die betonierte Platte kann anschließend zur weiteren Bearbeitung zwischengelagert oder direkt der Auslieferung übergeben werden. Diese Prozesse werden in der nachstehenden Abbildung 20 visualisiert und in Kapitel 4.2 und 4.3 in Bezug auf die durchzuführenden Tätigkeiten näher beschrieben. Weiters wird abgebildet, welche Anlagen die beiden Hauptprozesse des Fertigungshallenprozesses (Halbzeugerzeugung und -verarbeitung) umfassen.

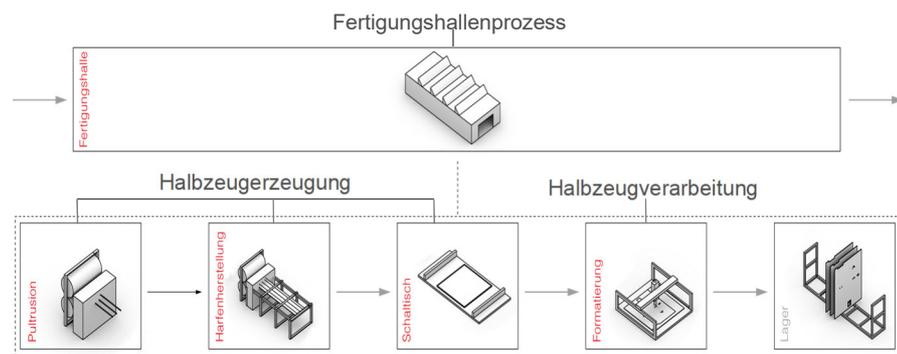


Abbildung 20: Fertigungslinie

Nach Abhandlung dieser Fertigungslinie können weitere Prozessschritte, wie Fertigungsbereiche für ausführende Unternehmen oder (End-) Montagefertigungen, folgen. Alle Hauptprozesse der Fertigungslinien orientieren sich weitestgehend an den einzelnen Verarbeitungsschritten und den dazugehörigen Anlagen, wobei jeder dieser Schritte in weitere Teilprozesse und Tätigkeiten unterteilt werden kann.

Die Beschreibungen der Tätigkeiten, die im Zuge der Prozessabhandlung von den Anlagen durchgeführt werden und die der Kalkulation in Kapitel 4.3 als Grundlage dienen, sind Teil beider nachstehenden Kapitel.

## 4.2 Prozesse der einzelnen Anlagen

Zur detaillierteren Prozessbeschreibung und als Basis der Kennzahlenerhebung, werden einzelne Prozesse beispielhaft angeführt, zerlegt, kategorisiert und in Bezug auf entstehende Kosten und Dauern quantifiziert. Durchgeführt werden diese Schritte für alle Hauptprozesse, deren Ergebnisse als Teil der Kalkulationen im Anhang zu finden sind. Grafiken in den

folgenden Kapiteln beziehen sich stets auf eine von drei möglichen Ebenen, die der folgenden Liste zu entnehmen sind:

1. Modellebene: Nimmt Bezug auf das gesamte Modell und bedient sich an den Ergebnissen der Zusammenarbeit der einzelnen Prozesse und definiert Schnittstellen in der Zusammenarbeit mehrerer zusammengefasster Prozesse.
2. Prozessebene: Zerlegt das Modell in einzelne Prozesse. Tätigkeiten werden innerhalb dieser gebündelt und Kennzahlen auf Basis der Tätigkeitsebene werden erhoben.
3. Tätigkeitsebene: Teilt Prozesse in einzelne Tätigkeiten. Die Genauigkeit von Kennzahlen ist in Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad und der verursachungsgerechten Zuordnung aller Tätigkeiten

Diese drei aufeinander aufbauenden Stufen und ihre Zusammenhänge sind in der nächsten Abbildung 21 visualisiert. Die Kategorisierung der Prozess-, beziehungsweise Tätigkeitsschritte zur späteren Kalkulation, folgt den Gruppen Primär- und Sekundtätigkeiten. Primärtätigkeiten (rot) umfassen alle jene Einsätze, die der Wertschöpfung eines Produktes innerhalb seiner Entwicklung und Produktion dienen. Auf Maschinenebene sind Primärtätigkeiten alle Veränderungen die Werkzeuge an Werkstücken, beispielsweise Montieren, Betonieren, Drehen, Fräsen, Schleifen, durchführen. Globaler betrachtet handelt es sich um Arbeitskosten (Löhne, Gehälter), Materialkosten (Hilfs-, Betriebsstoffkosten), Betriebsmittelkosten (Fuhrpark, Maschinen), sowie Fremdleistungskosten. Sekundärtätigkeiten (grau) beinhalten alle aufgrund angewandter Methoden, Technologien, Techniken und Maßnahmen entstandenen Einsätze zur Leistungserbringung, die dem Produkt keine oder im Verhältnis zu den entstandenen Kosten nur eine geringe Wertschöpfung liefern. Dazu gehören beispielsweise sowohl Aufwände zur Führung der Organisation als auch das Rüsten von Maschinen, der Transport von Teilen und Elementen und Lagerungen. Aus Darstellungsgründen werden Prozesse, deren Teilprozesse mehrheitlich wertschöpfend sind ebenfalls rot und im Umkehrschluss grau gekennzeichnet. Die nachstehende Abbildung 21 zeigt die Einteilung der Prozesse und Tätigkeiten zu den einzelnen Ebenen, die die Modellebene, die Prozessebene und die Tätigkeitsebene umfassen. Die Beschreibung der nächsten Prozesse und die Einteilung der einzelnen Tätigkeiten der Aufwandsart nach, wird an den Beispielen Harfenfertigung und dem Prozess am Schaltisch vorgenommen:

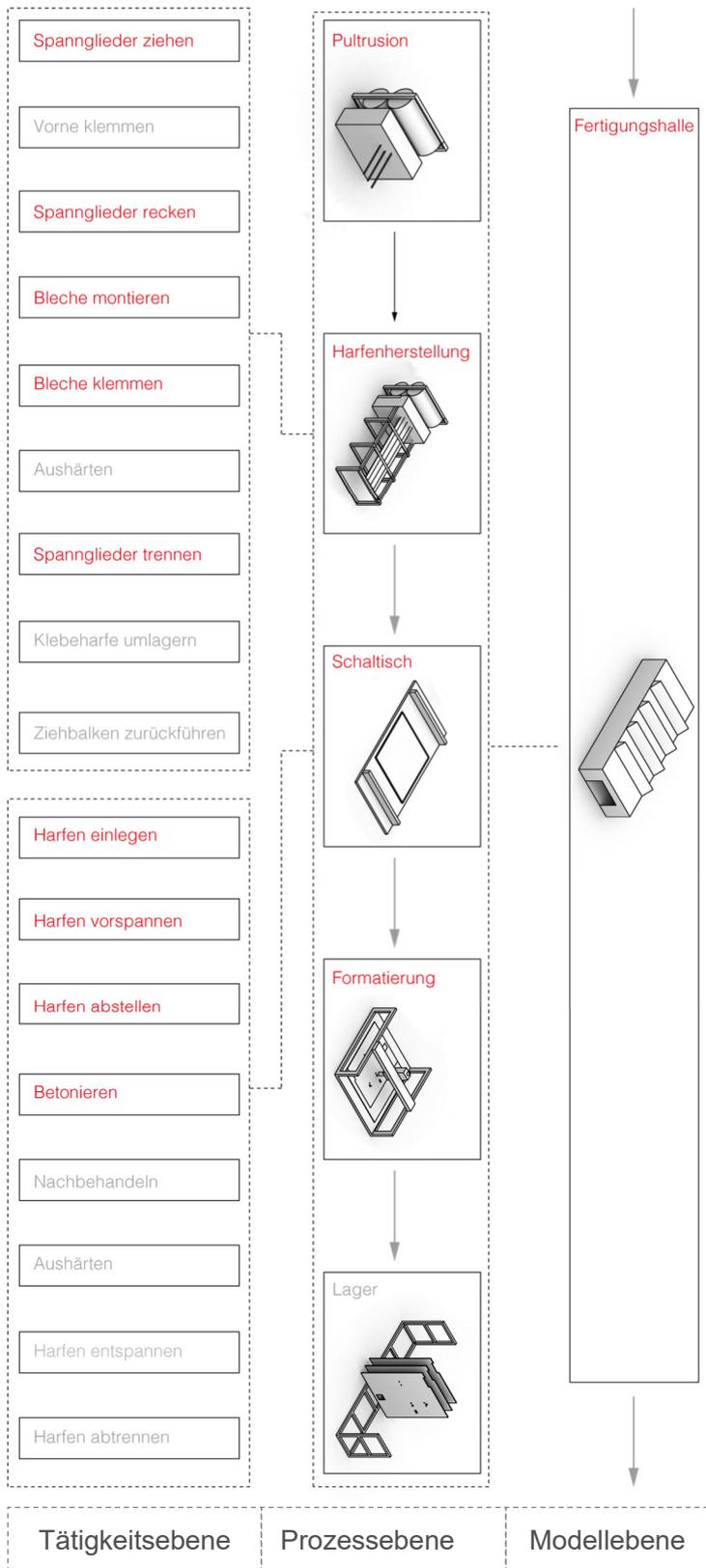


Abbildung 21: Prozesse der Harfenherstellung und des Schaltisches

Aus dem Modell der Fertigung und den in Abbildung 21 dargestellten Prozessen werden nun die zur Produktion notwendigen Tätigkeiten beschrieben, um diese in weiterer Folge mit Durchlaufzeiten und Kosten zu versehen. Diese Quantifizierung der Prozesse soll einen ersten Anhaltspunkt zur Wirtschaftlichkeit liefern und eine Bewertung der Tätigkeiten zur Einschätzung ihres Beitrages zur Wertschöpfung angeben.

Start der Plattenfertigung ist das Pultrusionsverfahren, auch Strangziehverfahren genannt, das zur Prozessbetrachtung genauer beschrieben wird. Beim Pultrusionsverfahren handelt es sich um ein kontinuierliches Herstellungsverfahren zur Fertigung von faserverstärkten Kunststoffprofilen, wobei sich für die Bewehrungsherstellung im Betonbau vor allem die Kombination aus Epoxidharzen als Matrixgeber und Kohlefasern aufgrund der hohen (Dauer-) Festigkeit und Temperaturbeständigkeit bewährt hat. Dabei wird, wie in Abbildung 22 dargestellt, Armierungsmaterial (Verstärkungsmaterial sind Kohlefasern) von Rollen kontinuierlich abspult und durch einen Führungskopf in eine beheizte Anlage gezogen. Dort werden die Fasern mit Epoxidharz imprägniert, wobei der Verbund von Fasern und Harz durch Wärmebehandlungen beim Aufbringen des Harzes hergestellt wird. Dieser Prozess ist in nachstehender Abbildung 22 durch die zentral positionierte Anlage, die mit einem Injektionspfeil für Harz versehen ist, visualisiert. Nach dem Aushärten zieht eine Zugvorrichtung (Abzieher) die ausgehärteten Profile ab und transportiert sie zu einer Säge, um den gewünschten Längenzuschnitt der Verbundfasern herzustellen.<sup>170</sup>

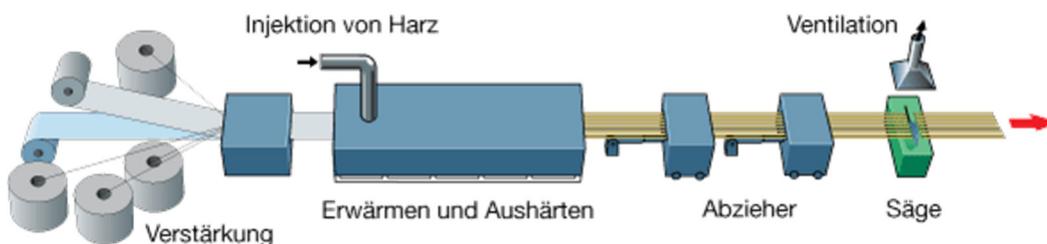


Abbildung 22: Pultrusionsverfahren<sup>171</sup>

Die zur Pultrusion notwendigen Tätigkeiten sind zum Zeitpunkt der Verfassung der Arbeit noch nicht genau genug definiert. Anhand des Produktdatenblattes der Pultrusionsmaschine, der vom Hersteller<sup>172</sup> angegebenen Ausbringungsmenge und benötigten Bewehrungsmenge der Referenzplatte, wird deshalb berechnet, wie lange der gesamte Pultrusionsprozess dauert. Dieser Wert ergibt sich bei einer Filamentausbringungsmenge von 450 lfm/h zu rund 79 Minuten. Diese Dauer ist im Anhang 8.1,

<sup>170</sup> Vgl. FIBERLINE A/S: Fiberline Pultrusionsanlage, <https://fiberline.de/%C3%BCber-fiberline/komposit/pultrusion/pultruding/> [Datum des Zugriffs: 26.01.2020].

<sup>171</sup> P + H PLÜSS: Faserverbund-Profile Aufbau und Herstellung, <http://www.pluessag.ch/de/technische-informationen/cf-gfk-aufbau-herstellung.html> [Datum des Zugriffs: 26.01.2020].

<sup>172</sup> PULTREX Ltd.: Pultrusion Machinery – Capacity Chart, <https://pultrex.com/wp-content/uploads/2019/03/Company-Profile-Pultrusion-19-2.pdf>, 2019, S. 2 [Datum des Zugriffs: 07.03.2020].

der Kalkulationsübersicht, dem Fertigungsschritt der Pultrusion zugeordnet.

Nach der Pultrusion beliefert ein Transportsystem die Harfenherstellung mit den kohlefaserverstärkten Kunststofffilamenten (kurz CFK) und die richtige Anordnung der Fasern wird eingeleitet. Dabei werden aus den einzelnen Filamenten aus dem Verbundwerkstoff CFK Lamellen hergestellt, die dem Prozess am Schaltisch als Bewehrung übergeben werden können. Für den Prozess der Harfenfertigung ergeben sich folgende durchzuführende Tätigkeiten, die ebenfalls in den Fertigungsschritten des Anhangs 8.1, der Kalkulationsübersicht, gelistet und mit den jeweiligen Tätigkeitsdauern beschrieben sind. Sie umfassen das Ziehen der Fasern in den Spanngliedern, das Vorbefestigen der Fasern durch Vorklemmen und das anschließende Recken (Spannen) der Spannglieder, um die Fasern in die erforderliche Position zu bringen. Danach werden Bleche zur Befestigung der Fasern montiert, geklemmt und verklebt. Abschließend härten die Fasern aus, bevor die Spannglieder wieder getrennt und die Fasern wieder entspannt werden.<sup>173</sup> Diese Tätigkeiten sind im Anhang 8.1, der Kalkulationsübersicht im Fertigungsschritt der Harfenfertigung gelistet. Anschließend beliefert wieder ein Transportsystem den Schaltisch mit der hergestellten CFK-Bewehrung.

Im Anhang 8.1 teilt sich der nun folgende Prozess am Schaltisch in die Teilprozesse Plattenfertigung Teil 1, Aushärten und Plattenfertigung Teil 2 auf. Dies geschieht um im Zuge der Kalkulation des Prozesses, den Aushärtungsteilprozess des Betonbauteils gesondert berechnen zu können. Das Unternehmen +Ultra sieht vor, den Aushärtungsprozess in der Zeit, in der kein Schichtbetrieb abläuft, durchzuführen. In der Plattenfertigung 1 am Schaltisch wird die aus der Harfenfertigung kommende Bewehrung und die Distanzhalter der beiden Bewehrungslagen zuallererst in die Schalungselemente eingelegt, um diese danach vorzuspannen. Nachdem die Schalungselemente und die Bewehrung am Schaltisch abgestellt wurden, kann der Frischbeton eingebracht werden. Unter der Annahme, dass der notwendige Beton der Güte und Menge nach zeitgerecht aus der eigenen Produktion gefördert werden kann, härtet das Verbundprodukt aus und wird nachbehandelt. Danach wird im Zuge der Plattenfertigung Teil 2 die Anlage, die die Bewehrung im ersten Teil der Plattenfertigung vorgespannt hat, wieder entspannt und die überstehenden Bewehrungslamellen werden abgetrennt.

Die Tätigkeiten des Prozesses am Schaltisch, der in die Teilprozesse Plattenfertigung Teil 1, Aushärten und Plattenfertigung Teil 2 unterteilt wurde, sind der nachstehenden Liste zu entnehmen, die auch im Anhang 8.1, der Kalkulationsübersicht, unter den Fertigungsschritten wiederzufinden sind. Die Summen der Tätigkeitsdauern zur Produktion einer einzelnen Platte, die innerhalb des Schichtbetriebes, also ohne dem Aushärtungsprozess,

---

<sup>173</sup> Tätigkeitsangabe und Dauern des Prozesses Harfenfertigung wurden vom Unternehmen +Ultra zur Verfügung gestellt.

ablaufen, ergeben sich auf **82,75 min**. Der gesamte Prozess am Schaltisch, inklusive des Aushärtungsteilprozesses, beläuft sich auf **922,75 min**. Diese Dauern sind für die weitere Kalkulation in Kapitel 4.3 von Relevanz, um mit Hilfe der Maschinenstundensätze die Berechnung der Stückkosten zu ermöglichen.

Fertigungsschritt	Fertigungsschritt	Dauer [min]	Summe Prozessdauern im Schichtbetrieb [min]
<b>Plattenfertigung Teil 1</b>	Einlegen	4	
	Vorspannen	20	
	Abstellen	5	
	Betonieren	11,75	
	Nachbehandeln	10	50,75
<b>Aushärten</b>	Aushärten	840	
<b>Plattenfertigung Teil 2</b>	Schalung reinigen	10	
	Entspannen	12	
	Abtrennen	10	22
<b>Summe</b>		922,75	82,75

Tabelle 4: Tätigkeiten, Beziehungen und Dauern des Prozesses Schaltisch

Nach dem Prozess am Schaltisch kann die Platte über das Transportsystem entweder in ein Lager oder direkt zum nächsten Prozess, der Halbzeugverarbeitung, befördert werden. Entsprechend ausgelegte Pufferäume ermöglichen die Vorproduktion von Platten auf Lager.

Da die Prozesse der Halbzeugherzeugung, nämlich die Pultrusion, die Harfenfertigung und der Prozess am Schaltisch beschrieben wurden, folgt nun die Erläuterung der in Abbildung 20 dargestellten Halbzeugverarbeitung. Im Zuge der Halbzeugverarbeitung finden in erster Linie die formatgebenden Prozesse, Zerspanungen und die Vorbereitung der Platte für Anbauteile statt. Werkzeugmaschinen die mittels Zerspantechnik, respektive Drehen, Fräsen und Bohren Späne von Bauteilen abtrennen, stellen dabei die festgelegten Abmessungen her und führen eingegebene Operationen durch. Ausgestattet mit Hebe- und Werkzeugwechselfunktionen ermöglicht der Prozess Formatierung flexible Fertigungsschritte, die mit durchgehend automatisierten Prozessen ablaufen. Dadurch können auch komplexere, dreidimensionale Bauteile qualitativ, ohne dem Eingreifen von Menschen zügig gefertigt werden.

Zur Herstellung des Formates der Platte in Bezug auf die Abmessungen 2,60x2,41x0,02 m, den Bohrungen, sowie den Ausnehmungen folgt nun die Erläuterung der dazu notwendigen Tätigkeiten der Anlage. Diese sind in Tabelle 5, die ein Auszug aus dem Fertigungsprozess Formatierung aus dem Anhang 8.1, der Kalkulationsübersicht, ist, gelistet. Neben den Tätigkeiten werden Verarbeitungsformate, Bewegungsgeschwindigkeiten des CNC-Roboters, sowie die Schnittlängen und die daraus berechneten Dauern der Tätigkeiten tabellarisch erfasst. Die Tätigkeiten des Prozesses der Formatierung sehen zuallererst das Sichern der Platte in der CNC-Maschine vor. Anschließend folgt die Referenzierung des zu bearbeitenden Elements, bei der die Anlage die genaue Position des Bauteils ermittelt,

um Manipulationen mit möglichst geringen Abweichungen durchführen zu können. Der Werkzeugwechsel beschreibt das automatische Tauschen von Ausrüstungen zur Bearbeitung der Platte. Das Bearbeiten der Platte umfasst Bohren, Schleifen und Schneiden. Abschließend werden Bearbeitungen, wie das Nachbehandeln von Ecken, an der Platte durchgeführt. Die Summe der Dauern errechnet sich aus der Addition der Einzelschritte. Für den Werkzeugwechsel relevante Bohrdurchmesser, sowie die Anzahl der Wiederholungen sind ebenfalls beschrieben. Die Dauern der einzelnen Tätigkeiten errechnen sich über folgenden Zusammenhang:

$$t = a * s / v$$

- $t$ : Zeit [min]
- $a$ : Anzahl der Wiederholungen [-]
- $s$ : Schnittlänge [mm]
- $v$ : Bewegungsgeschwindigkeit [mm/min]

Prozess Einheit	Format/ Werkzeug	a #	v mm/min	s mm	t min
Sichern					1,00
Referenzieren					1,00
Werkzeugwechsel					0,35
Eilgang			40000	2400	0,06
Bohren	D70	1	70	20	0,29
Werkzeugwechsel					0,35
Eilgang			40000	2400	0,06
Bohren	D68	2	70	40	0,57
Werkzeugwechsel					0,35
Eilgang			40000	2400	0,06
Bohren	D60	1	70	20	0,29
Werkzeugwechsel					0,35
Eilgang			40000	2400	0,06
Bohren	D36	1	100	20	0,20
Werkzeugwechsel					0,35
Eilgang			40000	2400	0,06
Bohren	D30	10	40	200	5,00
Werkzeugwechsel					0,35
Eilgang			40000	2400	0,06
Bohren	D12	2	130	40	0,31
Werkzeugwechsel					0,35
Eilgang			40000	2400	0,06
Zuschneiden		1	110	2600	23,64
Zuschneiden		1	110	2410	21,91
Werkzeugwechsel					0,35
Eilgang			40000	3600	0,09
Schleifen, Schneiden	235x235	1	110	940	8,55
Schleifen, Schneiden	430x76	1	110	582	5,29
Nachbereitung					2,00
Summe					73,36

Tabelle 5: Berechnung der Dauern des Formatierungsprozesses

Die Summe der Vorgangsdauern beläuft sich auf **73,36 min**. Dieser Wert kann im Anhang 8.1, der Kalkulationsübersicht, in der Tabelle der Fertigungsschritte bei der Dauer des Prozesses Formatierung wiedergefunden werden und dient der Berechnung der Maschinenkosten im Kapitel 4.3.

Nach der Formatierung befördert das fahrerlose Transportsystem das Produkt in ein Zwischenlager, von wo aus (End-)Montagen und Mietzonen beliefert werden, auf deren genauere Beschreibung noch eingegangen wird.

Im nachstehenden Kapitel wird nun auf die Kalkulation der in diesem Kapitel beschriebenen Prozesse und Tätigkeiten eingegangen. Dazu wird genauer auf die Berechnung der Maschinen-, Material- und Personalkosten eingegangen.

#### **4.3 Kalkulation der industriellen Fertigungslinie**

Die beispielhaft durchgeführte Kalkulation der Herstellkosten der Referenzplatte dient als Diskussionsgrundlage für weiterführende Analysen zur Produktionsgestaltung. Ihr liegt die sequenzielle Abhandlung von Prozessen zugrunde und sie gibt erste Anhaltspunkte zu wirtschaftlichen Kennzahlen bei der Fertigung von kohlefaserbewehrten Bauteilen in der Fertigungslinie. Nachstehend wird auf Basis der Beschreibungen der Hauptprozesse aus Kapitel 4.2 nun auf die Kalkulation der jeweiligen Tätigkeiten eingegangen. Dazu werden die Maschinen-, Material- und Personalkosten der Hauptprozesse und Tätigkeiten, die im Anhang 8.1, der Übersicht der Kalkulation, gelistet sind, ermittelt. Die Berechnungen der Hauptprozesse sind den Anhängen 8.2 bis 8.8 zu entnehmen. Diese umfassen die Prozesse, die in Abbildung 21 gelistet wurden und ergänzen diese um die Transportmittel, die die Platte in der Fertigungslinie bewegen:

- 8.2 Pultrusion
- 8.3 Harfenfertigung
- 8.4 Schaltisch: Plattenfertigung I & II
- 8.5 Hebetchnik (zum Transport der Platte zwischen einzelnen Anlagen)
- 8.6 Formatierung
- 8.7 Lagerung
- 8.8 Fördertechnik (zum Transport der Platte zwischen den einzelnen Anlagen)

Als Randbedingung der Kalkulation einer Platte wird die Vollausslastung aller Maschinen angesetzt. Diese vorerst für die Bauproduktion nicht umsetzbar scheinende Annahme wird durch folgende Maßnahmen angenähert: im Schritt der Computersimulation der gesamten Fertigung wird

durch die quantitative Planung der Ressourcen und ihrer Durchsatzkapazitäten, sowie durch Lager, Puffer und Auftragsparallelisierung versucht der Vollausslastung nahezukommen. Der entgehende Deckungsbeitrag durch nicht verarbeitetes Material und nicht eingesetztes Personal bleibt in dieser ersten Annahme unberücksichtigt.

In einem iterativen Schritt können später die sich ergebenden Arbeitszeiten der Maschinen aus der virtuellen Simulation angesetzt werden, um noch genauere Werte zu den entstehenden Kosten zu erhalten. Weiters findet die Kalkulation nur bis zum Wert der Herstellkosten der Produktion statt, da alle weiteren Kosten der Zuschlagskalkulation zunehmend unternehmensspezifischer oder zu diesem frühen Planungszeitpunkt nicht genau genug beziffert werden können. Für die Kostenrechnung bedeutet das, dass alle Einzel- und Gemeinkosten für Fertigung und Material berücksichtigt werden, Verwaltungs-, Vertriebs-, sowie kalkulatorische Wagniskosten und Gewinne vorerst unbehandelt bleiben. Anhand des Beispiels der Formatierungsmaschine wird die Kalkulation erläutert.

Als maßgebender Faktor der Fertigung wird zuallererst der Maschinenstundensatz, danach Material- und Personalkosten berechnet. Die ermittelten, beziehungsweise vom Roboterhersteller zur Verfügung gestellten Bearbeitungszeiten werden anschließend der Kalkulation übergeben.

Die zur Kalkulation relevanten Daten und Kosten, wurden einerseits vom Unternehmen +Ultra zur Verfügung gestellt oder durch die Recherche bei Produktherstellern ermittelt. Nachstehend wird am Beispiel der Formatierung der Ablauf des Kalkulationsschemas dargestellt. Dazu wird zuerst das Kalkulationsschema erläutert und dann auf die Quantifizierung der Tätigkeiten eingegangen. Die Kalkulation sieht eine gesonderte Betrachtung der Maschinenkosten, bestehend aus Investitions- und Betriebskosten, der Materialkosten und der Personalkosten vor. Die Berechnung der Maschinenkosten folgt dem nachstehenden Schema und wird im Anhang 8.6, Formatierung, durchgeführt.

#### **Kalkulation der Formatierung:**

Zur Kalkulation des Maschinenstundensatzes werden die kalkulatorische, lineare Abschreibung, die kalkulatorischen Zinsen, die Kosten für Instandhaltung und Reparatur, sowie Platz- und Energiekosten berücksichtigt. Es werden folgende Werte angesetzt:<sup>174</sup>

- Investitionskosten: 102.420, - € inklusive aller zum in Betrieb nehmen der Maschine notwendigen Zusatz- und Sonderkosten, wie Transport, Montage, etc.
- Leistung: 15 kWh

---

<sup>174</sup> Kostenansatz des Unternehmens +Ultra auf Basis eines 2019 eingeholten Angebotes vom Unternehmens Löffler KG.

- Abschreibungsdauer: 8 Jahre<sup>175</sup>
- Wiederbeschaffungswert nach Abschreibungsdauer: 120%<sup>176</sup>

Diese Werte finden in der linken Tabelle des Anhangs 8.6 Formatierung zur Berechnung der Investitions- und Betriebskosten Einzug. Analog dazu, sind auch die Kostenansätze und Werte der anderen Hauptprozesse in den Excel-Sheets der Anhänge 8.2 bis 8.8 eingetragen. Sie ermöglichen mit Hilfe der im rechten, oberen Bereich des Anhangs 8.1 angesetzten Arbeitsstunden, die mit 1984 Stunden pro Jahr (248 Arbeitstage, zu je 8 Stunden pro Tag) beziffert sind, die Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung und Zinsen nach dem nachstehenden Schema:

- kalkulatorische Abschreibung pro Stunde und Zeiteinheit:

$$\frac{\text{Wiederbeschaffungswert}}{\text{Nutzungsdauer} * \text{Laufstunden pro Zeiteinheit}}$$

- kalkulatorische Zinsen bei linearer Abschreibung pro Stunde und Zeiteinheit

$$\frac{\frac{\text{Anschaffungswert}}{2} * \text{Zinssatz p. a.}}{\text{Laufstunden pro Zeiteinheit}}$$

Zur Berechnung des Maschinenstundensatzes werden weiters die fixen und variablen Kosten der Instandhaltung, sowie die Platz und Energiekosten berechnet. Die Berechnung folgt dem nachstehenden Schema:

- Instandhaltungskosten vereinfacht:<sup>177</sup>
  - fixe Instandhaltungskosten pro Jahr: 2,5% der Investitionskosten
  - variablen Instandhaltungskosten pro Jahr: 2,5% der Investitionskosten
- Raumkosten pro Jahr: 13,11 €/m<sup>2</sup><sup>178</sup>
- Energiekosten: 0,30 €/kWh<sup>179</sup>

Dem im Anhang 8.6 Formatierung dargestellten Excel Blatt liegen zur Kalkulation der Werte diese Formeln zugrunde. Dabei zeigt die linke Hälfte des Anhangs die Ergebnisse der Maschinen-, Personal und Materialkostenberechnung und die rechte Hälfte die Eingabewerte, die zur Kalkulation dienen. Auf beide Bereiche wird im Folgenden eingegangen.

<sup>175</sup> Vgl. Bundesministerium für Finanzen: AfA-Ta-bel-le für den Wirt-schafts-zweig "Ma-schi-nen-bau" – IV D 2-S 1551-470/01, [https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere\\_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle\\_Maschinenbau.html](https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Maschinenbau.html), 2001.

<sup>176</sup> Ansatz des Unternehmens +Ultra

<sup>177</sup> Ansatz des Unternehmens +Ultra

<sup>178</sup> Ansatz des Unternehmens +Ultra

<sup>179</sup> Vgl. <https://durchblicker.at/kwh-preis> [Zuletzt abgerufen 05.03.2020]

Der sich aus dem obenstehenden Kalkulationsschema ergebende Maschinenstundensatz für den Formatierungsprozess beläuft sich auf rund **15,78 €/h**. Dieser errechnet sich aus der Summe der Kosten aus kalkulatorischer Abschreibung, kalkulatorischen Zinsen, Platz- und Energiekosten, sowie den Kosten für Instandhaltung und Reparatur. Daraus ergeben sich fixe Kosten von 20.770,80 € pro Jahr und variable Kosten von 10.538,51 € pro Jahr. Dividiert man diese Kosten durch die Arbeitsstunden pro Jahr, ergibt sich ein Maschinenstundensatz von 15,78 €/h für den Prozess Formatierung. Dieser Wert findet sich in Anhang 8.6 Formatierung in der linken Hälfte unter der Überschrift Fixe & Variable Kosten als Maschinenstundensatz wieder.

Die durch das Kalkulationsschema errechneten Maschinenkosten werden dem Anhang 8.1 Kalkulationsübersicht übergeben. Dort werden die Maschinenstundensätze mit den Tätigkeitsdauern multipliziert, um die Kosten der einzelnen Tätigkeiten der Formatierung zu erhalten. Dies geschieht für alle Prozesse (Pultrusion bis Lagerung), die im Anhang 8.1, der Kalkulationsübersicht, gelistet sind. Für den Prozess der Formatierung folgt die Darstellung der Tätigkeiten, Dauern und Maschinenkosten aus dem Anhang 8.6, der Kalkulation der Formatierung, entsprechend der nachstehenden Tabelle 5. Darin gelistet sind die durchzuführenden Tätigkeiten der Formatierung und die Bezifferung der berechneten Maschinenkosten, sowie die Material- und Personalkosten, auf deren Herkunft nach der Tabelle eingegangen wird.

Fertigungsschritt	D	Masch €/Stk	Mat €/Stk	Mit €/Stk	Σ €/Stk
1. Sichern	1	0,25	0	0,16	0,42
2. Referenzieren	1	0,25	0	0,16	0,42
3. Werkzeugwechsel	0,35	0,09	0	0,06	0,15
4. Eilgang	0,06	0,02	0	0,01	0,03
5. Bohren	0,29	0,07	0	0,05	0,12
6. Werkzeugwechsel	0,35	0,09	0	0,06	0,15
7. Eilgang	0,06	0,02	0	0,01	0,03
8. Bohren	0,57	0,14	0	0,09	0,24
9. Werkzeugwechsel	0,35	0,09	0	0,06	0,15
10. Eilgang	0,06	0,02	0	0,01	0,03
11. Bohren	0,29	0,07	0	0,05	0,12
12. Werkzeugwechsel	0,35	0,09	0	0,06	0,15
13. Eilgang	0,06	0,02	0	0,01	0,03
14. Bohren	0,20	0,05	0	0,03	0,08
15. Werkzeugwechsel	0,35	0,09	0	0,06	0,15
16. Eilgang	0,06	0,02	0	0,01	0,03
17. Bohren	5,00	1,27	0	0,82	2,09
18. Werkzeugwechsel	0,35	0,09	0	0,06	0,15
19. Eilgang	0,06	0,02	0	0,01	0,03
20. Bohren	0,31	0,08	0	0,05	0,13
21. Werkzeugwechsel	0,35	0,09	0	0,06	0,15
22. Eilgang	0,06	0,02	0	0,01	0,03
23. Zuschneiden	23,64	6,01	0	3,86	9,87

<b>24. Zuschneiden</b>	21,91	5,57	0	3,58	9,15
<b>25. Werkzeugwechsel</b>	0,35	0,09	0	0,06	0,15
<b>26. Eilgang</b>	0,09	0,02	0	0,01	0,04
<b>27. Schleifen, Schneiden</b>	8,55	2,17	0	1,40	3,57
<b>28. Schleifen, Schneiden</b>	5,29	1,34	0	0,86	2,21
<b>29. Nachbereitung</b>	2,00	0,51	0	0,33	0,84
<b>Summe</b>	<b>73,36</b>	<b>19,29</b>	<b>0</b>	<b>11,98</b>	<b>31,28</b>

Tabelle 6: Dauern und Kosten der Tätigkeiten der Formatierung

Die Summe der Tätigkeitsdauern der Formatierung ergibt sich zu **73,36 Minuten**. Die Dauern sind im Anhang 8.1, der Kalkulationsübersicht, in der Liste der Fertigungsschritte im Prozess der Formatierung eingetragen. Der Maschinenstundensatz von 15,78 €/h, der im Anhang 8.6 berechnet und in diesem Kapitel erläutert wurde, wird mit den Dauern der Prozesse multipliziert, um die Maschinenkosten der einzelnen Tätigkeiten zu erhalten. Die Summe der Maschinenkosten ergibt sich zu **19,29 €**.

Der Prozess Formatierung beinhaltet keinen Einsatz von Rohstoffen und Materialien die dauerhaft im Produkt bleiben, deshalb werden keine Materialeinzelkosten angesetzt. Die Beschreibung der Materialkostenberechnung findet deshalb nach der Beschreibung der Personalkosten und dem Überblick über die Kosten der Formatierung in Tabelle 7 statt.

Als weitere essenzielle Kostengruppe müssen Personalkosten im Sinne der Fertigungskosten berücksichtigt werden. Zu diesem frühen Zeitpunkt der Planung scheint eine Zuordnung der Personalkosten zu verschiedenen Produkten nicht zielführend. Genauere Informationen zur quantitativen Personalplanung liefert erst die computergestützte Simulation, in der Qualitätskontrollen, Wartungsintervalle, Bestellvorgänge sowie manuelle Arbeitsschritte abgeschätzt werden können. Deshalb werden zur Berechnung der Personalkosten Daten vom Unternehmen +Ultra zur Verfügung gestellt, die realen Produktionen aus dem Kundenumfeld des Unternehmens entnommen wurden. Die Personalkosten werden mittels Verteilungsschlüssel<sup>180</sup> angesetzt, der vorsieht, zwei Mitarbeiter für die Abhandlung der Prozesse Pultrusion, Harfenfertigung, Schaltisch, Formatierung und die Transportprozesse einzusetzen. Die Personalkostenansätze ergeben sich aus der Multiplikation des Stundenlohns von 35 €/h mit der Mitarbeiteranzahl und dem prozentuellen Beanspruchungsgrad der Mitarbeiter des Prozesses. Die Ergebnisse der Berechnung sind dem Anhang 8.1, dem Überblick der Kalkulation, auf der rechten Seite zu entnehmen und werden in nachstehender Tabelle 7 dargestellt. Als Beispiel dient der Prozess der Formatierung, der beide Mitarbeiter rund 15% ihrer täglichen Arbeitszeit von in Summe 16 Stunden (2 Mitarbeiter zu je 8 Stunden) beansprucht. Daraus ergibt sich ein Personalstundensatz von  $16 * 0,15 =$  **10,50 €/h**. Multipliziert man diesen Wert mit den Dauern der Tätigkeiten, die in Stunden umgerechnet werden müssen (für die Formatierung in

<sup>180</sup> Der Verteilungsschlüssel, sowie die Mitarbeiteranzahl sind vom Unternehmen +Ultra angesetzt. Die Daten sind aus realen Produktionen aus dem Kundenumfeld des Unternehmens und werden zur Kalkulation angesetzt.

Summe 73,39 Minuten oder rund 1,22 Stunden), können die Personalkosten des Prozesses errechnet werden. Diese ergeben sich für die Formatierung zu 12,84 € und sind in Anhang 8.1, der Kalkulationsübersicht, in der Tabelle der Fertigungsschritte unter den Personalkosten des Formatierungsprozesses zu finden. Nachstehende Tabelle 7 gibt, analog zum beschriebenen Vorgehen, die Werte für alle weiteren Prozesse der Fertigungslinie an.

	<b>Mitarbeiteranzahl</b>	<b>2</b>
	<b>Lohn in €/h</b>	<b>35</b>
<b>Prozesse</b>	<b>Mitarbeiterbeanspruchung in %</b>	<b>€/h</b>
<b>Pultrusion</b>	10,00%	7,00
<b>Transport (Förderung) 1</b>	5,00%	3,50
<b>Harfenherstellung</b>	15,00%	10,50
<b>Transport (Förderung) 2</b>	5,00%	3,50
<b>Plattenfertigung Teil 1</b>	20,00%	14,00
<b>Aushärten</b>	0,00%	0,00
<b>Plattenfertigung Teil 2</b>	10,00%	7,00
<b>Abheben</b>	8,00%	5,60
<b>Formatieren</b>	15,00%	10,50
<b>Einlagern (in Lager Heben)</b>	12,00%	7,00
<b>Summe</b>	100,00%	70,00

Tabelle 7: Zuordnung der Personalzeiten zu den Maschinen

Im Zuge der Formatierung fallen keine Material- oder Rohstoffkosten an, deshalb wird am Beispiel der Pultrusion verdeutlicht, wie Materialkosten in der Kalkulation ermittelt werden. Im mittleren Feld des Anhangs 8.2 findet die Materialkostenberechnung des Prozesses Pultrusion statt. Dieser Bereich ist in Tabelle 7 dargestellt und wird nachstehend erläutert.

Abhängig vom hergestellten Format des zu erzeugenden Bauelements, dessen Abmessungen in der Tabelle 8 vermerkt sind, werden Volumensanteile für Rohstoffe vergeben. Die Pultrusionsanlage kann beispielsweise ein Meter lange Fasern in einem Format von 3x0,6 mm erzeugen, wobei die Volumensanteile zu 55 % aus Carbon und zu 45 % aus Epoxidharz bestehen.<sup>181</sup> Die weitere Bezifferung der Materialkennwerte umfasst die Dichte und das daraus resultierende Gewicht der Materialien. Die Berechnung des Volumens von 3x0,6x1000 mm ergibt einen Wert von 1800 mm<sup>3</sup>. Multipliziert man diesen mit dem jeweiligen Volumenanteil und der Dichte des Rohstoffes, ergibt sich das Gesamtgewicht für einen Laufmeter der CFK Faser. Letztlich können mit dem der Preis der Rohstoffe die Kosten pro Laufmeter des jeweiligen Rohstoffes berechnet werden. Summiert man die Carbon- und Harzkosten ergeben sich die Gesamtkosten pro Laufmeter Faser. Diese sind in nachstehender Tabelle 8 dargestellt.

<sup>181</sup> Die Volumensanteile sind vom Unternehmen +Ultra auf Basis einer Auskunft von Pultrex Ltd, Lawford, GB vorgegeben.

<b>Abmessungen</b>	Breite	3,00	mm
	Höhe	0,60	mm
	Länge	1000,00	mm
<b>Volumen</b>	Volumen	1800,00	mm <sup>3</sup>
	Volumenanteil Carbon	55,00	%
	Volumenanteil Harz	45,00	%
	Volumenanteil Carbon	990,00	mm <sup>3</sup>
	Volumenanteil Harz	810,00	mm <sup>3</sup>
<b>Dichte</b>	Dichte Kohlefaser (PAN-Basis)	0,0018	g/mm <sup>3</sup>
	Gewicht Carbon	1,7820	g/lfm
	Dichte Harz	0,0011	g/mm <sup>3</sup>
	Gewicht Harz	0,8910	g/lfm
<b>Materialpreise (Zukauf)</b>	Carbonpreis	15	€/kg
	Harzpreis	6	€/kg
	Dichte Verbundwerkstoff	1600	kg/m <sup>3</sup>
<b>Gesamtkosten</b>	Carbonkosten	0,02673	€/lfm
	Harzkosten	0,00535	€/lfm
	<b>CFK-Kosten</b>	<b>0,03208</b>	<b>€/lfm</b>
<b>Materialkosten</b>	CFK-Kosten	0,24057	€/min

Tabelle 8: Materialberechnung der Pultrusion

Über die Herstellerangabe der Produktionsgeschwindigkeit<sup>182</sup>, nämlich 0,75 lfm/min mit 10 Lamellen, die eine Outputmenge von 450 lfm/h ermöglichen, können die Materialkosten mit rund **0,24 €/min**, beziehungsweise 14,43 €/h beziffert werden. Diese sind in der letzten Zeile der Tabelle 8 abgebildet, die einen Auszug aus der Kalkulation der Pultrusionsanlage aus Anhang 8.2 darstellt.

Zu den unberücksichtigten Materialgemeinkosten zählen alle Kosten, die ebenfalls der Verwaltung zugeordnet werden können. Beispiele dafür sind Mieten für Büros, sowie alle Kosten, die im Zusammenhang mit dem Bestellen von Materialien in Zusammenhang stehen.

Dieses Kapitel ist auf die Berechnung der Maschinen-, Material- und Personalkosten des Formatierungsprozesses eingegangen. Die Berechnungen der weiteren Prozesse der Fertigungslinie folgen dem gleichen Schema und sind in den Anhängen 8.2 bis 8.8, den Prozesskalkulationen, dargestellt. Im nachstehenden Kapitel folgt die Darstellung der Entwicklung dieser Kosten.

<sup>182</sup> Vgl. PULTRIX Ltd.: Pultrusion Machinery – Capacity Chart, <https://pultrex.com/wp-content/uploads/2019/03/Company-Profile-Pultrusion-19-2.pdf>, 2019 [Datum des Zugriffs: 07.03.2020].

#### 4.4 Kostenentwicklung und Wertschöpfung

Auf Basis der Kalkulationsübersicht im Anhang 8.1, in dem die einzelnen Prozesse und Tätigkeiten der Fertigungslinie gelistet und mit den errechneten Maschinen-, Personal und Materialkosten versehen sind, wird nun die Entwicklung der Kosten über die Prozessschritte dargestellt. Dazu werden in diesem Kapitel zuerst die Annahmen zur Berechnung der Kosten gelistet, bevor auf die Kostenverläufe der Prozesse eingegangen wird. Die Kostenverläufe werden beispielhaft für die Prozesse der Formatierung und dem Prozess am Schaltisch veranschaulicht. Abschließend werden die Verläufe aller Prozesse zusammengefügt, um den gesamten Kostenverlauf entlang der Durchlaufzeit eines Erzeugnisses darzustellen.

Durch das Zusammenführen der oben abgehandelten Einteilung und der Quantifizierung von Kosten mit der Kalkulation der Produktionsfaktoren können nun die Ergebnisse der Herstellkosten auf Stückkostenbasis angeführt werden. Bevor die Ergebnisse dargestellt werden ist es notwendig zu definieren, welche Annahmen und Randbedingungen der analogen Berechnung zugrunde liegen.

Unter den vorausgesetzten Bedingungen, nämlich

- dem Betrieb der Anlage in einer Schicht zu 8 Stunden pro Tag
- der Fertigung eines definierten Produktes
- der zeitgerechten Verfügbarkeit von Rohstoffen
- der einwandfreien Funktion aller Anlagen
- der Vollauslastung aller Maschinen

liefert die analoge Berechnung Werte zu folgenden wirtschaftlichen Kennzahlen:

- Herstellkosten pro Stück bestehend aus Fertigungskosten, sowie Materialeinzelkosten und teilweise berücksichtigten Materialgemeinkosten. Nicht berücksichtigt werden Fertigungs- und Materialgemeinkosten, die auch den Verwaltungskosten zugeordnet werden könnten.
- Durchlaufzeit der Produktion eines Referenzproduktes im Umlaufproduktionsverfahren, in der Prozesse in sequenzieller Reihenfolge durchgeführt werden.

Diese Kennzahlen sollen eine erste Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit des Modells liefern und mittels dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Kalkulationsschema, die Entwicklung von Produkten unterstützen. Die nachstehende Kostendarstellung ersetzt allerdings keine umfangreiche Analyse des gesamten Fertigungssystems.

Im Zuge der vorgenommenen Aufteilung und Bezifferung der Tätigkeiten in Primär- und Sekundärtätigkeiten in Kapitel 4.2, kann nun die Entwicklung der Herstellkosten auf Basis der Prozesskosten aus dem Anhang 8.1,

der Kalkulationsübersicht, beispielhaft für die Formatierung dargestellt werden. Dies geschieht anhand der Dauern der Bearbeitungsschritte und den dazugehörigen Maschinen-, Personal- und Materialkosten pro Stück.

In Abbildung 23 ersichtlich, sind die Tätigkeiten zur Durchführung des Prozesses, wobei in rot wertschöpfende und in grau nichtwertschöpfende Tätigkeiten markiert sind. Die Abszisse gibt die Zeit an, in der die Tätigkeiten der Formatierung, deren Beschreibung und Berechnung in Kapitel 4.2 vorgenommen wurde. Diese ergeben sich in Summe zu rund **73,3 min**. Aufgrund der großen Anzahl an kurzen Tätigkeiten wurden in Abbildung 23 all jene Tätigkeiten zusammengefasst, die eng aneinandergereiht sind. Das betrifft vor allem die bis zum Zeitpunkt **11,5 min** durchgeführten Bohrungen, inklusive der dazu notwendigen Bewegungen und Werkzeugwechsel. Unter den Tätigkeitsgruppen werden die Zeitpunkte, mit denen diese enden, abgebildet. Auf der Ordinate werden die Kosten bestehend aus Maschinen-, Personal- und Materialkosten dargestellt, wobei der Grafik aus Darstellungsgründen eine lineare Kostenentwicklung zugrundegelegt wurde. Die Prozesskosten ergeben sich zu **33,95 €**. Beispielhaft für die Berechnung der Kostenentwicklung einer Primärtätigkeit wird das Vorgehen anhand des Prozesses Zuschneiden, der zum Zeitpunkt 35,2 min beendet wird, auf Basis der in Kapitel 4.3 kalkulierten Kosten gezeigt. Die Tätigkeitsdauer des Prozesses, der sich nach dem Zeitpunkt 11,5 min bis zum Zeitpunkt 35,2 min erstreckt, ergibt sich zu 23,7 min. Die Berechnung dieses Wertes wurde in Kapitel 4.2 durchgeführt. Die Summe der Tätigkeitskosten, bestehend aus Maschinenkosten in Höhe von 6,80 € und 4,41 € Personalkosten ergeben sich zu **10,94 €**. Die vorangestellte Tätigkeit legt den Startpunkt des Zuschneidens in Bezug auf seine Zeit und Kosten fest. Auf diesen werden nun die Dauer von 35,2 min und die Kosten von 10,94 € aufaddiert, um zum Endpunkt des linear angenommenen Kostenverlaufs zu kommen. Die sich für die Formatierung ergebende Grafik entspricht der nachstehenden Abbildung 23 und zeigt die Herstellkostenentwicklung für alle Tätigkeiten des Prozesses.

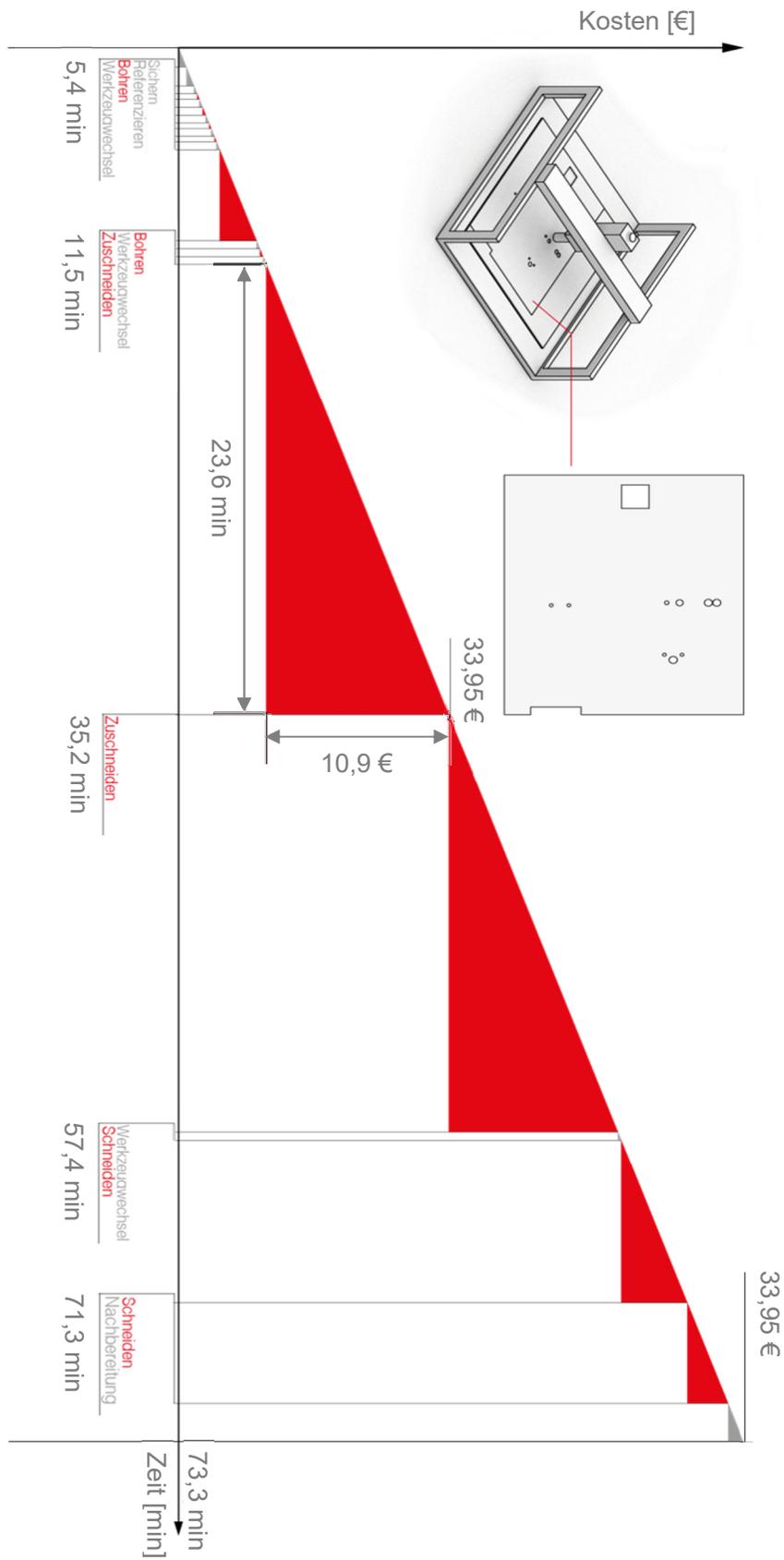


Abbildung 23: Herstellkostenentwicklung des Prozesses Formatierung

Leichte Änderungen der Steigungen zwischen Primär- und Sekundärtätigkeiten beruhen auf unterschiedlichen Ansätzen der einzelnen Kostenbestandteile. Ein Beispiel dafür ist die geringere Steigung der Sekundärtätigkeiten des Formatierungsprozesses. Im Zuge dieser werden im Wesentlichen nichtwertschöpfende Bewegungen (auch Eilgänge genannt) von der Maschine durchgeführt. Für Diese Prozesse fallen beispielsweise keine Werkzeugkosten an.

Auch für den Prozess des Schaltisches ist die Darstellung der Herstellkosten ausgearbeitet. In Abbildung 24 gezeigt, werden die Tätigkeiten der Prozesse zur Schalung, Bewehrung und Betonage der Referenzplatte. Wie in Kapitel 4.2 erläutert, wurde der Prozess am Schaltisch zur gesonderten Berechnung des Prozesses Aushärten in die Teilprozesse Plattenfertigung Teil 1, Aushärten und Plattenfertigung Teil 2 aufgeteilt. Diese Teilprozesse sind im Anhang 8.1, der Kalkulationsübersicht, in der Tabelle der Fertigungsschritte wiederzufinden. Die Plattenfertigung Teil 1 wird mit den Tätigkeiten des Prozesses durch das rote Dreieck abgebildet. Die kalkulierten Kosten und Werte der Tätigkeitsdauern wurden der Tabelle Fertigungsschritte des Anhangs 8.1, Prozessübersicht, entnommen. Die Tätigkeiten umfassen Einlegen, Vorspannen, Abstellen, Betonieren, Nachbehandeln.<sup>183</sup> Die resultierenden Dauern und Kosten ergeben sich zu rund **50,7 min** und **29,27 €**. Diese setzen sich aus der Summe der einzelnen Kostenanteile aus Maschinen-, Personal- und Materialkosten zusammen, dessen Schema zur Berechnung in Kapitel 4.3 erläutert wurde. Der anschließende Aushärtungsprozess, der rund 840 min (14 h) dauert, verursacht Kosten in Höhe von 76,29 €. Für die Berechnung der Prozesskosten hat das Unternehmen +Ultra die Randbedingung vorgegeben, dass die Aushärtung außerhalb des Schichtbetriebes stattfindet und für diese Kalkulation keine Personalkosten, sowie keine kalkulatorischen Maschinenkosten angesetzt werden sollen. Die Darstellung der Prozessdauer in nachstehender Abbildung 24 wurde aus Übersichtsgründen reduziert. Nach dem Aushärten zum Zeitpunkt **890,7 min**, zu dem zu erwartende Prozesskosten in Höhe von **105,56 €** entstanden sind, startet die Plattenfertigung Teil 2. Sie umfasst die Tätigkeiten Entspannen und Abtrennen und verursacht Kosten von 7,83 € in einer Zeit von 22 min. Summiert man die Zeiten und Kosten der Teilprozesse Plattenfertigung Teil 1, Aushärten und Plattenfertigung Teil 2 auf, ergibt sich eine Durchlaufzeit von **912,7 min** bei Prozesskosten von **113,39 €**. Durch die hohen Kosten und lange Dauer des Aushärtungsprozesses bietet sich an, dass Produktentwickler bei der Planung der Erzeugnisse Maßnahmen setzen, die eine Reduktion der Dauern, beispielsweise durch den Einsatz von Dampftrocknern, bewirken.

<sup>183</sup> Zur Tätigkeitsbeschreibung siehe Kapitel 4.2 S.79f

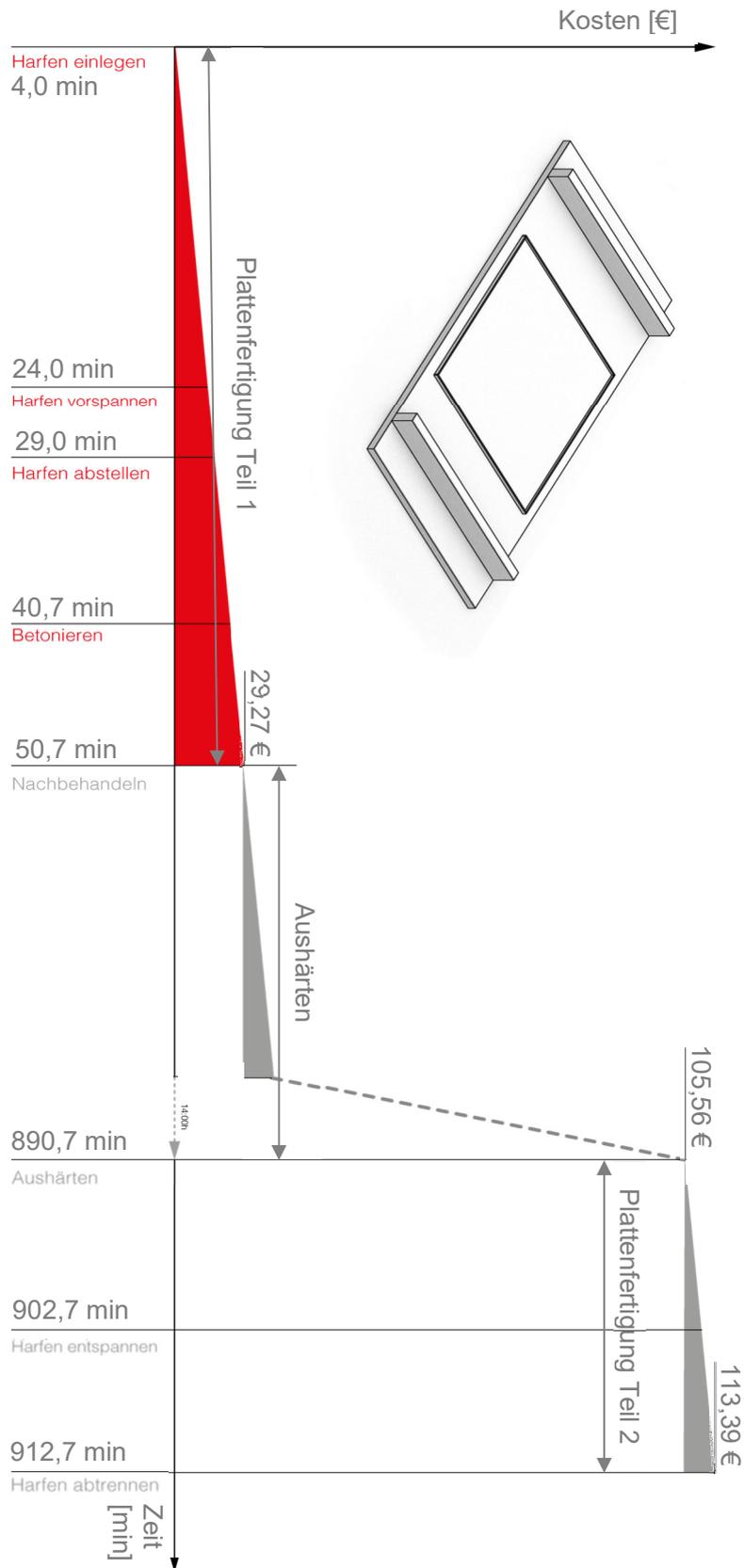


Abbildung 24: Herstellkostenentwicklung des Prozesses Schaltisch

Nach Ermittlung der einzelnen Herstellkosten innerhalb der Prozesse in Kapitel 4.3, kann nun die Aneinanderkettung dieser, zur Darstellung der gesamten Kostenentwicklung entlang der Durchlaufzeit stattfinden. Dazu ist nachstehend die Kostenentwicklung der Fertigungslinie auf Prozessebene<sup>184</sup> tabellarisch gelistet. Die abgebildeten Werte der Tabelle 9 sind dem Anhang 8.1, Kalkulationsübersicht, entnommen, wobei die Tätigkeiten der Prozesse nicht gelistet werden. Die Dauern, aus denen mittels Maschinenstundensätzen die Maschinenkosten pro Stück ermittelt wurden, sowie die Material- und Personalkosten, deren Berechnungsschema in Kapitel 4.3 erläutert wurde, werden in nachstehender Tabelle 9 aufsummiert. Diese Summen dienen der Erstellung der Abbildung 25, in der der gesamte Kostenverlauf der Fertigungslinie abgebildet ist.

Fertigungsschritt	Dauer (min)	Masch €/Stk	Mat €/Stk	Mit €/Stk	Σ €/Stk
Pultrusion	79,0	66,20	19,01	9,22	94,42
Transport	1,0	0,10	0	0,06	0,16
Harfenfertigung	66,5	4,39	0	11,64	16,03
Transport 2	1,0	0,10	0	0,06	0,16
Plattenfertigung Teil 1	50,7	10,22	7,21	11,84	29,27
Aushärten	840,0	76,29	0	0,00	76,29
Plattenfertigung 2	22,0	5,26	0	2,57	7,83
Abheben	14,0	2,52	0	1,31	3,83
Formatieren	73,3	21,12	0	12,84	33,95
Einlegen in Lager	9,0	0,51	0	1,26	1,77
Σ pro Stück	<b>1156,6</b>	186,72	25,69	60,13	<b>263,71</b>

Tabelle 9: Überblick der Kostenentwicklung auf Prozessebene

Die sich aus der Summe der Prozesse ergebenden Kosten zur Erzeugung und Bearbeitung der Platte, ohne Zwischenlagerungen, belaufen sich auf **263,71 €** pro Platte. Diese Kostenentwicklung geschieht in einer Fertigungszeit von **1156,6 Minuten**. Für die nachstehende Abbildung 25 wird die Visualisierung der in Tabelle 9 gelisteten Werte vorgenommen. Darin werden die Prozesse in chronologischer Reihenfolge auf der Zeitachse eingetragen und mit den Gesamtkosten des jeweiligen Prozesses auf der Ordinate beziffert. Daraus ergibt sich die Darstellung des gesamten Kostenverlaufes der Fertigungslinie. Die vertikal verlaufende, grau strichlierte Linie mit dem Namen Aushärtung, die auf der Abszisse gekennzeichnet ist, zeigt den Ort des Aushärtungsprozesses. Das Unternehmen sieht für die Darstellungen des gesamten Kostenverlaufes vor, die Dauer des Aushärtungsprozesses mit 840 Minuten entfallen zu lassen, da dieser außerhalb des Schichtbetriebes der Anlage durchgeführt wird und so nicht am kritischen Weg der Fertigung liegt. Die Durchlaufzeit ohne Aushärtungsprozess beläuft sich somit auf **316,6 Minuten** (rund 5,3 Stunden).

<sup>184</sup> Entsprechend den festgelegten Ebenen in Kapitel 4.2.

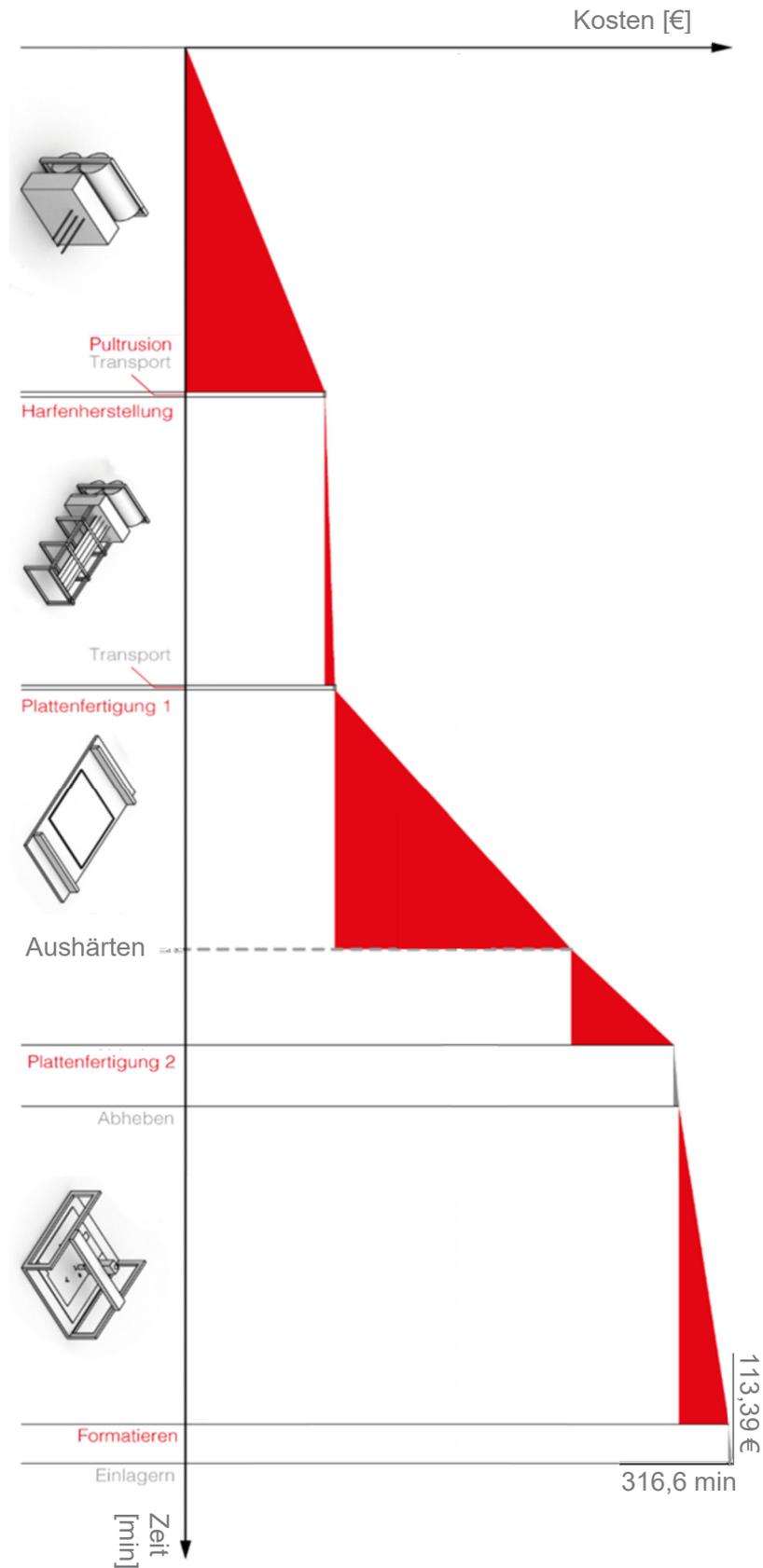


Abbildung 25: Kostenentwicklung der Fertigungslinie

Das Vorgehen zur Berechnung und die Darstellungen der Kostenentwicklung der Fertigungslinie dient dem Unternehmen +Ultra, für die Berechnung und Visualisierung zukünftig entwickelter Erzeugnisse. Anschließend an dieses Kapitel wird nun auf drei Maßnahmen eingegangen, die sich aus der Kalkulation ergeben und mit denen die Kosten und Durchlaufzeiten des beispielhaft berechneten Carbonbeton-Fertigteils beeinflusst werden können. Diese werden schematisch dargestellt und mit Beispielen erläutert.

#### 4.5 Einflussnahme auf die Kostenentwicklung aus der Kalkulation

Die beschriebene Kalkulation der Kosten dient der Produktentwicklung als Schema zur Berechnung der zu erwartenden Fertigungskosten. Der Produktentwicklung obliegt es, wirtschaftlich rationalisierte Produkte zu entwerfen, die hinsichtlich der in der Produktion entstehenden Kosten optimiert werden. Diese Optimierungen können durch Änderungen der Prozesse und Tätigkeiten, sowie deren Aneinanderreihung bewirkt werden und haben in erster Linie Auswirkungen auf die Faktoren Kosten und Zeit. In den nachstehenden Abbildungen werden drei Gruppen an Maßnahmen dargestellt, die Produktentwicklern zur Verfügung stehen, um Kosten und Zeiten der Erzeugung und Verarbeitung zu beeinflussen. Weiters werden die Auswirkungen der Maßnahmen grafisch veranschaulicht:

- **Reduktion der Sekundärtätigkeiten:**<sup>185</sup> Dabei werden nichtwerterschöpfende Tätigkeiten identifiziert und Maßnahmen zur Reduktion oder Vermeidung dieser Tätigkeiten gesucht. Geschehen kann das in der CNC Bearbeitung beispielsweise durch die Verbesserung der Tätigkeitsfolgen zugunsten geringerer Bewegungswege, oder durch die Reduktion von Transportwegen und kürzerer Warte- und Lagerzeiten. Durch die Reduktion der Sekundärtätigkeiten wird die Produktionszeit des Prozessschrittes verkürzt und Kosten entstehen in geringerem Maße. Ein konkretes Beispiel aus der beschriebenen Fertigungslinie ist die Reduktion der Aushärtedauer des Betons am Schalitisch. Diese Sekundärtätigkeit kann wie bereits erwähnt, durch aushärtungsbeschleunigende Anlagen (beispielsweise Dampfanlagen) ermöglicht werden. Dadurch kann die Durchlaufzeit der Platte im Prozess der Plattenfertigung von 840 Minuten auf rund 240 Minuten reduziert werden, Maschinenkosten der neuen Anlage müssen allerdings berücksichtigt wer-

<sup>185</sup> Sekundärtätigkeiten: siehe hierzu Kapitel 4.2

den. Die Einflüsse auf die Durchlaufzeit, beziehungsweise Durchlaufzeiteffizienz, stehen in Abhängigkeit zur Position der analysierten Tätigkeit in der zeitlichen Abfolge. Das bedeutet, dass Einsparungspotential besteht, wenn die Prozesse am kritischen Weg der Produktion liegen. Diese Reduktion der Sekundärkosten ist in Abbildung 26 dargestellt. Sie zeigt eine in rot dargestellte Primärtätigkeit, der eine Sekundärtätigkeit folgt. Durch das Vermeiden oder Reduzieren des zeitlichen Umfangs oder der Tätigkeitskosten durch Maßnahmen, ergibt sich eine Differenz in den zu erwarteten Kosten, die die Durchlaufzeit verkürzt und die Prozesskosten reduziert.

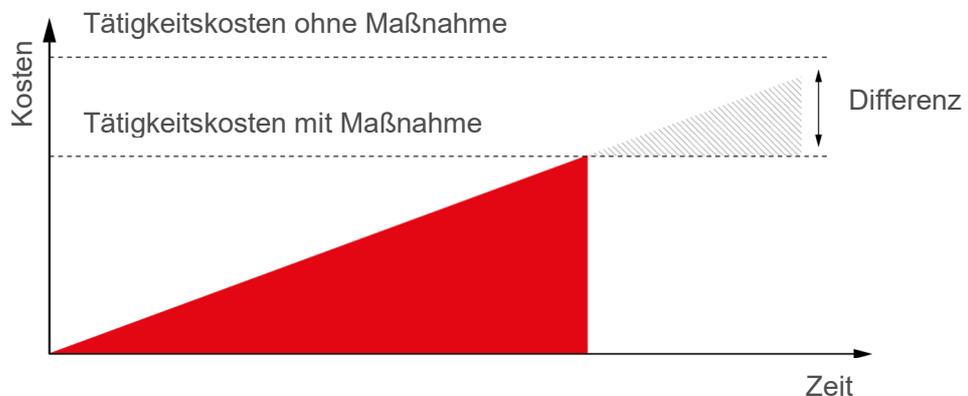


Abbildung 26: Auswirkung von Reduktionen der Sekundärtätigkeiten

- **Optimierung der Primärtätigkeiten:**<sup>186</sup> Analog zur Vermeidung der Sekundärtätigkeiten, können Primärtätigkeiten optimiert werden. Ziel ist es, einen Prozess oder eine Tätigkeit durch die Geschwindigkeit, mit der dieser durchgeführt wird, sowie durch die quantitative Ressourcenplanung schneller zu gestalten. Dabei gilt es, das Optimum zwischen Investitions-, Ressourcenkapazitäten und Outputmengen zu finden. Schnellere Formatieren der Bauteile durch beschleunigte Arbeitsgeschwindigkeiten des Roboters sind ein Beispiel der Optimierung der Primärtätigkeiten. In nachstehender Abbildung 27 wird eine Primärtätigkeit dargestellt, die durch Maßnahmen zeitlich optimiert wurde. Darin schematisch abgebildet, ist die Kostendifferenz, die sich aus der schnelleren zeitlichen Abhandlung des Prozesses ergibt.

<sup>186</sup> Primärtätigkeiten: siehe hierzu Kapitel 4.2

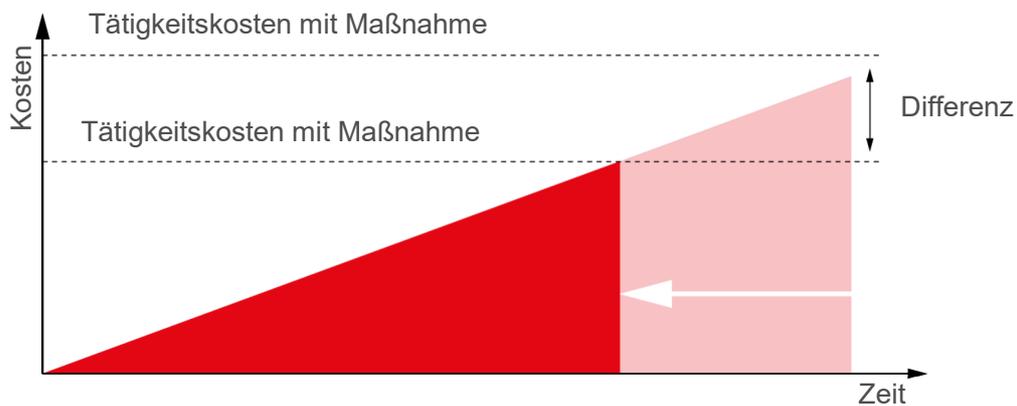


Abbildung 27: Auswirkung von Verkürzungen der Bearbeitungszeiten

- Minderung der Prozesskosten:** Die Reduktion der entstehenden Kosten innerhalb eines zeitlich gleichbleibenden Prozesses stellt eine weitere Gruppe von Maßnahmen dar, die Einfluss auf Prozess- und Tätigkeitskosten hat. Ziel der Maßnahmen ist es, zu erwartende Kosten, die sich aus der Berechnung in Kapitel 4.3 ergeben, zu verringern. Die Kostenbestandteile der Berechnung umfassen Maschinen-, Material- und Personalkosten. Sie bilden die Optimierungsstellgrößen dieser Maßnahmengruppe. Beispiele dafür sind der Tausch von Maschinen, die Tätigkeiten zwar in ähnlicher Geschwindigkeit abhandeln, aber geringere variable und fixe Kosten verursachen. Dazu zählen unter anderem Reparatur-, Energie- und Platzkosten, sowie kalkulatorische Kosten. In nachstehender Abbildung 28 wird eine Primärtätigkeit dargestellt, deren zu erwartende Kosten bei gleichbleibender Bearbeitungszeit verringern werden. Da es sich bei der Abbildung um eine Tätigkeit eines Prozesses handelt, ist zu erwähnen das Materialkosten für die Abbildung nicht berücksichtigt werden. Diese werden nämlich dem gesamten Prozess und nicht den einzelnen Tätigkeiten zugeordnet.

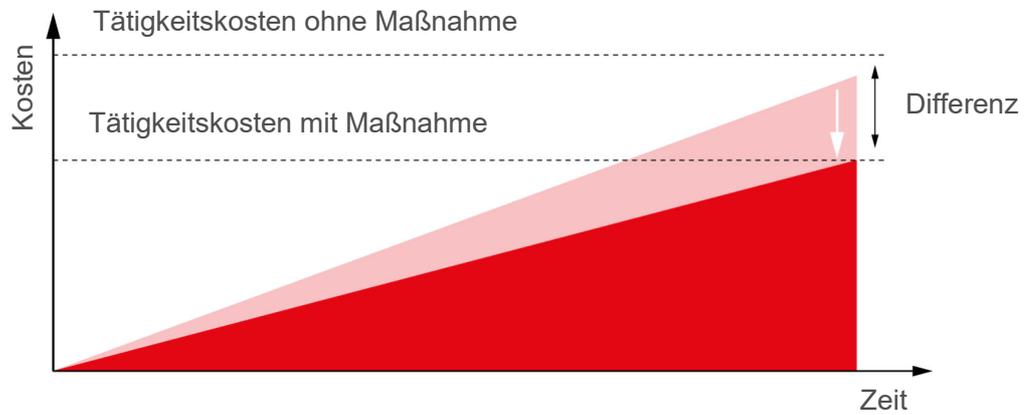


Abbildung 28: Auswirkung von verringerten Prozesskosten

Dieses Kapitel ist abschließend auf Gruppen von Maßnahmen eingegangen, mit denen auf die Entwicklung der Prozess- und Tätigkeitskosten Einfluss genommen werden kann. Sie bilden Stellgrößen in der Festlegung des Produktionsablaufes und dienen der Produktentwicklung als Hilfestellung bei der Optimierung der Herstellkosten und Durchlaufzeiten von Erzeugnissen.

## 5 Conclusio

In dieser Masterarbeit wurde auf die Beschreibung und beispielhaften Kalkulation einer industriellen Fertigungslinie zur Erzeugung und Verarbeitung von kohlefaserbewehrten Betonbauteilen eingegangen, um die Entwicklung der Herstellkosten und Durchlaufzeit entlang der Fertigung darzustellen. Zur Veranschaulichung, wie sich diese industrielle Fertigteilerzeugung und -verarbeitung in den industriellen Bauprozess eingliedert, wurden wichtige Prinzipien und charakteristische Merkmale des industriellen Bauprozesses beschrieben und Anforderungen an diesen formuliert. In weiterer Folge wurde die industrielle Planung, Fertigung und Montage in den Kontext des Bauprozesses gebracht und beschrieben, welche Änderungen, sowie Vor- und Nachteile sich zu gegenwärtig gängigen Bauabläufen ergeben. Des Weiteren wurden Forderungen und Auswirkungen des industriellen Bauens beschrieben, die Einfluss auf die Fertigungslinie haben. Anschließend wurde auf spezifische Aspekte der Betonfertigteilerzeugung eingegangen, um die ablaufenden Prozesse in der Betonfertigteilerzeugung zu identifizieren. Dabei wurde auf Produktionssysteme und erzeugbare Produkte in der Betonteilerzeugung, sowie auf Informationstechnologien, die Planung und Fertigung verknüpfen können, eingegangen.

Die Einordnung der industriellen Fertigung in den Bauablauf hat gezeigt, dass durch den Einsatz verschiedener Methoden und Prinzipien des industriellen Bauens, sowie durch die Verwendung von Informationstechnologien, wie CAD und CIM Systemen und der Verarbeitung des Verbundwerkstoffs Carbonbeton, Vorteile beim Einsatz von Betonfertigteilen erzielt werden können. Als besonderer Vorteil wurde im Kapitel 3.4 identifiziert, dass durch Carbonbeton die individuelle Produktionsfertigteilerzeugung in einen kundenunabhängigen und einen kundenindividuellen Produktionsprozess, zugunsten geringerer Produktionskomplexität und kürzerer Produktlieferzeiten getrennt werden kann. Auf Basis der vom Unternehmen +Ultra entwickelten Fertigungslinie, die auf der Verarbeitung von kohlefaserbewehrtem Beton basiert, und mit den Erkenntnissen aus den grundlegenden Kapiteln dieser Arbeit, wurde die Kalkulation eines beispielhaften Produktes, das die Fertigungslinie durchläuft, durchgeführt. Die beschriebene Kalkulation dient als standardisiertes Schema zur Herstellkostenberechnung von Erzeugnissen in der laufenden Forschungsarbeit des Unternehmens +Ultra. Bezugnehmend auf die Forschungsfrage nach der Kostenentwicklung und der Durchlaufzeit eines kohlefaserbewehrten Betonbauteils in einer Fertigungslinie, wird das Vorgehen zur Ermittlung der Herstellkosten und Durchlaufzeiten in nachstehender Abbildung 30 veranschaulicht. Darin werden die übergeordneten Prozesse Pultrusion, Harfenfertigung, der Schaltischprozess, die Formatierung und Lagerung dargestellt. In weiterer Folge werden die Tätigkeiten der einzelnen Prozesse gelistet, bevor die Darstellung der berechneten Maschinenkosten, Perso-

nalkosten und Materialkosten abgebildet wird. Im unteren Teil der Abbildung 30 werden die einzelnen Grafiken der Kostenentwicklung zum Gesamtüberblick der Fertigungskosten einer beispielhaften Platte zusammengefügt. Sie zeigt die gesamte Entwicklung der Kosten entlang der Durchlaufzeit des Erzeugnisses. Die Kosten ergeben sich darin zu 263,71 € bei einer Durchlaufzeit von 5,27 Stunden. Darin wurde nach Vorgabe des Unternehmens +Ultra der außerhalb des Schichtbetriebes stattfindende Aushärtungsprozess ausgegliedert.

Diese quantitative Forschung unterstreicht, dass in industriell vorgefertigten Produkten aus kohlefaserbewehrten Betonbauteilen großes Potential liegt, um den Marktanforderungen nach niedrigen Baukosten, kurzen Produktionszeiten von Bauwerken und hoher Qualität nachzukommen. Um die Vorteile eines ganzheitlich industriell gestalteten Bauprozesses nutzen zu können, kann ein zukünftiger Fokus von Forschungsarbeiten, wie es im Unternehmen +Ultra bereits geschieht, auf die Umsetzung ganzheitlicher industrialisierter Organisationen in der Baubranche gelegt werden. Dabei gilt es nicht nur auf einzelne Teilnehmer des industriellen Bauprozesses einzugehen, sondern den gesamten Bauprozess zu betrachten, um bessere Kollaboration und Schnittstellen zu schaffen.

Abbildung 29: Herstell- und Durchlaufzeitberechnung der Fertigungslinie.

## 6 Ausblick

Die Ergebnisse der Herstellkostenberechnung zur Erzeugung und Verarbeitung von kohlefaserbewehrten Betonbauteilen aus Kapitel 4 führen zu der Frage, welche weiteren Prozesse von der Baustelle in der industrielle Fertigungsproduktion integriert werden können, um die Vorteile des industriell geprägten Bauprozesses weiter realisieren zu können. Dazu kann aufbauend auf die Analyse der Fertigungslinie darauf eingegangen werden, welche Prozesse nach der Halbzeuherzeugung und -verarbeitung folgen können. DI Parmann und sein Team beschäftigen sich dazu vor allem mit der Entwicklung der nachstehenden Bereiche:

- **Montageprozesse:** Im Montageprozess werden die vorgefertigten Elemente zu Modulen mit höherer inhaltlicher Integration und räumlicher Verknüpfung verarbeitet. Elemente werden durch geeignete Verbindungstechniken im Werk zusammengebaut und Ausstattungen werden teils manuell, teils automatisiert verbaut.
- **Mietzonenfertigung:** Sie ermöglicht verschiedenen Gewerken, Manipulationen an den vorgefertigten Elementen und Modulen vorzunehmen. Beispiele dafür können der Fenstereinbau oder das manuelle Montieren von Anbauteilen sein. Die Werksumgebung ermöglicht körperlich beanspruchende und ergonomisch fragwürdige Arbeitsschritte zu reduzieren und schafft eine sichere Arbeitsumgebung, die produktivitätssteigernde Vorteile verspricht. Dazu müssen Prozesse identifiziert werden, die sich sinnvoll von der Baustelle in die Produktion transferieren lassen.
- **Bündelung:** Hier werden vor Auslieferung der Elemente und Module zusätzliche Maßnahmen getroffen, die die Montage auf der Baustelle erleichtern sollen. Beispiele für Maßnahmen zur Schnittstellenbewältigung können sein: das Aufdrucken von Montageplänen und Anlagepositionen auf Bauteiloberflächen zur schnellen Positionierung von Anbauteilen mit reduzierter Verwechslungsgefahr, die Vorbereitung von Materialien, um die Verbindung der Bauteile während der Montage zu erleichtern oder das Vorbefestigen von Verbindungsteilen und Anbauteilen. Auch hier gilt es zu erkunden, welche Maßnahmen in der Bündelung gesetzt werden können, um Verbesserungen im Montageprozess zu bewirken und Fehler zu vermeiden.

Durch gezielte Forschung in diesen Bereichen, könnten weitere Synergien zwischen der Produktion im Werk und der Montage auf der Baustelle identifiziert werden, die den Bauprozess an die Anforderungen des Marktes, nach kurzen Lieferzeiten, geringen Kosten und hoher Qualität weiter anpassen.

Neben der weiteren Konkretisierung der Bestandteile der Produktion, gilt es in zukünftiger Forschungsarbeit auch auf herstellbare Produkte einzugehen, die im Zuge der beschriebenen Fertigungslinie erzeugt und verarbeitet werden können. Dabei können industrielle Vorteile im Bauprozess durch die zunehmende inhaltliche Integration der Funktionen eines Elements und dem steigenden räumlichen Verknüpfungsgrad erzielt werden. Zu diesen Produkten zählen unter anderem die nachstehenden Element- und Modulgruppen:

- Fertig(rohbau)elemente: Sie umfassen massive Wände, Decken und Stützen in vordefinierten Formaten, die durch die Halbzeugverarbeitung individualisiert werden können.
- Rohbauräummodule: Aus hergestellten Platten, die in der Halbzeugverarbeitung formatiert und mit Vorbohrungen, Öffnungen, Einkerbungen, etc versehen werden, können in der Werksmontage fertige Raummodule hergestellt werden.
- Fertigräummodule: konstruktiv, gestalterisch und bauphysikalisch fertiggestellte Module, in denen Oberflächen hergestellt und die technische Raumausstattung verbaut ist.

Weiterführende Forschung in den genannten Themenbereichen würde die Beschreibung der Fertigungslinie um konkrete Produkte und Synergien konkretisieren und könnte einen wesentlichen Beitrag zur Industrialisierung des Bauprozesses liefern.



### 7.1. Buchquellen

*BACHMANN, H.; STEINLE, A.; HAHN, V.:* Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau, Bauingenieur-Praxis, Ernst, Wilhelm & Sohn. Berlin, 2012.

*BAUER, H.:* Baubetrieb. Springer Verlag. Berlin, 2007.

*BLOEMKE, M.; BOENERT, L.:* Logistikkonzepte im Schlüsselfertigbau zur Erhöhung der Kostenführerschaft. In: Bauingenieur 80, H6/2003 S227-283.

*BRONNER, A.:* Handbuch der Rationalisierung, Kontakt & Studium Heft 331, expert-Verl. Renningen, 2003.

BUNDESVERBAND DEUTSCHE BETON- UND FERTIGTEILINDUSTRIE: Beton und Fertigteil-Jahrbuch.

F.A. BROCKHAUS: Brockhaus Enzyklopädie – in 24 Bänden. 19. Auflage. F.A. Brockhaus GmbH. Mannheim, 1993.

*FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J.D.; BERGMEISTER, K.:* 2009 Beton-Kalender – Konstruktiver Hochbau Aktuelle Massivbaunormen, Beton-Kalender Heft 2009, Ernst & Sohn. Berlin, 2009.

*FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J.D.; BERGMEISTER, K.:* Beton Kalender 2016 – Beton im Hochbau, Silos und Behälter. Wilhelm Ernst & Sohn, Beton-Kalender105.2016, Ernst & Sohn. Berlin, 2016.

*GIRMSCHIED, G.:* Industrielles Bauen. SKRIPTUM – 6. Semester, Bachelor of Science ETH, Studiengang Bauingenieurwissenschaften. Institut für Bauplanung und Baubetrieb, 2007.

*GIRMSCHIED, G.:* Strategisches Bauunternehmensmanagement – Prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft, VDI-Buchv.0, Springer Verlag. Berlin, 2010.

*GIRMSCHIED, G.:* Bauunternehmensmanagement-prozessorientiert Band 2. Springer Verlag. Berlin, 2014.

*GRABNER, T.:* Operations Management – Auftragserfüllung bei Sach- und Dienstleistungen. Springer Gabler. Wiesbaden, 2017.

*GREINER, P.; MAYER, P., E.; STARK, K.:* Baubetriebslehre-Projektmanagement, Viewegs Fachbücher der Technik, Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden, 2002.

*GREINER, P.; MAYER, P., E.; STARK, K.:* Baubetriebslehre - Projektmanagement – Wie Bauprojekte erfolgreich gesteuert werden. Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden, 2005.

*HARTMANN, J.:* Wiederkehr und Mehrdeutigkeit. Dissertation, Research, Springer Fachmedien Wiesbaden. Berlin, 2015.

*HECK, D.:* BAUVERFAHRENSTECHNIK – Skriptum. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft.

*HOFSTADLER, C.:* Schularbeiten – Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation, VDI-Buch, Springer Verlag. Berlin, 2008.

*HOFSTADLER, C.:* Produktivität im Baubetrieb – Bauablaufstörungen und Produktivitätsverluste. Springer Vieweg. Berlin, 2014.

*HOFSTADLER, C.; MARIUS, R.; KUMMER, M.:* Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. Springer Fachmedien Wiesbaden. Wiesbaden, 2019.

*JEHLE, P.; MICHAILENKO, N.; SEYFFERT, S. et al.:* IntelliBau 2 – Schriften zur Bauverfahrenstechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden. Berlin, 2013.

*KIRSCH J.:* Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme – Entwicklung eines Gestaltungsmodells eines Ganzheitlichen Produktionssystems für den Bauunternehmer. Fakultät für Bauingenieur-, Geo-, und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2008.

*KLETTI, J.:* MES - Manufacturing Execution System. Springer Verlag. Berlin, 2015.

*KÖCHENDÖRFER, B.; LIEBCHEN, J.H.; VIERING, M.G.:* Bau-Projekt-Management – Grundlagen und Vorgehensweisen, Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft, Springer Vieweg. Berlin, 2018.

*KORDOWICH, P.:* Betriebliche Kommunikationsprozesse bei Dienstleistern – Herausforderungen für Organisation und IT durch Kundenorientierung. Dissertation. Universität Hohenheim. Hohenheim, 2010.

*KORTMANN, J.; KOPF, F.; HILLEMANN, L. et al.:* Recycling von Carbonbeton – Aufbereitung im großtechnischen Maßstab gelungen! In: Bauingenieur, 11/2018, Jahressausgabe 2018/2019 des VDI-Fachbereichs Bautechnik.

*KORTMANN, J.; KOPF, F.:* C<sup>3</sup>-V-I.13 Branchenübergreifender Einsatz von recycelten Carbonfasern aus C<sup>3</sup>-Bauteilen – In: C<sup>3</sup> - Carbon Concrete Composite e.V. und TUDALIT e.V. (Hrsg.): Tagungsband zu den 10. Carbon- und Textilbetontagen, 2018.

*KOTULLA, B.; URLAU\_CLEVER, B.-P.; KOTULLA, P.:* Industrielles Bauen. Werner. Düsseldorf, 1992.

*KUCH, H.; SCHWABE, J.-H.; PALZER, U.:* Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen – Verfahren und Ausrüstungen. Verlag Bau+Technik. s.l., 2015.

*KUMMER, S.; GRÜN, O.; JAMMERNEGG, W.:* Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. Pearson. Hallbergmoos, 2019.

LOTTER, B.; WIENDAHL, H.P.: Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis; mit 16 Tabellen. Springer Verlag. Berlin, 2006.

MAUERHOFER, G.: Bauprojektmanagement 2. Skriptum., 2017.

MÖLLER, D.-A.; KALUSCHE, W.: Grundlagen der wirtschaftlichen Bauausführung. Oldenbourg. München, 2008.

MORO, J., L.; ALIHODZIC, B.; ROTTER, M. et al.: Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail – Band 1 Grundlagen. Springer Verlag. Berlin, 2009.

PAULITSCH, K.S.: ZUM LEISTBAREN WOHNRAUM – Material- und Kostenrelevanz. Institut für Wohnbau, 2017.

PETERSSON, P.; KICKENWEITZ, P.; LINORTNER, C., KREJS, B.: Intensified Density – Densification strategies for the peri-urban zone using modular construction principles. Institut für Grundlagen der Konstruktion und des Entwerfens, TU Graz – Fakultät für Architektur, 2018.

PILLER, F.T.: Mass Customization, Markt- und Unternehmensentwicklung Markets and Organisations, Springer Fachmedien. Wiesbaden, 2007.

PIRCHNER, E.: In dreifacher Ausführung: Bürogebäude für Österreich, Rumänien und Deutschland. – In: Zuschnitt, 50/2013.

REICHWALD, R.; PILLER, F.: Interaktive Wertschöpfung – Open Innovation, Individualisierung und neue Formen der Arbeitsteilung. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden. Wiesbaden, 2006.

ROSENTHAL, M.; DÖRNHÖFER, A.; STAIB, G.: Elemente und Systeme – Modulares Bauen – Entwurf, Konstruktion, neue Technologien. De Gruyter. Basel, 2013.

ROTH, C.; ROZYNSKI, D.; KOCH, P. et al.: Vom industrialisierten Einfamilienhaus zum verdichteten Wohnungsbau. TU Braunschweig, Institut für Baukonstruktion, Abteilung Industriebau und konstruktives Entwerfen. Fraunhofer IRB Verlag, 2009.

SCHNITTICH, C.: Vorfertigung – Hightech und Handarbeit.

SIHN-WEBER, A.; FISCHLER, F.: CSR und Klimawandel – Unternehmenspotenziale und Chancen einer nachhaltigen und klimaschonenden Wirtschaftstransformation, Management-Reihe Corporate Social Responsibility, Springer Verlag GmbH. Berlin, 2020.

TERNES, A.; TOWERS, I.; JERUSEL, M.: Konsumentenverhalten im Zeitalter der Mass Customization – Trends; Individualisierung und Nachhaltigkeit, Essentials, Springer Gabler. Wiesbaden, 2015.

*THOMAS, P.:* Mass Customization als Wettbewerbsstrategie in der Finanzdienstleistungsbranche. Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2008, Gabler Edition Wissenschaft, Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. Wiesbaden, 2008.

*ZILCH, K.; Diederichs, C.J.; KATZENBACH, R.:* Handbuch für Bauingenieure – Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit - Fachwissen in einer Hand. Springer Verlag. Berlin, 2002.

## **7.2. Internetquellen**

Batterieschalung, <https://www.bt-innovation.de/produkt/batterieschalung/> [Datum des Zugriffs: 24.01.2020].

*BOCHMANN, J.; SCHEERER, S.:* Parkhausplatte aus Carbonbeton. Technische Universität Dresden, 2016, <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/TRC-C3/grundlagenforschung/C3-Bauteile> [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

Bundesministerium für Finanzen: AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Maschinenbau" – IV D 2-S 1551-470/01, 2001, [https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere\\_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle\\_Maschinenbau.html](https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Maschinenbau.html).

CARBON-EXPRESS: Pultrusion Carbon CFK, 2014, <https://carbondeutschland.de/pultrusion-carbon-cfk/> [Datum des Zugriffs: 27.01.2020].

FIBERLINE A/S: Fiberline Pultrusionsanlage, <https://fiberline.de/%C3%BCber-fiberline/komposit/pultrusion/pultrudering/> [Datum des Zugriffs: 26.01.2020].

*HAUSER, T.:* Modulare Systeme. Praktikumsdokumentation, Hochschule der Künste Bern, 2015, <https://modulart.ch/glossar/Vorfertigungsgrad> [Datum des Zugriffs: 10.02.2020].

*KESSEL, M.; HOFFMEISTER, W.:* Ökologische Herstellung von Holzhausern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse. Ökologische Herstellung von Holzhausern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse, [http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische\\_Herstellung\\_von\\_Holzhausern.pdf](http://www.ibholz.tu-bs.de/cms/forschung/Oekologische_Herstellung_von_Holzhausern.pdf) [Datum des Zugriffs: 09.01.2020].

KLH: Plattentypen – Oberflächen & Kenndaten, <https://www.klh.at/plattentypen-oberflaechen-kenndaten/#plattentypen> [Datum des Zugriffs: 29.01.2020].

*KLODT, H.:* Dienstleistungen – Definition: Was ist "Dienstleistungen"?, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/dienstleistungen-28662> [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

*KOPPELHUBER, J.:* Holzbau in der Bauwirtschaft – ein Paradigmenwechsel hin zum Industriellen Bauen. 10. Europäischer Kongress EBH, 2017, [http://www.forum-holzbau.com/pdf/17\\_EBH2017\\_Koppelhuber.pdf](http://www.forum-holzbau.com/pdf/17_EBH2017_Koppelhuber.pdf).

*MICHAEL, F.:* Der Handwerker-Effekt macht Bauen fast unbezahlbar, 2018, <https://www.welt.de/finanzen/immobilien/article175288013/Baukosten-Anstieg-um-vier-Prozent-seit-Februar-2017.html> [Datum des Zugriffs: 21.01.2020].

*MICHLER, H.:* Entwicklung leichter Deckenelemente aus Carbonbeton – RESSOURCENSPPARENDES DECKENBAUTEIL AUS CARBONBETON, 2018, <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/TRC-C3/grundlagenforschung/C3-Bauteile> [Datum des Zugriffs: 10.02.2020].

P + H PLÜSS: Faserverbund-Profile Aufbau und Herstellung, <http://www.pluessag.ch/de/technische-informationen/cfk-gfk-aufbau-herstellung.html> [Datum des Zugriffs: 26.01.2020].

PULTREX Ltd.: Pultrusion Machinery – Capacity Chart, 2019, <https://pultrex.com/wp-content/uploads/2019/03/Company-Profile-Pultrusion-19-2.pdf> [Datum des Zugriffs: 07.03.2020].

Rippendecke, <https://baulexikon.beuth.de/RIPPENDECKE.HTM> [Datum des Zugriffs: 26.01.2020].

S&P: Grundlagen für S&P FRP-Systeme – VER13.11.20014/ISM, 2014, [https://www.sp-reinforcement.at/sites/default/files/field\\_product\\_col\\_doc\\_file/20141113\\_grundlagen\\_fuer\\_sp\\_frp-systeme\\_2.pdf](https://www.sp-reinforcement.at/sites/default/files/field_product_col_doc_file/20141113_grundlagen_fuer_sp_frp-systeme_2.pdf) [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

Schleuderbeton, <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/schleuderbeton-1476621> [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

*SCHLICK, H.:* Lean Construction – Ganzheitliches Produktionssystem für den Technischen Generalunternehmer, [https://www.tmb.kit.edu/Forschung\\_595.php](https://www.tmb.kit.edu/Forschung_595.php) [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

SFS INTEC: Verbundsystem VB von SFS intec – Technische Informationen, [https://www.sfsintec.biz/internet/sfsintde.nsf/Print/System\\_VB](https://www.sfsintec.biz/internet/sfsintde.nsf/Print/System_VB) [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

STATISTIK AUSTRIA: Wohnungs- und Gebäudeerrichtung, Fertigstellungen, [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/menschen\\_und\\_gesellschaft/wohnen/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/wohnen/index.html) [Datum des Zugriffs: 20.01.2020].

TUP - REDAKTION: Vernetzte Produktion: Computer-integrated Manufacturing, 2017, <https://logistikknowhow.com/informationssysteme/vernetzte-produktion-computer-integrated-manufacturing/> [Datum des Zugriffs: 28.01.2020].

VODEL BAU: Konstruktive Stahlbetonfertigteile - Binder, <https://vogelbau.de/kompetenzen/stahlbetonfertigteile/leistungen/betonbinder/> [Datum des Zugriffs: 09.02.2020].

VOIT, C.: STAHLBETONTRAEGER – Typenblätter konstruktiver Fertigteilbau, 2013, [https://www.oberndorfer.at/fileadmin/user\\_upload/images/products/Fertigteil\\_Bau/08.01\\_Traeger.pdf](https://www.oberndorfer.at/fileadmin/user_upload/images/products/Fertigteil_Bau/08.01_Traeger.pdf) [Datum des Zugriffs: 24.01.2020].

WECKENMANN ANLAGETECHNIK: Mono-Z Schalungsroboter – Weckenmann Anlagentechnik [Youtube], <https://www.youtube.com/watch?v=x3u-De9orek> [Datum des Zugriffs: 26.01.2020].

WILDEMANN, H.: Individuelles Bauen mit industrieller Fertigung – Hausbau 4.0. 23. Internationales Holzbau-Forum IHF 2017, [http://www.forum-holzbau.com/pdf/25\\_IHF2017\\_Wildemann.pdf](http://www.forum-holzbau.com/pdf/25_IHF2017_Wildemann.pdf) [Datum des Zugriffs: 20.01.2020].

## 8 Anhang

### Anhangsübersicht

- 8.1 Kalkulation Übersicht
- 8.2 Pultrusion
- 8.3 Harfenfertigung
- 8.4 Schaltisch: Plattenfertigung I & II
- 8.5 Hebeteknik
- 8.6 Formatierung
- 8.7 Lagerung
- 8.8 Fördertechnik I & II